

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ  
ТЕОРИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ  
МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИИ  
МАШИНОСТРОЕНИЯ**

*В десяти томах  
под общей редакцией  
Ф.В. Новикова и А.В. Якимова*

**Том 9**

**Проектирование  
технологических процессов  
в машиностроении**

**Одесса 2005**

**УДК 621. 963**

**ББК 30.61**

**Н 73**

Рецензенты: докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой Одесского Национального политехнического университета Усов А.В.

докт. техн. наук, проф. Национального технического университета «ХПИ» Сизый Ю.А.

докт. техн. наук, проф. Харьковского государственного технического университета сельского хозяйства Коломиец В.В.

**Рекомендовано к печати Ученым советом Одесского Национального политехнического университета.**

Протокол № 10 от 26 апреля 2002 г.

Авторский коллектив: **Новиков Ф. В.**, д.т.н. – введение, часть 3: гл.1; **Якимов А. В.**, д.т.н., проф. – часть 1: гл.4; **Новиков Г.В.**, к.т.н. – часть 3: гл.1; **Якимов А. А.**, к.т.н., доц. – часть 1: гл. 4; **Ларшин В.П.**, д.т.н., проф. – часть 1: гл.1, 2, 3; часть 2: гл.4; **Чумный Ю. И.**, к.т.н., доц. - часть 2: гл. 1, 2, 3; **Кривошапка Ю.Н.**, к.э.н. – часть 2: гл.4; **Емельянов С.Г.**, д.т.н., проф. – часть 3: гл.2; **Куц В.В.**, к.т.н., доц. – часть 3: гл.2; **Гуцаленко Ю.Г.** – часть 3: гл.1 (§ 1.7.3.)

**Н 73 Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения /Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 9. “Проектирование технологических процессов в машиностроении” – Одесса: ОНПУ, 2005.– 584с.**

Рассмотрены основные задачи и методы проектирования технологических процессов в машиностроении. Приведены результаты проектирования прогрессивных технологических процессов, даны практические рекомендации.

Для специалистов машиностроительных предприятий, преподавателей и студентов высших учебных заведений.

Ил. 205, табл. 75, библиогр. 481 наим.

Розглянуто основні задачі і методи проектування технологічних процесів у машинобудуванні. Приведено результати проектування прогресивних технологічних процесів, дані практичні рекомендації.

Для фахівців машинобудівних підприємств, викладачів і студентів вищих навчальних закладів.

Іл. 205, табл. 75, бібліогр. 481 найм.

**ББК 30.61**

ISBN 966 – 7810 – 33 – X

ISBN 966 – 7810 – 63 – 1

© Новиков Ф.В.

Якимов А.В.

Новиков Г.В. и др.

2005

## ВВЕДЕНИЕ

Проектирование технологических процессов и систем является важнейшим этапом технологической подготовки производства (ТПП). Это творческий процесс, основанный на использовании систематизированных справочных данных. Эффективное проектирование требует широкой эрудиции технолога и чаще всего основано на его личном опыте. Поэтому проблема обучения эффективным приемам проектирования является чрезвычайно важной и актуальной. Большое значение в решении этой проблемы отводится подготовке соответствующей научно-технической литературы, поясняющей схему и логику принятия технологических решений, содержащей примеры и необходимые справочные данные. Эти данные должны соответствовать современному уровню развития технологии. Конечно, принятые на этапе ТПП технологические решения (план будущих действий) могут и должны изменяться, корректироваться в ходе их осуществления на исполнительной фазе производства. Однако отсутствие такого предварительно подготовленного плана действий равносильно движению автомобиля, шофер которого рулит наугад, не зная, куда его уводит дорога [1].

Современная технология машиностроения охватывает области высоких компьютерных технологий, где роль ТПП существенно увеличилась. Эта (подготовительная) стадия производственного процесса приобрела важнейшее значение для компаний и фирм, выпускающих наукоёмкую продукцию, поскольку уже на этой стадии можно оценивать эффективность будущего производства и принимать стратегические решения, связанные с большими капитальными затратами.

Быстрыми темпами развивается компьютерное проектирование технологических процессов и систем в машиностроении. Однако, несмотря на успехи в развитии компьютерной индустрии в целом, в области компьютерного проектирования остается еще много нерешенных вопросов. В связи с этим большое значение имеет анализ достигнутых результатов, а также новые разработки в данной области. Поэтому специалистам–проектировщикам необходимо, прежде всего, познать логику принятия технологических решений, представить трудности и альтернативы выбора рациональных решений из множества возможных. Это позволит им более реалистично относиться к результатам и возможностям компьютерного проектирования, кото-

рое чаще всего выполняется в режиме диалога между человеком и компьютером.

С учетом сказанного, в данной работе достаточно подробно рассмотрена вся схема принятия технологических решений при разработке технологических процессов и систем в машиностроении. Большое внимание уделяется проблемным и по-разному трактуемым вопросам технологического проектирования. Приведены новые результаты научных исследований. Это относится, например, к расчетам припуска на обработку и промежуточных (межоперационных) размеров заготовки, особенностям шлифовальных операций. Кроме того, в данной работе устаревшие ГОСТы, например, на исходные заготовки (прокат, поковки, отливки) заменены на действующие ГОСТы. Отличительной особенностью изложения материала является пояснение теоретических положений на конкретных примерах, позволяющих выполнять аналогичные расчёты применительно к условиям и с учётом особенностей рассматриваемых задач.

В данной работе достаточно полно представлены вопросы проектирования процессов сборки, формализации выбора оптимального маршрута обработки. Предложены новые подходы к компьютерному проектированию технологических процессов, доведенные до уровня работающих систем (САПР ТП). Показаны перспективы проектирования технологических процессов механической обработки на основе разработанных математических (аналитических) моделей параметров обработки, что открывает новые возможности в плане повышения технико-экономических показателей технологических процессов. Изложенные в работе материалы могут быть полезны как специалистам-проектировщикам, так и студентам при курсовом и дипломном проектировании по технологии машиностроения.

Издание подготовлено в рамках Международной научно-технической конференции “Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве”, проходящей в городе Харькове на базе Харьковской научно-производственной корпорации “ФЭД” два раза в год.

# ЧАСТЬ 1

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ

---

### ГЛАВА 1

#### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК

Выбор заготовки оказывает существенное влияние на трудоемкость и себестоимость технологического процесса. Алгоритмы выбора исходной заготовки существенно зависят от условий производства. Для условий массового, крупносерийного и серийного производства часто *выбор заготовки предопределен конструктором*, поскольку свойства заготовки в ряде случаев оказывают решающее влияние на эксплуатационные свойства деталей машин и машины в целом. В то же время в условиях единичного и мелкосерийного производства *инициатива* в выборе заготовки чаще *принадлежит технологу*. В условиях учебных заведений имеет смысл производить упрощенные технико-экономические расчеты, поскольку учащиеся не располагают необходимыми справочными материалами.

Таблица 1.1

Способ получения заготовки	Коэффициент использования материала (КИМ)	Вид заготовки	Вид затрат		
			Себестоимость	Капитальные вложения	Приведенные затраты
Горячая прокатка	0,36	Сортовой профиль общего назначения (круглый, квадратный)	1	1	1
		Фасонный профиль специального назначения	0,738	0,787	0,750
Свободная ковка	-	Поковка из слитков	0,855	0,825	0,845
Горячая объемная штамповка	0,62	Поковка из сортового проката	0,67	0,59	0,61
Литье в песчаную форму	0,83	Стальная отливка	0,33	0,44	0,37
	0,80	Чугунная отливка	-	-	-

Для укрупненных технико-экономических расчетов можно использовать обобщенные статистические данные в виде таблиц, номограмм, графиков и т.п. Так в работе [133, с.75] приведена таблица относительных затрат в расчете на 1 тонну готовых деталей (табл.1.1), когда базой для сравнения являются затраты на производство деталей из сортового проката.

Как следует из табл.1.1, наиболее низкий уровень приведенных затрат (на 1 тонну готовых деталей) имеет место при получении их из отливок, затем – из штампованных поковок и фасонных профилей специального назначения.

Имеются и другие методики экономического обоснования выбора исходной заготовки [64, 237, 368].

### **1.1. ПОКОВКИ, ПОЛУЧЕННЫЕ ШТАМПОВКОЙ**

В качестве заготовок машиностроительных деталей наиболее широко используют поковки, полученные объемной штамповкой [132].

При объемной штамповке (рис.1.1) течение металла при его пластическом деформировании ограничивается поверхностями полостей и выступов штампа, образующих в конечный момент штамповки единую замкнутую полость (ручей) по контурам поковки. В качестве исходной заготовки при объемной штамповке применяют кусок фасонного проката – круглого, квадратного, прямоугольного или другого фасонного профиля. Куски проката отрезают газовой резкой, механическими пилами, пресс-ножницами.

При объемной штамповке может быть использована горячая или холодная исходная заготовка; в первом случае объемная штамповка называется горячей, во втором – холодной.

*Холодную объемную штамповку и прессование* применяют преимущественно для высокопластичных металлов и сплавов. Основные разновидности холодной объемной штамповки – холодное прессование, выдавливание, холодная высадка, холодная объемная формовка, чеканка.

Способы холодной объемной штамповки в большинстве случаев позволяют получать деталь или точную заготовку, требующую минимальной механической обработки. Однако ряд факторов ограничивает применение холодной штамповки: для деформирования холодного металла требуются большие усилия, дорогостоящие высокоточ-

ные штампы из износостойких сталей и сплавов, высокоточное оборудование и точно равная по объему поковке исходная заготовка.

Наиболее широко распространена в машиностроении *горячая объемная штамповка* заготовок. По сравнению с ковкой она имеет следующие преимущества: позволяет получать более точную поковку с меньшими припусками, ее производительность высока. Возможна полная механизация и автоматизация производства.

Горячей объемной штамповкой изготавливают заготовки в виде поволок различной конфигурации и размеров из различных сплавов для ответственных деталей автомобилей, двигателей внутреннего сгорания, тракторов, сельскохозяйственных машин, железнодорожных вагонов, станков, самолетов, приборов и т.д. Масса поволок составляет от нескольких десятков граммов до 500 кг, в отдельных случаях до 3 т.

Характер течения металла в процессе горячей объемной штамповки определяется типом штампа, в зависимости от которого различают *штамповку в открытых и закрытых штампах*.

В зависимости от типа применяемого оборудования штампованные заготовки бывают молотовые, получаемые на штамповочных молотах, и прессовые, получаемые на механических кривошипных и гидравлических прессах.

*Штамповка в открытых штампах* (рис.1.1, а) характеризуется наличием зазора между подвижной и неподвижной половинами штампа по плоскости их разъема, называемого *заусеничной канавкой*.

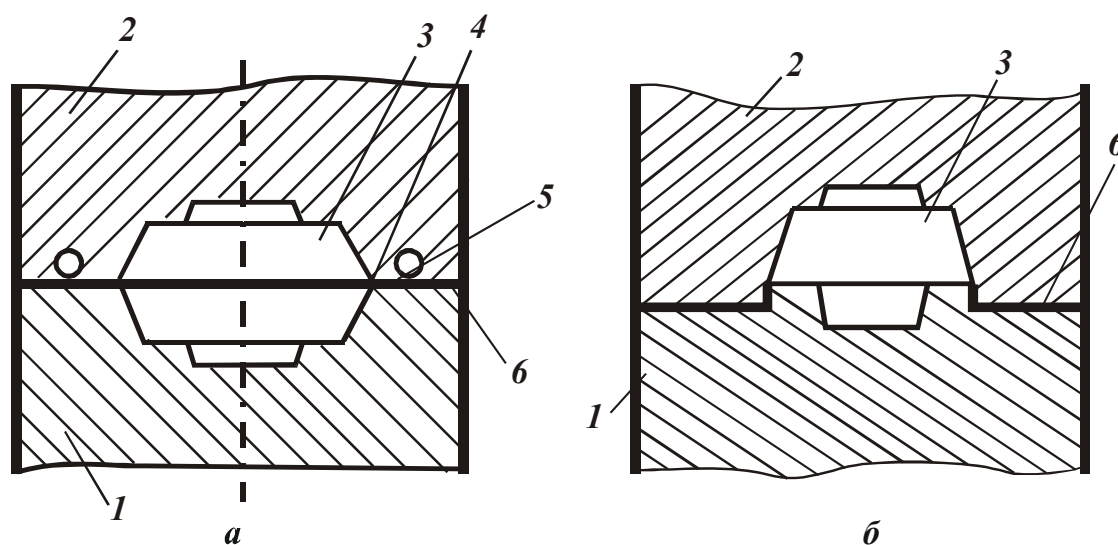


Рис.1.1. Схема штамповки в открытых (а) и закрытых (б) штампах: 1 – нижняя (неподвижная) половина штампа; 2 – верхняя (подвижная) половина штампа; 3 – поковка; 4 – заусенец (облой); 5 – заусеничная канавка; 6 – плоскость разъема штампа.

В нее в конечный момент штамповки при полном смыкании половин штампа выжимаются в виде заусенца (облоя) излишки металла из полости штампа. Это способствует полному заполнению полости штампа металлом и не требуется, чтобы объем исходной заготовки точно соответствовал объему готовой поковки. Образующийся на поковке заусенец (облой) обрезают затем в специальных обрезных штампах. Штамповка в открытых штампах является высокопроизводительным простым процессом, и с ее помощью получают поковки самых разных видов (рис. 1.2), в том числе со сквозным отверстием (на рис. 1.2 не показаны).

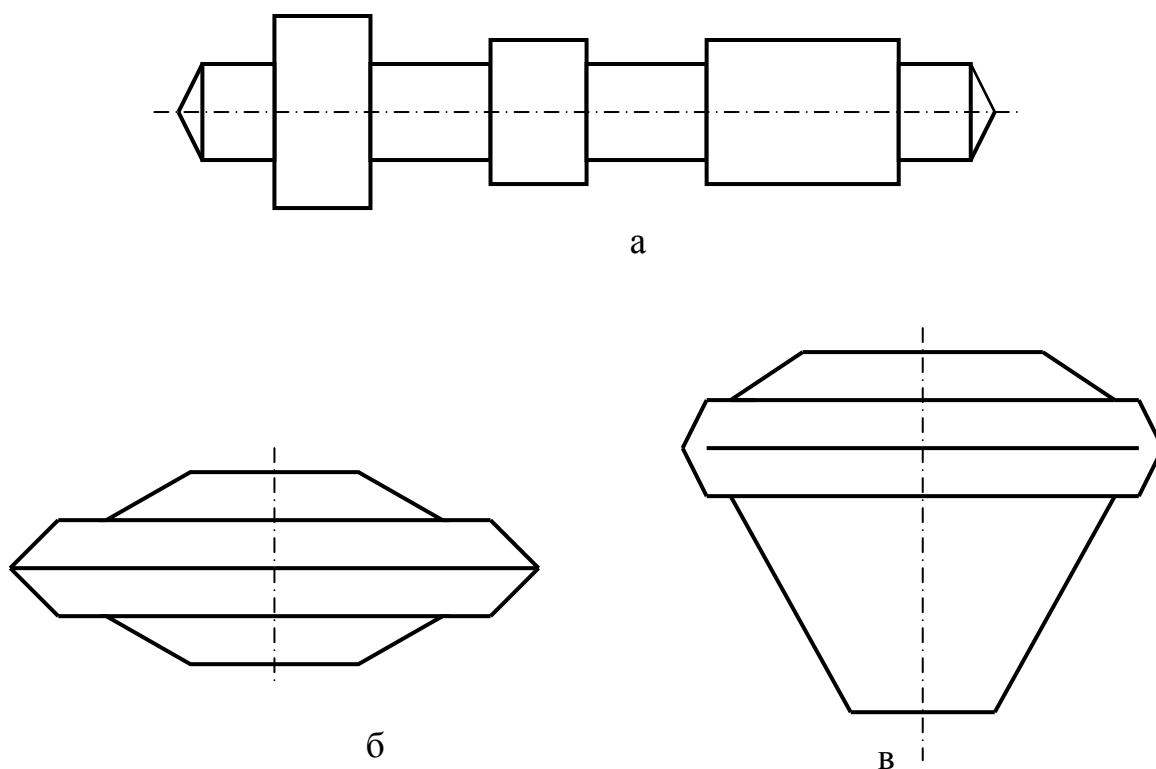


Рис. 1.2. Виды штампованных поковок: удлиненной формы с большим отношением длины к ширине (а); – круглые, квадратные или прямоугольные в плане и небольшой высоты (б, в).

*Штамповка в закрытых* штампах характеризуется тем, что полость штампа в процессе деформирования остается закрытой. Зазор между подвижной и неподвижной частями штампа принимают постоянным и небольшого сечения, вследствие чего заусенец в нем образовываться не может. Устройство таких штампов зависит от типа штамповочного оборудования и сложности внешней формы поковки. Так, при штамповке на штамповочных молотах у нижней половины штампа (неподвижной) делают выступ, а у верхней (подвижной) – полость (рис. 1.1, б). При штамповке на прессах – наоборот, штамп может иметь не одну, а две взаимноперпендикулярные плоскости



разъема, т.е. состоять из трех частей.

При штамповке в закрытых штампах необходимо, чтобы обязательно были равны объемы металла исходной заготовки и готовой поковки. При недостаточном количестве металла заготовки полость штампа полностью не заполняется и получается *недоштамповка* в виде недозаполненных углов поковки, а при избыточном количестве металла не получаются необходимые размеры, так как высота поковки будет больше требуемой. Поэтому штамповка в закрытых штампах усложняется по сравнению со штамповкой в открытых штампах и требует высокой точности исходной заготовки. Штамповкой в закрытых штампах получают обычно не сложные поковки небольшой длины и высоты (рис. 1.1, б). Преимущества штамповки в закрытых штампах следующие: уменьшение расхода металла из-за отсутствия заусенца; улучшение микроструктуры поковки, так как *волокна* текстуры поковки обтекают контур поковки и не перерезываются в местах выхода металла в заусенец. Благодаря деформированию металла в условиях всестороннего неравномерного сжатия можно получать большие степени деформирования и штамповать малопластичные сплавы.

Поковки простой конфигурации с небольшой разницей длины и высоты (рис. 1.2, б) обычно штампуют в штампах с одной полостью, т.е. в одноручьевых штампах. Поковки сложной конфигурации с резким изменением сечений по длине, с изогнутой осью (рис.1.2, а) штамповать в одноручьевом штампе из заготовок, отрезанных из проката постоянного профиля (прутка, бруска и т.д.) невозможно или неэкономично, так как велики отходы металла в заусенец. В этом случае форму заготовки необходимо приблизить к форме поковки, т.е. необходимо получить профилированную или фасонную заготовку. Такую заготовку получают ковкой, вальцовкой, периодической прокаткой или в *заготовительных ручьях штампов*. Наиболее целесообразно применение фасонных заготовок из периодического проката, на котором периодически появляются элементы профиля, приближающиеся к профилю штампованной поковки.

Получать *фасонную заготовку* из круглого или квадратного проката можно *вальцовкой на ковочных вальцах* непосредственно перед штамповкой, один раз нагрев заготовку. Вальцовка по существу является продольной прокаткой, так как осуществляется между двумя валками с закрепленными на них секторными штампами.

Чаще всего фасонную заготовку получают в заготовительных

ручьях штампов: либо в одном многоручьевом штампе, либо в нескольких одноручьевых, установленных на отдельных штамповочных машинах.

Наиболее распространенными дефектами поковки являются трещины, коробление, несоответствие размеров требуемым, дефекты структуры и свойств металла. Чаще всего их можно предотвратить правильным проектированием технологии их изготовления.

Технологический процесс получения поковки разрабатывают на основе чертежа детали. Одним из документов, разрабатываемых для технологического процесса штамповки является чертеж поковки, на основе которого выполняют чертеж штампов и другой оснастки.

*Разработка чертежа поковки*, изготавливаемой горячей объемной штамповкой на молотах и прессах, включает в себя следующие этапы: определение класса точности, группы стали и степени сложности поковки, определение массы поковки; выбор поверхности разъема штампа и положения поковки в штампе; определение припусков на механическую обработку; определение кузнечных напусков (штамповочных уклонов, радиусов закруглений, формы и размеров наметок отверстий и перемычек под прошивку); определение допустимых отклонений размеров и формы поковки, а также размеров остатков заусенцев; оформление чертежа поковки.

Деталь, получаемая из поковки, должна быть технологически рациональной. Поэтому при проектировании детали, изготавливаемой из поковки, конструктору необходимо учитывать особенности штамповки. При проектировании детали прежде всего необходимо представить и определить как будет происходить разъем штампа, позволяющий свободно извлекать из него штамповку. От плоскости разъема штампа будут зависеть и такие элементы конструкции детали, как углы наклона стенок, радиусы закруглений и т.д. При проектировании детали следует стремиться к возможно меньшей разнице площадей поперечных сечений на различных участках длины детали, избегать тонких стенок, высоких ребер, фланцев, длинных отростков и тонких приливов, примыкающих к плоскости разъема. Необходимо также в каждом случае предусмотреть возможность получения сварно-штамповочных деталей с целью сокращения расхода металла.

При проектировании технологии изготовления поковки прежде всего устанавливают *исходный индекс поковки*, определяемый ее массой, маркой сплава, степенью сложности и классом точности.

*Класс точности поковки* задается техническими условиями (ТУ)

или определяется по табл. 1.2. *Группа стали* зависит от ее химического состава: сталь с массовой долей углерода до 0,35% или суммарной массовой долей легирующих элементов до 2% относится к группе М1, с массовой долей углерода свыше 0,35% и до 0,65% или массовой долей легирующих элементов свыше 2% до 5% - к группе М2, а с массовой долей углерода свыше 0,65% или массовой долей легирующих элементов свыше 5% - к группе М3.

*По степени сложности* поковки разделяют на группы С1, С2, С3, С4. Степень сложности поковки (С) определяется отношением массы (объема) поковки  $G_n$  к массе (объему) фигуры  $G_\phi$ , в которую вписывается поковка и которая может быть шаром, прямой правильной призмой, цилиндром или параллелепипедом. При  $G_n / G_\phi > 0,63$  степень сложности принимается С1,  $G_n / G_\phi = 0,63 \dots 0,32$  - С2;  $G_n / G_\phi = 0,32 \dots 0,16$  - С3;  $G_n / G_\phi = 0,16$  - С4. Поковки типа тонких дисков, фланцев, колец при отношении их высоты к диаметру менее 0,2 также относятся к группе сложности С4.

К группам сложности С1 и С2 относятся поковки простой формы без отверстий, больших выступов, переходов, например: простые валики и валы малой длины, простые фланцы, диски, прямоугольные поковки и т.д.

Таблица 1.2

Рекомендуемые классы точности поковок

Основное деформирующее оборудование, технологические процессы	Класс точности				
	T1	T2	T3	T4	T5
Кривошипные горячештамповочные прессы:					
открытая облойная штамповка				+	+
закрытая штамповка		+	+		
выдавливание			+	+	
Горизонтально-ковочные машины				+	+
Прессы винтовые, гидравлические				+	+
Горячештамповочные автоматы		+	+		
Штамповочные молоты				+	+
Калибровка объемная (горячая и холодная)	+	+			
Прецизионная штамповка	+				

К группам повышенной сложности С3 и С4 относятся сложные поковки типа дисков, фланцев, рычагов с бобышками, выступами, имеющие отверстие, изогнутые рычаги, кулачки, распределительные валики, коленчатые валы, диски малой толщины с переменным профилем. После определения группы стали, степени сложности и класса

точности поковки устанавливают ее исходный индекс. Например: поковка массой 1 кг, группы стали МЗ, степени сложности С2 и класса точности Т1 имеет исходный индекс 7 [132].

Расчетную массу поковки определяют по формуле [132, с.191]

$$M_n = M_d \cdot K_p, \quad (1.1)$$

где  $M_n$ ,  $M_d$  - массы поковки и готовой детали, кг;  $K_p$  - расчетный коэффициент, учитывающий отход металла в стружку при механической обработке (табл.1.3).

Таблица 1.3

Коэффициент  $K_p$  для определения ориентировочной расчетной массы поковки [132, с.191]

Группа и подгруппа	Характеристика детали	Типовые представители	$K_p$
1	Удлиненной формы		
1.1	С прямой осью	Валы, оси, цапфы, шатуны	1,3-1,6
1.2	С изогнутой осью	Рычаги, сошки рулевого управления	1,1-1,4
2	Круглые и многогранные в плане		
2.1	Круглые	Шестерни, ступицы, фланцы	1,5-1,8
2.2	Квадратные, прямоугольные, многогранные	Фланцы, ступицы, гайки	1,3-1,7
2.3	С отрезками	Крестовины, вилки	1,4-1,6
3	Комбинированной формы (сочетающие элементы групп 1 и 2-й конфигурации)	Поворотные кулаки, коленчатые валы	1,3-1,8
4	С большим числом необрабатываемых поверхностей	Балки передних осей, рычаги переключения коробок передач, крюки	1,1-1,3
5	С отверстиями, углублениями, поднутрениями, невыполняемые в поковке при штамповке	Полые валы, фланцы, блоки шестерен	1,8-2,2

По найденной массе поковки разрабатывают чертеж поковки, после чего ее массу уточняют по разработанному чертежу поковки. При этом, если рассчитанная по чертежу масса поковки отличается от определенной по формуле (1.1) более чем на 20%, то корректируют припуски и допуски на поковку. В массу поковки не входит та ее

часть, которая не подвергается деформированию, а также облой.

*Поверхность разъема штампа* назначают на основании чертежа детали по следующим правилам: поверхность разъема штампа (РШ) должна быть такой, чтобы можно было обеспечить свободное извлечение поковки из штампа; штамповочные ручки должны иметь наименьшую глубину и ширину, для чего разъем штампа нужно выполнять в направлении двух наибольших габаритных размеров детали. Отступить от указанного правила можно в тех случаях, когда иное положение поковки в штампе приводит к снижению припусков и напусков и экономии металла. Так, например, полые и сплошные поковки в виде тел вращения небольшой высоты целесообразно располагать при штамповке вертикально. Такое положение поковок в штампе позволяет увеличить производительность штамповки, уменьшить припуски на штамповочные уклоны и износ штампа.

Трудно изготавливаемые части поковок (высокие тонкие ребра, выступы, бобышки и т.п.) следует располагать в верхней половине штампа, так как полость в верхнем штампе заполняется легче, чем в нижнем. Разъем штампа следует выполнять так, чтобы контур поковки по поверхности (плоскости) разъема штампа был одинаковым, и чтобы к плоскости разъема примыкали вертикальные поверхности поковки (с уклонами), а не горизонтальные и наклонные. Это позволяет контролировать смещение (перекос) поковок по поверхности разъема штампа вследствие сдвига одной его части относительно другой после обрезания заусенца.

Основные припуски на механическую обработку определяют по ГОСТ 7505-89 в зависимости от исходного индекса, линейных размеров и параметра шероховатости поверхности детали.

Припуски назначают на сторону на номинальные размеры поковки. При нагревании заготовок в пламенных печах допускается увеличение припуска на обработку для поковок класса точности Т5 массой до 3,2 кг – до 0,5 мм, свыше 3,2 до 10,0 кг – 0,8 мм, свыше 10,0 кг – 1 мм. Дополнительные припуски, учитывающие смещение, изогнутость, отклонения от плоскости и т.п., определяют, исходя из формы поковки и технологии ее изготовления (по ГОСТ 7505-89).

К кузнечным напускам относятся штамповочные уклоны, радиусы закруглений, перемычки под прошивку и наметки отверстий, углубления и впадины на наружных боковых поверхностях, дополняющие основные припуски на механическую обработку.

Штамповочные уклоны следует устанавливать на всех поверхно-

стях, располагающихся перпендикулярно к поверхности разъема штампа. Значения уклонов (в градусах) в соответствии с ГОСТ 7505-89 назначают следующие: внутренних поверхностей молотовых поковок ( $\alpha$ ) – 10, прессовых ( $\alpha$ ) – 7, получаемых на горячештамповочных автоматах – 2; наружных поверхностей молотовых поковок ( $\alpha$ ) – 7, прессовых ( $\alpha$ ) – 5, получаемых на горячештамповочных автоматах – 1.

Минимальные радиусы закруглений наружных поверхностей поковок  $R$  назначаются по табл. 1.4. Радиусы закруглений внутренних поверхностей поковок назначаются в 3-4 раза больше определяемых по табл. 1.4 радиусов  $R$  закругленных внешних поверхностей поковок.

Штамповкой путем осадки в торец заготовки нельзя сразу получить отверстие в поковке. Поэтому сначала штампуют поковку с двумя противоположными углублениями, называемыми *наметками*, с перемычкой (пленкой) между ними.

Таблица 1.4

Радиусы  $R$  закруглений внешних поверхностей

Масса поковки, кг	Минимальный радиус $R$ , мм, при глубине полости ручья штампа, мм			
	До 10	10–25	25–50	Св.50
До 1,0	1,0	1,6	2,0	3,0
1,0... 6,3	1,6	2,0	2,5	3,6
6,3...16,0	2,0	2,5	3,0	4,0
16,0...40,0	2,5	3,0	4,0	5,0
40,0...100,0	3,0	4,0	5,0	7,0
100,0...250,0	4,0	5,0	6,0	8,0

После получения поковки перемычку удаляют прошивкой или просечкой в специальных штампах или сверлением на сверлильных станках. Перемычки бывают плоскими, если отношение диаметра к высоте поковки более единицы. Их удаляют прошивкой. При отношении диаметра к высоте поковки менее единицы штампуют глухие отверстия с глухими наметками и толстой перемычкой, которую удаляют затем сверлением.

*Отверстия* или углубления в поковках, изготавливаемых на прессах и молотах, выполняют в тех случаях, когда их оси совпадают с направлением движения одной из подвижных частей штампа, а их поперечный размер или диаметр больше высоты поковки или равны ей,

но не менее 30 мм. Отверстия делают глубиной не более 0,8 их диаметра. Толщину плоских перемычек принимают равной 0,1 – 0,2 диаметра отверстия [132].

Объемной штамповкой нельзя получить точные размеры поковки, определяемые ее чертежом, путем суммирования размеров детали, припусков и напусков. Действительные размеры поковки всегда отличаются от размеров поковки, определяемых ее чертежом, но их отклонения от чертежных размеров не должны превышать определенного значения (допуска), определяемого по ГОСТ 7565 – 89.

Чертеж поковки с техническими требованиями должен содержать все данные, необходимые для ее изготовления и контроля.

**Пример** [132]. Деталь – шестерня. Штамповочное оборудование – механический пресс. Нагрев заготовки – индукционный.

Данные по детали. Материал – сталь 45ХН2МФА (по ГОСТ 4543). Химический состав, %: 0,42 – 0,50 С; 0,17 – 0,37 Si; 0,5 – 0,8 Mn; 0,8 – 1,1 Cr; 1,3 – 1,8 Ni; 0,2 – 0,3 Mo; 0,10 – 0,18V; масса – 1,83 кг.

Исходные данные для расчета. Расчетный коэффициент для расчета массы – 1,8; класс точности – Т3; группа стали – М2; степень сложности – С1 (масса описываемой фигуры  $G_{\phi} = 4,55$  кг, масса поковки  $G_n = 1,8 \cdot 1,83 \approx 3,3$  кг,  $G_n/G_{\phi} = 0,72$ ); конфигурация поверхности разъема штампа П (плоская); исходный индекс – 10.

*Основные припуски* по ГОСТ 7505-89: на диаметр 127,8 мм – 1,6 мм; на 36 мм – 1,4 мм; на толщину 28 мм – 1,5 мм. *Дополнительные припуски*: на смещение поверхности разъема штампа (по ГОСТ 7505 – 89) – 0,3 мм; на отклонение от плоскостности – 0,3 мм. Штамповочные уклоны: на наружной поверхности – 5 градусов, на внутренней поверхности – 7 градусов. Основные размеры поковки и их отклонения по ГОСТ 7505 – 89: диаметр 127,8 –  $132_{-0,7}^{+1,3}$ ; диаметр 36 –  $32_{-0,9}^{+0,5}$ ; толщина 39 –  $42,5_{-0,5}^{+1,1}$ ; толщина 28 –  $31,5_{-0,5}^{+1,1}$ ; допустимая величина остаточного облоя – 0,7 мм; допустимое отклонение от плоскостности – 0,6 мм; допустимое отклонение по поверхности разъема штампа – 0,6 мм; высота заусенца – 3 мм.

## 1.2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Сварка диффузионная производится в цехе химико-термической обработки (ХТО). Например, бронзовый стержень 1 сдавлируется с

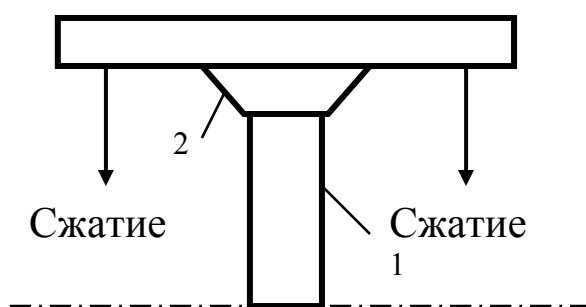


Рис.1.3. Схема сжатия свариваемых деталей в приспособлении (показана верхняя половина).

двумя стальными полусферами 2 в специальном приспособлении (100x100x100 мм) типа «объемная струбцина» (рис.1.3). Затем связка начиненных деталями приспособлений помещается в печь. Через 1-2 минуты запускается таймер отсчета времени (одновременно зажигается сигнальная лампа). Через 10-15 мин по сигналу таймера

включается звонок (одновременно мигает сигнальная лампа), что является сигналом рабочему вынимать разогретую связку приспособлений из печи. Связку помещают в разогретое масло (охлаждение маслом в вытяжном шкафу), а затем на стол, где она охлаждается до температуры воздуха в цехе. После разборки приспособления получают «составную» деталь, содержащую разнородные материалы (бронзу и сталь). Впереди остается механическая обработка стальных головок составной детали, где будет сформирована, например, сферическая внутренняя поверхность.



## ГЛАВА 2

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Исходными данными для проектирования технологии изготовления детали прежде всего являются её чертеж (на бумажном или электронном носителе) и программа выпуска изделий [237]. Дополнительными данными могут быть также результаты анализа действующего, а также типового или группового технологических процессов (соответственно, при совершенствовании имеющегося процесса и при разработке нового).

При изучении действующего технологического процесса и его анализе особое внимание должно быть обращено на качество выпускаемых изделий. В частности, необходимо установить причины брака по операциям и соответствие изготавливаемых деталей требованиям чертежа и технических условий. Тщательный анализ действующего технологического процесса, выявление присущих ему недостатков и преимуществ, позволяет спроектировать новый технологический процесс, свободный от недостатков действующего технологического процесса при использовании его преимуществ и достоинств.

Рекомендуется также изучение действующих и вновь проектируемых технологических процессов обработки данной детали на разных предприятиях (выпускающих аналогичную продукцию) в Украине и за рубежом. В процессе изучения действующего технологического процесса рекомендуется сравнивать его с описанными в литературных источниках технологическими процессами обработки данной (или аналогичной) детали.

В процессе анализа изучается метод получения заготовки, её точность и степень соответствия размеров и формы размерам и форме обрабатываемой детали. Анализируется влияние метода получения заготовки и ее точности на изменение последовательности или сокращение числа операций (или переходов) механической обработки детали. Изучению подлежит также термическая обработка, которой подвергается заготовка (отжиг, нормализация, естественное или искусственное старение и т.п.).

При анализе действующего технологического процесса механической обработки детали изучается последовательность операций техпроцесса, разбивка операций на черновые, чистовые и отделочные. Рассматриваются методы, применяемые в действующем техпро-

цессе, для обеспечения заданной точности размеров детали. Необходимо установить насколько соответствует действующий техпроцесс программе выпуска деталей, насколько он обеспечивает заданную производительность обработки. Нужно дать характеристику применяемого металлорежущего оборудования, обращая внимание на уровень механизации и автоматизации действующего технологического процесса.

Изучаемый действующий технологический процесс необходимо характеризовать с точки зрения дифференциации и концентрации операций.

Далее рассматривается применяемая технологическая оснастка:

- а) станочные приспособления, степень их специализации, уровень механизации и автоматизации;
- б) режущий инструмент, его типаж, процент использования стандартных и специальных инструментов, степень сложности конструкций инструмента, материал режущей части (особо проанализировать применение инструментов, оснащенных твердым сплавом, изготовленных из инструментальных сталей новых марок в т.п.);
- в) применяемый вспомогательный инструмент необходимо характеризовать с точки зрения совершенства его конструкции, скорости и надежности смены и закрепления режущего инструмента, точности и скорости замены и настройки режущего инструмента;
- г) применяемый контрольно-измерительный инструмент характеризуется степенью использования специальных или универсальных калибров и контрольных приспособлений, а также уровнем автоматизации (компьютеризации) контрольных операций.

Далее дается анализ действующего технологического процесса с точки зрения выбора черновых баз, их влияния на последовательность обработки; рассматривается принятая система базирования. Анализируются припуски на обработку с точки зрения соответствия их нормативам и стандартам. Рекомендуются выборочная проверка принятых припусков путём их расчета. При несоответствии принятых и рассчитанных припусков необходимо выяснять причину.

Аналогичным образом анализируются межоперационные размеры и допуски на обработку, а также режимы резания, которые рекомендуется выборочно проверять расчетом. Далее анализируются затраты основного и вспомогательного времени на обработку. Наконец, действующий технологический процесс необходимо охарактеризо-

вать с точки зрения использования в нём типовых и групповых тех-процессов.

## **2.1. ВЫБОР ТИПА И ОРГАНИЗАЦИОННОЙ ФОРМЫ ПРОИЗВОДСТВА**

Тип (мелко-, средне-, крупносерийное и массовое производство) и организационная форма производства оказывают решающее влияние на проектирование технологических процессов и систем. Вместе с тем этот вопрос достаточно подробно рассмотрен в технологической литературе.

## **2.2. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛИ (ИЗДЕЛИЯ)**

Понятие "технологичность конструкции изделия" (ТКИ) предусматривает такое проектирование, которое при соблюдении всех эксплуатационных качеств этого изделия обеспечивает минимальную себестоимость его изготовления, минимальную трудо- и материалоемкость, а также возможность применения современных высокопроизводительных методов обработки и сборки.

Отработка конструкции изделия на технологичность является *непрерывным процессом*, который начинается во время проектирования изделия, продолжается при проектировании технологического процесса изготовления изделия и заканчивается во время изготовления опытных образцов и серий изделия.

Задачи, решаемые технологичностью конструкций, можно разделить на три основные группы: конструктивные, технологические и эксплуатационные.

Каждая группа имеет ряд вопросов по части технологичности конструкций [237].

### **1. Конструктивные**

- 1.1. Выбор принципиальной схемы, обеспечивающей простоту компоновки изделия (узла).
- 1.2. Простота конструктивных решений узлов, агрегатов и их сборки.
- 1.3. Расчленение изделий на части, обеспечивающее удобство подхода, монтажа и регулировки, а также (что особенно важ-

но) возможность параллельной независимой сборки.

- 1.4. Уменьшение количества различных наименований деталей.
- 1.5. Выбор простейших геометрических форм деталей.
- 1.6. Рациональный выбор материалов.
- 1.7. Назначение заготовок, обеспечивающих наименьший расход материала и минимальные затраты на обработку.
- 1.8. Обоснование выбора баз и системы простановки размеров.
- 1.9. Обоснованное назначение шероховатости обрабатываемых поверхностей, допусков на сборочные размеры и размеры деталей.
- 1.10. Обеспечение экономически целесообразной взаимозаменяемости деталей, узлов и агрегатов.
- 1.11. Унификация материалов, деталей и их элементов, узлов и агрегатов.

## 2. Технологические

- 2.1. Сокращение сроков подготовки производства и освоения изделия при заданном объеме выпуска.
- 2.2. Использование современных, наиболее производительных технологических процессов обработки и сборки.
- 2.3. Обеспечение заданной точности изготовления деталей, сборки узлов и всего изделия в целом в соответствии с техническими требованиями.
- 2.4. Минимальный расход материалов.
- 2.5. Обеспечение высокого качества продукции.
- 2.6. Выбор рациональных методов и средств контроля.
- 2.7. Максимальное использование типовых и групповых технологических процессов изготовления и сборки деталей с использованием (при необходимости) переналаживаемых оснастки и оборудования.

## 3. Эксплуатационные

- 3.1. Обеспечение надежности и долговечности изделия.
- 3.2. Стабильность и устойчивость эксплуатационных качеств.
- 3.3. Простота в обслуживании изделия при эксплуатации.
- 3.4. Простота ремонта изделия.
- 3.5. Сокращение количества запасных частей.
- 3.6. Обеспечение малого веса изделий.

При отработке конструкции (изделия, узла или детали) на технологичность следует руководствоваться следующими соображениями [237].

1. Технологичность конструкции в значительной степени зависит от масштаба выпуска и типа производства (массовое, крупносерийное, серийное, периодическое серийное и мелкосерийное).

Масштаб выпуска и серийность во многом определяют целесообразность тех или иных рациональных технологических методов изготовления изделия.

Конструкция изделия, высокотехнологичная для одного масштаба выпуска и серийности, может оказаться не технологичной для другого масштаба выпуска. Опыт показал, что в случае перехода от меньшего масштаба выпуска к большему конструкция подвергается значительным изменениям, а подчас – и коренной переработке. Степень использования прогрессивных технологических методов для серийного производства будет значительно меньше, чем для крупносерийного с большим масштабом выпуска.

2. Технологичность конструкции должна рассматриваться относительно всего изделия в целом. Улучшение технологичности отдельно взятых деталей или узлов без взаимосвязи с требованиями технологичности всего изделия может привести к нежелательным последствиям.

3. Технологичность конструкции необходимо рассматривать как комплексное решение задачи, учитывающее требования ко всем составным частям производственного процесса изготовления, начиная от образования заготовки и обработки деталей и кончая сборкой и испытанием готового изделия.

Применительно к учебному процессу следует отметить, что, например, студент-дипломник, на преддипломной практике, должен проанализировать значительную часть вопросов, связанных с ТКИ. Только на заводе, в тесном контакте с ведущими специалистами (конструктором, технологом) можно квалифицированно решить вопросы ТКИ. Там же на практике студент должен разработать предпосылки по совершенствованию технологического процесса обработки детали (сборки, узла или изделия) с целью обеспечения ТКИ. Затем исследовать возможность реализации этих предпосылок (после практики) по мере более глубокой проработки материалов практики с руководителем проекта (во время дипломного проектирования).

При выполнении анализа ТКИ необходимо обращать внимание на следующее.

## I. По технологичности деталей в связи со сборкой.

1. Количество деталей в изделии (узле) должно быть наименьшим. Это достигается выбором простой и рациональной схемы узла, объединением нескольких деталей в одну (сварной узел, состоящий из нескольких деталей, может быть заменен литой конструкцией).
2. Сборка узлов изделия должна производиться независимо и параллельно. На общую сборку узлы должны поступать полностью собранными и проверенными (для уменьшения объема работ по общей сборке). Собранные узлы должны быть проверены в условиях, близких к условиям их работы в изделии. Конструкция узлов должна быть такой, чтобы при их регулировке и установке на изделии не требовалась даже частичная разборка.
3. Сборка должна быть удобной, места сборки должны быть доступными. На деталях следует предусматривать заходные фаски, заходные части (при прессовых посадках), средства для предотвращения проворачивания болта при затяжке и т.д. Кроме этого, при сборке перемещение деталей по участкам с неподвижной посадкой должно быть минимальным, а установка деталей на разные посадочные поверхности должна последовательной.
4. При сборке не допускается механическая обработка или она должна быть минимальной.
5. При сборке должен обеспечиваться наиболее высокий уровень взаимозаменяемости деталей и узлов.
6. Конструкция изделия (узла) должна обеспечивать возможность автоматизации и максимальной механизации процесса сборки.

II. По технологичности механически обрабатываемых деталей. Поскольку технологичность конструкций механически обрабатываемых деталей обуславливается рациональным выбором заготовки, технологичностью формы детали, рациональной простановкой размеров и назначением оптимальной точности размеров и шероховатостей поверхностей, необходимо провести анализ ТКИ по указанным направлениям. А именно, посмотреть в литературе рекомендации по: рациональному выбору заготовки, технологичности формы детали, простановке размеров, экономической точности обработки на различном оборудовании, взаимной связи классов точности и шероховатости поверхности.

## III. По технологичности литых деталей.

Технологичной конструкцией литых деталей является такая, ко-

торая позволяет с помощью недорогой оснастки быстро и дешево изготавливать отливку, относительно точную по форме и высокую по качеству.

#### IV. По технологичности горячештампующих деталей.

Технологические требования, предъявляемые к конструкции деталей, изготавливаемых свободной ковкой и горячей штамповкой, различны. Так, свободной ковкой можно получить заготовку любого веса и простой конфигурации при сравнительно низком качестве и низкой точности поверхности, а штамповкой – весом до 1-2 т и сложной конфигурации при высоком качестве и высокой точности поверхности.

Свободная ковка рентабельна для единичного и мелкосерийного производства, штамповка – для мелкосерийного, крупносерийного и массового производства. Уже при серии в несколько десятков штук в месяц штамповка может быть рентабельнее свободнойковки.

Чтобы решить, на каком методе остановиться, следует выполнять сравнительный технико-экономический анализ, учитывающий стоимость материала и изготовления заготовки, стоимость механической обработки, которая будет различна для заготовок, полученных разными методами и на различном оборудовании. Предпочтительным будет тот вариант, при котором себестоимость будет меньше. При проведении анализа технологичности горячештампующих деталей следует руководствоваться следующими стандартами: ГОСТ 7062-90 [68], ГОСТ 7505-89 [67].

### **2.3. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ЗАГОТОВКИ**

Выбор заготовки и способа ее получения является одной из ответственных задач разработки технологического процесса изготовления детали. Правильный выбор заготовки ведет к экономии металла, обеспечивает возможность применения наиболее рационального технологического процесса механической обработки детали, снижает потребность в металлорежущих станках, способствует сокращению производственных площадей, занятых оборудованием; уменьшает расход режущего инструмента, снижает трудоемкость механической обработки и, следовательно, ведет к снижению себестоимости изготовления детали [237]. Поэтому при выборе заготовок следует всегда стремиться к максимальному приближению заготовки по формам, размерам и качеству поверхности к готовой детали при одновремен-

ном сокращении отходов.

Способ получения заготовки устанавливают на основе изучения чертежа готовой детали и технологических условий на ее изготовление. Решающее значение при выборе заготовки имеют такие факторы, как материал, форма, размер и вес готовой детали, производственная программа.

Например, если в чертеже детали указан материал марки Ст.5, I2XН3А, 40X и т.п., то заготовки из этих материалов получают ковкой, штамповкой или непосредственно из проката, если же материалом детали являются литая сталь, чугун, цветные сплавы, то заготовки получают методом литья.

Масштаб производства (или программа выпуска) оказывает влияние на выбор способа получения заготовки. Очевидно, что при единичном или мелкосерийном производстве заготовка может быть получена свободной ковкой, штамповкой в подкладных штампах или литьем в песчаные формы (получаемые ручной формовкой по деревянной модели), т.к. другие способы получения заготовок (штамповка, литье в формы, машинная формовка по металлической модели) не рациональны из-за высокой стоимости оснастки (штампов, металлических моделей и т.п).

При серийном и массовом производстве, особенно если механическая обработка ведется на настроенном оборудовании (автоматы, полуавтоматы, агрегатные станки и т.п.), большую роль играет точность размеров заготовки, так как стабильность припусков на механическую обработку позволяет обеспечивать высокую стойкость инструментов и сокращать простой оборудования.

В массовом производстве следует отдавать предпочтение таким прогрессивным методам получения заготовок, как литье в оболочковые формы, литье по выплавляемым моделям, литье в кокиль, литье под давлением, многоручьевая штамповка, штамповка в закрытых безоблойных штампах, штамповка истечением (выдавливанием), периодическая прокатка, штамповка на горизонтально-ковочной машине (ГКМ), комбинированная штамповка и т.п.

При курсовом и дипломном проектировании следует привести обзор возможных способов получения заготовки для данной детали и выбрать наиболее целесообразный. Выбор оптимального варианта должен быть по возможности обоснован экономическим расчетом, который должен учитывать как стоимость получения заготовки, так и возможную экономию стоимости механической обработки.



Сопоставление различных вариантов получения заготовки может быть произведено сравнением себестоимости каждого из них. Для этого можно воспользоваться методикой упрощенного расчета себестоимости заготовки (параграф 1.1). Экономическое обоснование выбранного способа изготовления заготовки можно осуществить путем сравнения технологической себестоимости различных вариантов. Технологическая себестоимость, т.е. сумма изменяющихся при различных вариантах затрат, включает в себя только важнейшие виды затрат: на материал, на заработную плату производственным рабочим (литейщикам, кузнецам), на оснастку и её эксплуатацию, расходы механического цеха на обработку заготовки по каждому из вариантов. Обязательным условием для сравнения является приведение сопоставляемых вариантов к одинаковому годовому объему выпуска изделий.

В тех случаях, когда отсутствуют необходимые данные для расчета технологической себестоимости, можно использовать заводские данные, а также различные справочные и нормативные материалы в литературных источниках [132, 133, 269, 368, 370, 393]. От принятого способа изготовления заготовки зависят качество её поверхности, величина припусков на механическую обработку и точность размеров изготовления.

Припуски на механическую обработку могут быть определены табличным или расчетно-аналитическим путем. При определении припусков *табличным путем*, а также допускаемых отклонений по размерам и весу заготовок, следует пользоваться соответствующими ГОСТами [65-68].

После установления вида заготовки и класса (группы) её точности разрабатывается чертеж заготовки (на основании чертежа готовой детали). При этом необходимо:

- а) назначить припуски на механическую обработку (например, табличным методом);
- б) выбрать поверхность разъема;
- в) установить штамповочные или литейные уклоны, радиусы закруглений;
- г) решить вопрос о целесообразности получения в заготовке сквозных отверстий;
- д) решить вопросы, связанные с получением полостей в заготовках (разработка конструкции стержней для литых заготовок, определение вида и размеров литых наметок при штамповке и т.д.);

- е) в некоторых случаях решить специальные вопросы конструирования заготовок (например, изменение конструкции заготовки в целях создания удобных установочных баз для механической обработки, упрощение конфигурации детали путем введения напусков, разбивка детали на две и более с последующей их сваркой и т.д.);
- ж) определить размеры заготовки и установить допуски на них (простановка размеров и допусков на размеры заготовок должна производиться с учетом системы базирования при механической обработке заготовки);
- з) по установленным размерам заготовки определить ее вес, а также коэффициент использования материала и заготовки.

Вес заготовки можно определить, пользуясь таблицами для подсчёта веса детали или специальными компьютерными программами в составе САПР. Коэффициенты использования материала  $K_{и.м}$  и заготовки ( $K_{и.з}$ ) определяются, соответственно, по формулам

$$K_{и.м} = \frac{M_{\partial}}{M_{исх.м}}, \quad (2.1)$$

$$K_{и.з} = \frac{M_{\partial}}{M_{заг}}, \quad (2.2)$$

где  $M_{\partial}$  – масса готовой детали;  $M_{исх.м}$  – масса исходного материала для получения заготовки;  $M_{заг}$  – масса заготовки.

В пояснительной записке к проекту дают характеристику материала детали (химический состав, физико-механические свойства и т.п.), краткое описание принятого технологического процесса изготовления заготовки, характера ее термообработки. Разработку технологического процесса получения отливки желательно сопровождать эскизами моделей (с указанием плоскости разъема, контуров стержней и знаков собранной формы). В форме должна быть показана литниковая система, желательно представить её расчёт.

Описание технологического процесса штамповки должно иллюстрироваться эскизами последовательно используемых переходов штамповки, рабочего инструмента (штампов) с приведением необходимых расчетов. Так, например, при штамповке на ГКМ дают расчёты соответствующих переходов. Для поковок, штампуемых на молотах и прессах, производится построение *расчетной заготовки* и её сечений. Для штампованных поковок приводят расчет размеров ис-

ходной заготовки.

После проведения всех расчетов по конструированию заготовки вычерчивают *чертеж заготовки*. Чертеж заготовки оформляется на листе стандартного формата (например, формата А1) предпочтительно в масштабе 1:1 (допускается использование масштабов 1:2 и 2:1). При вычерчивании крупных заготовок в уменьшенном масштабе их сложные сечения следует вычерчивать в масштабе 1:1.

Контуры готовой детали на чертеже заготовки показывают штрих-пунктирными или тонкими сплошными линиями, припуски и напуски штрихуются в сторону, противоположную штриховке разрезов, чтобы выделить металл, удаляемый при механической обработке. На чертеже заготовки должны быть представлены все необходимые размеры, относящиеся к заготовке. На основные и характерные размеры заготовки должны быть проставлены соответствующие допуски.

В технических условиях на изготовление заготовки, помещаемых на чертеже, указывают: класс (группу) точности соответствующего ГОСТа, по которому следует выдерживать не указанные на чертеже допуски на размеры; величины не указанных на чертеже литейных или штамповочных радиусов округлений, уклонов; вид термообработки и твердость; допускаемую величину остаточного заусенца после обрезки облоя; метод очистки поверхности заготовки (дробеструйная обработка, травление и т.д.); глубину допускаемых внешних дефектов (раковин, трещин и т.д.); допускаемые величины коробления, кривизны, смещения по плоскости разъема, эксцентricности отверстий относительно наружного диаметра заготовки и т.д.

При разработке технических условий на заготовку необходимо руководствоваться данными справочной литературы и соответствующих ГОСТов.

В ряде случаев разрабатывают чертеж, отражающий технологию изготовления заготовки. На этом чертеже могут быть изображены литейные формы, многоручьевые штампы и т.п. (с необходимым количеством проекций, разрезов и сечений) [237].

Чем больше программа выпуска деталей, тем важнее требования к выбору заготовки с точки зрения максимального приближения её к окончательно обработанной детали. Поэтому при выборе заготовки учитывают тип производства (мелко- или среднесерийное, массовое). Например, для массового производства в качестве прока-

та применяют горячекатаную сталь периодического профиля или толстостенную трубу.

**Пример.** При выборе заготовок из проката [80], его расчётный диаметр ( $d_{заг.расч}$ ) определяют суммированием наибольшего диаметра детали ( $d_{\delta max}$ ) и общего припуска на этот диаметр ( $2Z_{общ.д}$ ), т.е.

$$d_{заг.расч} = d_{\delta max} + 2Z_{общ.д} \quad (2.3)$$

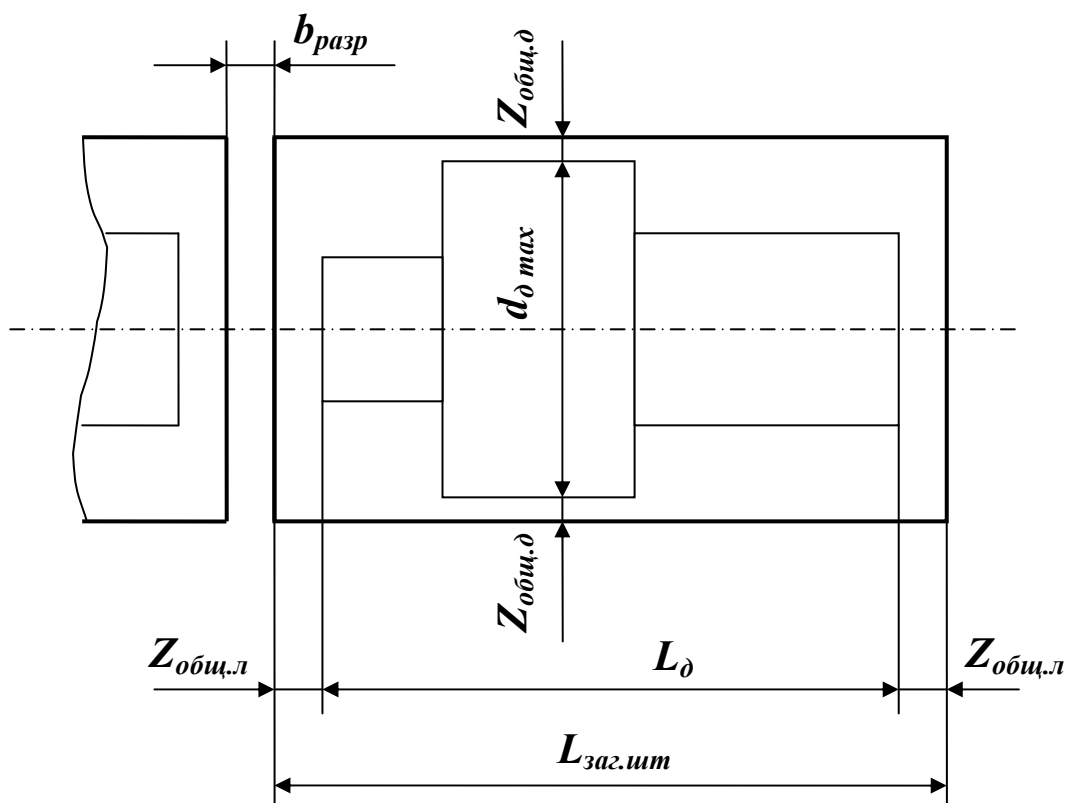


Рис. 2.1. Эскиз заготовки из круглого проката для детали типа „вал ступенчатый”.

Расчётный диаметр ( $d_{заг.расч}$ ) корректируют по сортаменту и определяют допуски на него (ГОСТ 2590-88). Выполняют эскиз части прутка, где наносят контур детали и все необходимые размеры (рис.2.1).

Длину исходной заготовки для одной детали ( $L_{заг.шт}$ ) определяют по формуле (рис.2.1)

$$L_{заг.шт} = L_{\delta} + 2Z_{общ.л} + b_{разр}, \quad (2.4)$$

где  $L_{\delta}$  – длина готовой детали;  $Z_{общ.л}$  – общий припуск на линейный размер (на обработку торца);  $b_{разр}$  – ширина разреза прутка.

Для расчёта нормы расхода материала и коэффициента его ис-

пользования выполняют следующие вычисления [80].

1. Устанавливают величину потерь на зажим заготовки, например, в цанговом патроне ( $L_{зж}$ ), которая зависит от диаметра проката и конструктивных размеров цанги.
2. Определяют число деталей ( $n_{\delta, расч}$ ), которые можно изготовить из одного прутка длиной  $L_{пр}$ , по формуле

$$n_{\delta, расч} = \frac{L_{пр} - l_{зж}}{L_{заг.шт}}. \quad (2.5)$$

Для расчёта принимают целое число деталей ( $n_{\delta}$ ).

3. Определяют длину остатка ( $l_{ост}$ ) из-за некратности длины прутка длине заготовки для одной детали, т.е.

$$l_{ост} = L_{пр} - l_{зж} - L_{заг.шт} \cdot n_{\delta}. \quad (2.6)$$

4. Определяют массу проката ( $M_{заг.шт}$ ), используемого на изготовление одной детали

$$M_{заг.шт} = 0,001 \cdot M_{н.м.} \cdot L_{заг.шт}, \quad (2.7)$$

где  $M_{н.м.}$  – масса погонного метра проката (ГОСТ 2590-88).

5. Находят коэффициент использования материала заготовки ( $K_{и.м}$ ) при механической обработке на станке, т.е.

$$K_{и.м} = \frac{M_{\delta}}{M_{заг.шт}}. \quad (2.8)$$

6. Находят норму расхода материала на изготовление одной детали

$$H_{расх} = \frac{M_{пр}}{n_{\delta}} = \frac{1}{n_{\delta}} \cdot 0,001 \cdot M_{пр} \cdot L_{пр}, \quad (2.9)$$

где  $M_{пр}$  – масса прутка.

7. Общий коэффициент использования материала ( $K_{и.м.общ}$ ) с учётом всех потерь при механической обработке

$$K_{и.м.общ} = \frac{M_{\delta} \cdot n_{\delta}}{M_{пр}}. \quad (2.10)$$

Стоимость заготовки ( $C_{заг.шт}$ ) для одной детали

$$C_{заг.шт} = C_{кг} \cdot H_{расх}, \quad (2.11)$$

где  $C_{кг}$  – цена одного килограмма проката по прейскуранту, грн.

Вместо проката возможно использование поковки штампованной, которая в свою очередь изготавливается из проката. В этом

случае норма расхода материала уменьшится. Это должно привести к уменьшению стоимости заготовки. Однако при этом появляются дополнительные затраты на штамповую оснастку. Необходимо снова определить стоимость заготовки. Окончательно наиболее экономичный вариант выбора заготовки устанавливают с учётом себестоимости всего технологического процесса. Эту работу целесообразно выполнять при помощи компьютерной САПР.

## 2.4. РАЗРАБОТКА МАРШРУТА ОБРАБОТКИ ОТДЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ (МОП)

Разработку МОП производят на основе табличного или расчётного [393] методов. При табличном методе пользуются, например, приведенными ниже данными (табл.2.1 - табл.2.7) [132]. Эти данные относятся к деталям из конструкционных сталей. Для деталей из чугуна параметры шероховатости ( $R_a$ ,  $R_z$ ) можно принимать в 1,5 раза больше табличных.

Таблица 2.1

Возможности методов обработки в обеспечении точности размеров и параметров состояния плоских поверхностей деталей машин

Метод обработки	Квалитет	Параметры состояния поверхностного слоя детали			
		$W_z$ , мкм	$R_a$ , мкм	$S_m$ , мм	$S$ , мм
1	2	3	4	5	6
Торцовое фрезерование					
черновое	12-14	8-25	4,0-16,0	0,16-0,50	0,16-0,50
чистовое	9-11	1,6-10,0	1,0-4,0	0,08-0,20	0,063-0,20
тонкое	6-8	0,40-5,0	0,32-1,25	0,025-0,1	0,016-0,08
Цилиндрическое фрезерование					
черновое	12-14	12,5-60,0	3,2-10,0	1,25-5,0	1,25-5,0
чистовое	9-11	3,0-16,0	0,8-3,2	0,50-2,0	0,32-2,0
тонкое	6-8	0,80-8,0	0,20-1,6	0,16-0,63	0,10-0,63
Торцовое точение					
черновое	12-13	8,0-24,0	6,4-32	0,2-1,25	0,20-1,6
чистовое	9-11	2,5-10,0	1,6-6,4	0,08-0,25	0,063-0,25
тонкое	6-8	0,8-3,0	0,32-1,6	0,025-0,125	0,0125-0,10
Шлифование					
обдирочное	8-9	5,0-12,5	1,6-4,0	0,10-0,32	0,063-0,25
чистовое	6-7	1,6-5,0	0,32-1,6	0,025-0,125	0,0125-0,08
тонкое	5-6	0,63-2,0	0,08-0,32	0,01-0,032	0,005-0,025
плосковершинное	6-8	2,0-16,0	0,32-2,5	0,25-5,0	0,008-0,20

Продолжение табл.2.1

1	2	3	4	5	6
<b>Протягивание</b>					
черновое	7-8	1,25-4,0	1,0-3,2	0,16-2,0	0,125-2,0
чистовое	5-6	0,4-2,5	0,32-1,25	0,05-0,50	0,032-0,50
<b>Шабрение</b>					
черновое	7-8	12,5-20,0	2,5-8,0	0,25-1,0	0,125-1,0
чистовое	5-6	3,0-16,0	0,62-2,5	0,063-0,25	0,032-0,20
тонкое	4-5	1,6-5,0	0,1-0,8	0,02-0,10	0,008-0,05
<b>Накатывание роликами и шариковыми головками</b>					
черновое	8-10	5,0-20	0,63-2,5	0,2-5,0	0,2-5,0
чистовое	5-7	1,25-6,0	0,1-0,83	0,025-0,25	0,02-0,25
вибронакатывание	5-10	1,25-4,0	0,16-2,5	0,025-12,5	0,02-5,0
<b>Суперфиниширование и полирование</b>					
обычное	5-6	0,3-6,0	0,05-0,32	0,01-0,032	0,04-0,025
плосковершинное	6-8	1,6-16,0	0,1-1,25	0,025-1,6	0,006-0,040
<b>Притирка</b>					
обычная	4-6	0,4-0,8	0,02-0,1	0,008-0,04	0,004-0,032
плосковершинная (удаление вершин)	5-7	0,6-1,6	0,02-0,4	0,02-0,25	0,008-0,25

Таблица 2.2

Возможности методов обработки в обеспечении точности размеров и параметров состояния наружных поверхностей вращения деталей машин

Метод обработки	Квалитет	Параметры состояния поверхностного слоя детали			
		$W_z$ , мкм	$R_a$ , мкм	$S_m$ , мм	$S$ , мм
1	2	3	4	5	6
<b>Обтачивание</b>					
черновое	12-14	6,25-13,0	12-40	0,32-1,25	0,32-1,25
получистовое	10-12	3,2-10,0	2,0-16	0,16-0,40	0,12-0,40
чистовое	8-10	1,6-4,0	0,8-2,5	0,08-0,16	0,05-0,16
<b>Шлифование</b>					
обдирочное	8-9	3,2-10,0	1,0-2,5	0,063-0,2	0,032-0,16
чистовое	6-7	0,5-4,0	0,2-1,25	0,025-0,1	0,01-0,08
тонкое	5-6	0,16-0,8	0,05-0,25	0,008-0,025	0,003-0,016
плосковершинное	6-8	0,5-10,0	0,32-2,5	0,063-1,25	0,008-0,16
<b>Суперфиниширование</b>					
обычное	4-6	0,08-0,5	0,032-0,25	0,006-0,02	0,003-0,016
плосковершинное	6-8	0,75-2,5	0,25-2,0	0,05-1,25	0,006-0,16
<b>Полирование</b>					
обычное	5-6	0,16-0,75	0,008-0,08	0,008-0,025	0,002-0,008

Продолжение табл.2.2

1	2	3	4	5	6
плосковершинное	6-8	0,4-0,9	0,10-0,80	0,032-0,2	0,016-0,2
Притирка					
обычная	4-6	0,08-0,1	0,01-0,10	0,006-0,04	0,002-0,032
плосковершинная	5-7	0,4-0,8	0,10-0,80	0,032-0,2	0,032-0,2
Обкатывание					
черновое	8-10	2,5-12,5	0,8-2,5	0,2-1,25	0,2-1,25
чистовое	5-7	0,4-2,5	0,05-1,0	0,025-0,2	0,025-0,2
Выглаживание	5-9	0,4-10,0	0,05-2,0	0,025-1,25	0,025-1,25
Вибронакатывание	5-9	0,5-13,2	0,063-1,6	0,01-10,5	0,008-0,8
Электромеханическая	5-7	0,4-0,8	0,02-1,6	0,025-1,25	0,025-1,25
Магнито-абразивная	5-9	0,5-12,5	0,02-1,6	0,008-1,25	0,003-1,0

Таблица 2.3

Возможности методов обработки в обеспечении точности размеров и параметров состояния внутренних поверхностей вращения деталей машин

Метод обработки	Квалитет	Параметры состояния поверхностного слоя деталей			
		$W_z$ , мкм	$R_a$ , мкм	$S_m$ , мм	$S$ , мм
1	2	3	4	5	6
Сверление и рас- сверливание	10-13	5,0-32	3,2-12	0,16-0,8	0,08-0,63
Зенкерование					
черновое	10-12	5,0-16	2,5-8,0	0,16-0,8	0,063-0,4
чистовое	8-9	3,6-8,0	1,25-3,2	0,08-0,25	0,05-0,16
Развёртывание					
черновое	10-11	2,5-6,25	1,25-2,5	0,08-0,2	0,04-0,16
чистовое	7-9	1,25-4,0	0,63-1,25	0,032-0,1	0,0125- 0,063
тонкое	5-6	0,5-1,6	0,32-0,63	0,0125-0,04	0,008-0,02
Протягивание					
черновое	9-11	1,25-5,0	1,25-3,2	0,08-0,25	0,04-0,2
чистовое	6-8	0,4-1,6	0,32-1,25	0,02-0,10	0,008-0,08
Растачивание					
черновое	11-13	8,0-40	8-16	0,25-1,0	0,25-1,0
получистовое	9-10	4,0-12,5	2,5-8	0,125-0,32	0,08-0,32
чистовое	7-8	2,5-6,25	0,8-2,0	0,08-0,16	0,032-0,16
тонкое	5-6	0,5-4,0	0,2-0,8	0,02-0,10	0,01-0,08
Шлифование					
обдирочное	8-9	4,0-16	1,6-3,2	0,063-0,2	0,032-0,16



Продолжение табл.2.3

1	2	3	4	5	6
чистовое	6-7	1,25-6,25	0,32-1,6	0,025-0,1	0,01-0,08
тонкое	5-6	0,32-1,6	0,08-0,32	0,008-0,025	0,003-0,016
плосковершинное	6-8	0,5-10,0	0,32-2,5	0,063-1,0	0,006-0,16
Хонингование					
черновое	6-7	1,25-5,0	1,25-3,2	0,063-0,35	0,025-0,16
чистовое	5-6	0,4-1,6	0,25-1,25	0,02-0,2	0,008-0,08
тонкое	4	0,4-0,9	0,04-0,25	0,006-0,2	0,003-0,16
плосковершинное	5-8	0,5-10	0,25-2,0	0,04-1,0	0,008-0,20
Притирка					
обычная	4-5	0,125-0,63	0,02-0,16	0,005-0,04	0,002-0,02
плосковершинная	5-7	0,4-1,25	0,10-0,80	0,032-0,2	0,003-0,20
Раскатывание					
черновое	8-9	3,2-12	0,32-2,0	0,1-1,0	0,1-1,0
чистовое	5-7	1,6-5,0	0,05-0,32	0,025-0,2	0,025-0,2
Выглаживание	5-8	3,2-10	0,05-2,0	0,025-1,0	0,025-1,0
Вибронакатывание	5-8	0,5-32	0,063-1,6	0,01-12,5	0,008-0,5
Дорнование	5-8	0,25-3,2	0,1-1,6	0,025-1,0	0,016-1,0

Таблица 2.4

Возможности методов обработки по обеспечению точности обработки зубьев и параметров состояния их рабочих поверхностей

Метод обработки	Квалитет	Параметры состояния поверхностного слоя зубьев			
		$W_z$ , мкм	$R_a$ , мкм	$S_m$ , мм	$S$ , мм
Зубонарезание:					
модульными фрезами	9-11	10,0-50,0	8,0-16	1,25-5,0	1,0-5,0
червячными фрезами	8-9	5-50	3,2-8,0	0,32-1,6	0,2-1,6
долбяками	7-8	5-30	20-4,0	0,2-1,25	0,125-1,25
Протягивание	6-7	31-20	0,8-1,6	0,08-2,0	0,05-2,0
Накатывание	8-9	10-50	0,8-2,0	0,08-5,0	0,063-5,0
Шевингование	5-6	2-10	0,6-1,25	0,125-0,5	0,08-0,5
Шлифование	5-6	1,5-10	0,32-1,25	0,04-0,1	0,025-0,063
Обкатывание	5-6	3-10	0,32-1,0	0,063-2,0	0,032-2,0
Притирка	5	2-3	0,1-0,25	0,032-0,5	0,02-0,5

Таблица 2.5

Возможности методов обработки по обеспечению точности шлицев и параметров состояния их рабочих поверхностей

Метод обработки	Параметры состояния поверхностного слоя шлицев			
	$W_z$ , мкм	$R_a$ , мкм	$S_m$ , мм	$S$ , мм
Шлицефрезерование: черновое	15-60	4-10	1,0-5,0	1,0-5,0
чистовое	5-20	1,25-4,0	0,1-2,0	0,05-2,0
Шлицестрогание	5-20	1,0-2,5	0,08-2,5	0,05-2,5
Шлицепротягивание	3-15	0,8-1,6	0,08-2,0	0,05-2,0
Шлифование шлицев: черновое	5-20	1,6-3,2	0,1-0,32	0,063-0,25
чистовое	1,5-6	0,4-1,25	0,032-0,10	0,016-0,063
Накатывание шлицев	10-50	0,8-1,0	0,08-5,0	0,063-5,0
Обкатывание шлицев	3-10	0,32-1,0	0,063-2,0	0,032-1,25

Таблица 2.6

Возможности методов обработки по обеспечению точности резьбы и параметров состояния её рабочих поверхностей

Метод обработки	Квалитет	Параметры состояния поверхностного слоя резьбы			
		$W_z$ , мкм	$R_a$ , мкм	$S_m$ , мм	$S$ , мм
Нарезание резцами, гребенками, резовыми головками	2-3	3-20	1,6-4,0	0,08-0,25	0,032-0,16
Нарезание метчиками, плашками	3	2-15	1,25-3,2	0,063-0,2	0,025-0,125
Шлифование резьбы	1-2	2-12	0,63-1,25	0,02-0,1	0,01-0,08
Накатывание, раскатывание	1-2	4-12	0,8-2,5	0,063-0,15	0,025-0,1

Таблица 2.7

Значение параметра  $t_p$ , %

Метод обработки	Уровень $t_p$ , %				
	5	10	20	30	40
Лезвийная обработка	0,1-0,3	1-2	3-5	10-12	18-22
Абразивная	0,4-0,6	1-3	6-10	16-20	30-35
Отделочно-упрочняющая ППД	5-10	15-20	30-35	45-50	60-65
Лезвийная обработка	30-35	48-52	73-77	86-90	95-98
Абразивная	48-52	65-70	80-85	90-95	97-99
Отделочно-упрочняющая ППД	70-75	80-85	88-92	94-96	98-99

## 2.5. ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БАЗ

Задача выбора технологических баз относится к числу трудно формализуемых. Возможны многочисленные варианты её решения, предопределяющие структуру всего технологического процесса изготовления детали. Рекомендации по определению технологических баз приведены в технологической литературе, например в работах [32, 60, 64, 80, 124, 132, 230, 368, 370, 371, 391, 393, 410]. Поэтому здесь отметим наиболее важные аспекты решения этой задачи.

Известно, что все поверхности детали можно условно разделить на четыре категории: *основные, вспомогательные, исполнительные и свободные*. Посредством основных поверхностей деталь ориентируется в сборочной единице (узле). К вспомогательным поверхностям рассматриваемой детали присоединяются другие (сопрягаемые) детали (входящие в узел). Исполнительные поверхности предназначены для выполнения определённой функции (например, эвольвентная поверхность зубьев зубчатых колёс). Свободные поверхности детали являются связующими между перечисленными выше поверхностями. Основные поверхности предопределяют *основные конструкторские базы* детали. Вспомогательные поверхности – *вспомогательные конструкторские базы*.

При выборе технологических баз необходимо руководствоваться двумя принципами базирования: принципом совмещения (единства) баз и принципом постоянства баз [393]. В соответствии с первым принципом необходимо стремиться к тому, чтобы конструкторские, измерительные и технологические базы были совмещены. В этом случае отсутствует погрешность базирования, которую (при её наличии) включают в состав припуска на обработку. При несовпадении конструкторских и технологических баз ужесточаются допуски вновь вводимых технологических размеров. При невозможности выполнения принципа совмещения баз рекомендуется использовать второй принцип базирования – принцип постоянства баз.

При выборе технологических баз в соответствии с указанными принципами базирования необходимо учитывать имеющиеся на предприятии технологическое оборудование и соответствующие станочные приспособления, а также базу данных по типовым и групповым технологическим процессам

При возможных нескольких (альтернативных) вариантах выбора баз необходимо выполнить соответствующие технико-

экономические расчёты (по каждому варианту построения технологического процесса) и выбрать наиболее рациональный или оптимальный вариант. Эту работу целесообразно выполнять при помощи компьютерной САПР.

При выборе черновых баз следует руководствоваться следующими основными рекомендациями [237].

1. В качестве черновых баз следует выбирать те поверхности, которые и в готовой детали останутся черными (необработанными). При этом обеспечивается наиболее правильное расположение подсистемы обработанных поверхностей относительно необработанных.
2. Если с каких-либо поверхностей детали требуется снять минимальный припуск, то именно эти поверхности должны быть приняты в качестве черновых баз.

Обе эти рекомендации противоречат друг другу. Технолог-проектант на основе анализа конструкции детали и узла, а также, учитывая технологию получения заготовки и применяемую при этом оснастку, должен отдать предпочтение какой-то одной рекомендации. На выбор черновых баз может оказать влияние и такой фактор как удобство установки и закрепления детали в приспособлении.

Первая операция должна быть построена таким образом, чтобы поверхности, обрабатываемые при её выполнении, могли бы служить технологическими базами при выполнении последующих операций. Не следует допускать повторного использования черновых баз, так как при этом обработанные при различных установках поверхности займут неправильное положение относительно друг друга.

Технологический процесс должен быть построен таким образом, чтобы все операции производились от одних технологических баз (координатный метод достижения точности). Такой принцип построения технологического процесса не всегда соответствует простановке размеров на чертеже детали. В этом случае проектант должен, анализируя конструкцию детали, либо доказать возможность изменения системы простановки размеров на чертеже, либо произвести расчёт вводимых технологических размеров и допусков.

Принятые технологические базы не должны давать погрешностей базирования. При наличии погрешностей базирования необходимо расчетом проверить их величину и оценить их влияние на результирующую точность выполняемых размеров.

## 2.6. ВЫБОР МЕТОДОВ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

В литературе описаны десятки методов химико-термической обработки, на основе которых построены соответствующие типовые и групповые технологические процессы [269, 368, 370, 393]. Поэтому рассмотрим только некоторые методы, применяемые в авиационной промышленности.

Цементация производится, например, в металлических прямоугольных ящиках (200x200x300 мм), где заготовки окружены древесным углём свежим (1 часть) и уже использованным (3 части) в предыдущем цикле. Сверху ящик замазывают глиной и помещают в печь. Выдержка – несколько часов при регламентируемой температуре (толщина цементируемого слоя определяется временем выдержки из расчёта, например, 0,2 – 0,3 мм за час). Фактическую толщину цементируемого слоя определяют металлографическим методом (травят поверхность микрошлифа на образце-свидетеле и рассматривают травлёную поверхность на металлографическом микроскопе). Измерение толщины слоя производят по его изображению в микроскопе.

Азотирование производят в вертикальных цилиндрических печах (диаметр порядка 1 м), куда через армированные резиновые шланги подают газ (аммиак). Для подачи газа имеются входной и выходной *патрубки*. Печи в количестве, например, 5-ти штук установлены в линию с расстоянием между ними порядка 1 м. В верхней части каждой печи установлен асинхронный электродвигатель (1-3 кВт), ось вала которого заканчивается вентилятором. Лопастями вентилятора (расположены в нижней части печи) перемешивают газ, выравнивая его концентрацию. Отработанный газ после его водяного охлаждения поступает в выходной патрубок. Выдержка деталей в печи – от нескольких часов до нескольких суток при регламентируемой температуре (толщина азотируемого слоя определяется временем выдержки из расчёта, например, 0,2 – 0,3 мм за 10 час). Поддержание температуры в печи – при помощи релейной системы автоматического регулирования с одновременной записью температуры на самописце с круговой шкалой. Фактическую толщину цементируемого слоя определяют металлографическим методом (травят поверхность микрошлифа на образце-свидетеле и рассматривают травлёную поверхность на металлографическом микроскопе). Измерение толщины слоя производят по его изображению в микроскопе.

## 2.7. РАЗРАБОТКА МАРШРУТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ И ЧЕРТЕЖЕЙ НАЛАДКИ

### 2.7.1. РАЗРАБОТКА МАРШРУТА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛИ (МОД)

Разработка маршрутной технологии является ответственным этапом проектирования. Основными исходными данными для разработки *маршрутной технологии* являются чертеж детали и программа выпуска. Разработка маршрутной технологии часто производится на основе анализа действующего заводского технологического процесса. При разработке особое внимание следует уделить выбору технологических баз заготовки (параграф 2.5), так как выбор технологических баз заготовки предопределяет маршрут её обработки [269, 391, 393].

Маршрутная технология должна содержать эскизы обработки по операциям (позициям) с указанием базовых точек, мест приложения зажимов, размеров и допусков, получаемых при обработке, шероховатости обработанной поверхности. На каждую операцию (позицию) дается эскиз наладки. На эскизе наладки показывают приспособление с закрепленной деталью, а также инструменты (инструментальные наладки) в положении, соответствующем концу рабочего хода. При использовании специальных агрегатных станков дается компоновочная схема станка или автоматической линии.

В маршрутной технологии для каждой операции указывают [237]:

- 1) номер операции, позиции, перехода;
- 2) наименование операции, позиции, перехода;
- 3) наименование и тип станка;
- 4) наименование приспособления;
- 5) наименование загрузочного или установочно-съемного устройства;
- 6) наименование режущего инструмента и материала его рабочей части;
- 7) наименование измерительного инструмента.

При разработке маршрутной технологии и её оформлении необходимо произвести *ориентировочные расчеты* режимов резания, норм времени, припусков на обработку характерных поверхностей.

Для серийного и мелкосерийного производства маршрутная технология разрабатывается с учетом возможности использования

групповых наладок. Для этого следует выявить номенклатуру деталей, которые могут обрабатываться по одному типовому (или групповому) процессу. Типовой (групповой) процесс разрабатывают на наиболее сложные и трудоемкие детали – комплексные детали, которые могут быть реальными или мнимыми. Групповая наладка для каждой операции разрабатывается с учетом программы выпуска и загрузки оборудования.

При разработке маршрутной технологии в условиях производства с большой программой выпуска изделий особое внимание следует уделить вопросам автоматизации. Разработка маршрутной технологии для условий автоматизированного производства имеет некоторые особенности.

### **2.7.2. ОФОРМЛЕНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ НАЛАДОК НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ОБРАБОТКУ И СБОРКУ**

На чертежах наладки (установки) необходимо дать графические иллюстрации к разработанному технологическому процессу в такой форме, которая позволила бы судить о содержании всего процесса в целом, а не только некоторых произвольно выбранных операций [237]. Следовательно, выбор операций, которые необходимо иллюстрировать чертежами установок, должен быть произведен весьма тщательно. Этот этап проектирования должен производиться лишь после того, как будут выполнены предыдущие этапы и в том числе этап разработки и оформления на картах технологического процесса. В противном случае возможна переделка уже готовых чертежей установок, вызванная изменениями в технологическом процессе.

Желательно, чтобы каждый лист содержал несколько чертежей установок, т.е. иллюстрировал несколько операций или позиций. Число чертежей установок на листе определяется сложностью установки. В среднем на 1 лист можно расположить 2...4 установки.

Каждую установку снабжают надписью, содержащей номера операций и позиций. Масштаб чертежей установок выбирается в зависимости от размеров обрабатываемой детали, приспособлений, инструментов и т.д. Желательно пользоваться одним масштабом для всех установок. На чертеже каждой установки, как правило, изображаются: приспособление, обрабатываемая деталь (заготовка), режущий инструмент, вспомогательный инструмент и другие элементы крепления режущего инструмента, измерительный инструмент (в

случае, если он применяется для контроля размеров деталей в процессе обработки).

Приспособление (станочное или сборочное) изображают, как правило, в одной проекции, которая позволит наглядно показать базирование обрабатываемой детали, её закрепление, а также устройство самого приспособления. Кроме того, должны быть показаны: устройства, предназначенные для направления инструмента (кондукторные втулки, направляющие втулки и т.п.), устройства, служащие для базирования и фиксации навесных кондукторных плит относительно приспособлений (в случае, когда иллюстрируются операции, выполняемые на одно- и многопозиционных агрегатах и других аналогичных станках). Показываются также люнеты.

На чертежах установок фрезерных операций показываются габариты и установки (ограничители положения инструмента при настройке его на размер). В случаях, когда при выполнении данной операции предусмотрена автоматическая загрузка станков, на чертеже установки также необходимо показать устройство для автозагрузки (частично или полностью).

Кондукторные втулки, опорные пластины и штыри, установочные пальцы и другие элементы приспособления, служащие для базирования и закрепления обрабатываемой детали, должны изображаться в соответствии с нормами и ГОСТами. Если одной проекции недостаточно для чёткого объяснения работы приспособления или базирования детали, то необходимо изобразить вторую проекцию полностью или частично.

При иллюстрации чертежами установок операций, выполняемых на одинаковых приспособлениях, допускается такое приспособление показывать на установках только один раз. Кроме того, на установках, иллюстрирующих операции, выполняемые на многошпиндельных токарных станках и многопозиционных агрегатных станках и в других подобных случаях (например, на автоматических линиях) установку детали в приспособлении достаточно привести один раз на одной из позиций, причем допускается совмещение загрузочной и рабочей позиции на одной установке.

Обрабатываемую деталь (заготовку) изображают в рабочем положении (т.е. установленной и закрепленной в приспособлении) штрих-пунктирными или тонкими линиями.

Режущий инструмент показывают в положении, соответствующем концу его рабочего хода. Стандартный инструмент (резцы, свер-



ла, зенкера, развертки, фрезы и др.) изображают в соответствии с нормами и стандартами.

Элементы крепления режущего инструмента желательно показывать без схематизма (упрощения). Вспомогательный инструмент для стержневого или насадочного инструмента (оправки, удлинители, быстросъемные, плавающие патроны и т.п.) желательно показать в разрезе, полном или частичном. То же относится к направляющим устройствам борштанг. Державки, служащие для крепления резцов и другого инструмента (особенно для случаев многоинструментальной обработки), также должны быть показаны подробно: необходимо показать элементы державок, предназначенные как для крепления инструмента, так и для регулировки его положения относительно базовых элементов станка или приспособлений.

Измерительный инструмент, применяемый для измерения размеров деталей непосредственно в процессе обработки, элементы систем автоподладки и т.п. также показывают на установках достаточно подробно, т.е. в разрезе, частичном или полном.

Кроме вышеприведенных элементов установок, на чертежах установок показывают также *циклы работы* (циклограмму) станков (агрегатных головок, суппортов). Показывают схемы расположения позиций на станках, а также компоновки (агрегатных) станков. Для других многопозиционных станков (токарные многошпиндельные автоматы и полуавтоматы) достаточно привести схему расположения позиций.

Направление подач и главного движения указывается на установках стрелками с соответствующими обозначениями.

Выше отмечалось, что чертежами установок иллюстрируют такие операции технологического процесса, которые позволяют составить ясное представление обо всем процессе в целом. В этой связи желательно представить операции, на которых производится обработка *основных и вспомогательных базовых поверхностей*. Это, как правило, первые операции, где установка деталей производится по черновым поверхностям. Далее должны быть показаны все или большинство характерных операций технологического процесса. Показывают последовательно токарные, фрезерные, сверлильные и другие операции. Однотипные операции и позиции могут быть показаны только один раз.

На чертежах установок проставляют настроечные размеры. В случае обработки на токарных, расточных и сверлильных станках для

диаметральных размеров проставляются номинальные размеры диаметров отверстий, для осевых размеров указываются размеры, связывающие *базовую торцовую поверхность детали с торцами уступов, канавок* и т.д. При обработке на фрезерных и строгальных станках проставляют размеры, связывающие базовые поверхности приспособлений с их рабочими (установочными) поверхностями, а также размеры установочных щупов.

При обработке на агрегатных станках и в других подобных случаях (применение многошпиндельных сверлильных головок на сверлильных и токарных станках, обработка на автоматических линиях) настроечные размеры определяют положение режущих кромок инструмента относительно базовых поверхностей детали или приспособления. Для диаметральных размеров должны быть проставлены номинальные размеры диаметров отверстий. Осевые размеры для инструментов, работающих с выходом (например, при сверлении сквозных отверстий), проставляются от конца рабочей части инструмента до зеркала (плоскости) шпиндельной коробки агрегатной головки. Для инструментов, обеспечивающих точное получение торцовых поверхностей (подрезание, цекование, зенкерование торцов, протачивание канавок и т.д.), настроечные размеры связывают положение режущей кромки, формирующей торцовую плоскость, с базовой поверхностью приспособления. Проставляют также размер, связывающий режущую кромку с зеркалом шпиндельной коробки. Этот размер должен учитывать размеры шпинделя (его длину), вспомогательного инструмента (оправки, удлинителя и т.п.), направляющих устройств в осевом направлении. Все эти размеры должны быть указаны на чертеже установки.

Указывается также толщина кондукторной плиты, высота кондукторных втулок, зазор между кондукторной плитой и поверхностью обрабатываемой детали. В случае работы инструмента с выходом (работа на проход), указывается размер перебега инструмента.

Все вышеперечисленные размеры назначаются в соответствии с нормативами и рекомендациями, приводимыми в нормалях и стандартах на вспомогательный и режущий инструмент, на элементы приспособлений, на агрегатные силовые головки и т.д.

Как было сказано выше, на одном листе формата А1 желательно изображать несколько установок, иллюстрирующих одну многопозиционную или несколько однопозиционных операций. Порядок расположения чертежей установок на листе не играет особой роли, однако

необходимо придерживаться следующих требований [237]:

- а) чертежи установок операций или позиций желательно располагать в соответствии с порядком выполнения операций технологического процесса, а не вперемежку;
- б) изображать установки (наладки) необходимо в рабочем положении обрабатываемой детали (заготовки) на станке, в приспособлении и т.д. Например, при обработке детали на токарном станке патрон необходимо располагать слева, а не справа; ось детали – горизонтально, а не вертикально; направление вращения шпинделя, указанное стрелкой на чертеже, должно соответствовать направлению вращения на станке и т.д.;
- в) выдерживать определенную “плотность” чертежа, не допуская оставления большого количества свободного места на листах;
- г) не допускать излишнего схематизма в изображении чертежей установок.

## **2.8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИПУСКОВ И МЕЖОПЕРАЦИОННЫХ РАЗМЕРОВ**

При выборе и обосновании заготовки устанавливают нормированные соответствующими стандартами припуски (нормативные) на последующую механическую обработку этой заготовки. Однако эти припуски установлены для различных отраслей машиностроения и не учитывают специфику конкретных условий производства, в том числе его типа и организационной формы. Известно, что величина общего припуска зависит от метода обеспечения точности обработки [184, 188, 187, 911], однако в технологической литературе этому вопросу не уделено должного внимания. Нет рекомендаций по пересчёту припусков и межоперационных размеров при изменении метода обеспечения точности обработки.

### **2.8.1. МЕЖОПЕРАЦИОННЫЕ И МЕЖПЕРЕХОДНЫЕ ПРИПУСКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ**

#### **2.8.1.1. СТРУКТУРА МЕЖОПЕРАЦИОННОГО (МЕЖПЕРЕХОДНОГО) ПРИПУСКА**

Известно, что способ и результаты определения межоперационных и межпереходных припусков оказывают существенное влияние

на трудо- и материалоемкость технологического процесса механической обработки. Припуск на каждый технологический переход должен быть наименьшим, но одновременно достаточным для обеспечения требуемой точности обработки, шероховатости поверхности и требуемого физико-механического состояния поверхностного слоя.

Точность механической обработки деталей машин обеспечивается либо методом пробных проходов и промеров (МППП), либо методом автоматического получения размеров (МАПР) на настроенных станках. Влияние этих методов на структуру припуска впервые отмечалось в работе [279], где рассмотрен механизм формирования структуры припуска для МАПР. Позднее этот механизм был рассмотрен в работе [64] и дополнен аналогичными рассуждениями применительно к МППП.

В работе [230] дана методика определения межоперационных припусков для одного из двух известных методов обеспечения точности обработки – метода пробных проходов и промеров (МППП). Приведены общие положения и термины: общий припуск, минимальный, номинальный и максимальный припуски, допуск припуска. Показано, что для структуры расположения припусков и допусков в соответствии с МППП справедливы положения размерного анализа технологического процесса по методу полной взаимозаменяемости (метод «мини-макса»), когда припуск является замыкающим звеном размерной цепи. Однако, в этой работе не даны рекомендации по определению припусков для другого распространённого метода обеспечения точности обработки – метода автоматического получения размера (МАПР) на настроенных станках.

В работе [64] подробно рассмотрены структуры расположения припусков и допусков для обоих методов обеспечения точности обработки (МАПР и МППП), приводится механизм, обуславливающий ту или иную структуру. Однако ничего не говорится о возможности перехода от одной структуры к другой. Дело в том, что размерный анализ технологического процесса чаще всего производят на основе метода полной взаимозаменяемости для структуры расположения припусков и допусков в соответствии с МППП (метод «мини-макса»). В тоже время размерный анализ, как правило, применяют для станков, настроенных на размер, т.е. для условий, в которых действует МАПР. Как следствие, возникает противоречие: схема расположения припусков и допусков соответствует МППП, а полученные результаты применяют для условий, в которых действует МАПР.

Указанное противоречие подробно рассмотрено в работе [453]. Более того, в этой работе предлагаются приёмы перехода от структурной схемы – оригинала (построенной для МАПР) к расчетной (промежуточной) структурной схеме, соответствующей МППП. Предложено два приёма перехода. Первый: в качестве максимального значения припуска для расчётной схемы оставить максимальное значение припуска для МАПР ( $Z_{k \max}^{МАПР}$ ), а в качестве минимального – принять расчетный размер  $Z_{k \min}^{расч} = Z_{k \min}^{МАПР} - 2S_k$ . Второй: в качестве минимального значения припуска взять расчетный размер  $Z_{k \min}^{расч} = Z_{k \min}^{МАПР} - S_k$ . В этом случае расчетный максимальный размер  $Z_{k \max}^{расч} = Z_{k \max}^{МАПР} + S_k$ . Однако, в этой работе не приведен сравнительный анализ структур припуска для МППП и МАПР. Кроме того, в работе [230] принято под расчётным припуском понимать номинальное значение припуска. Поэтому ниже вместо термина «расчётный» используется термин «эквивалентный» и приведены формулы связи между тремя структурами припуска (рис.2.2).

На рис.2.2 приняты следующие обозначения:  $a_{\max}$ ,  $a_{\min}$  и  $b_{\max}$ ,  $b_{\min}$  – предыдущий и последующий межоперационные (межпереходные) размеры (максимальный и минимальный);  $S_{k-1}$ ,  $S_k$  – предыдущий и последующий допуски на указанные размеры;  $Z_{k \min}$ ,  $Z_{k \text{ ном}}$ ,  $Z_{k \max}$  – минимальное, номинальное и максимальное значения припуска для  $k$ -ой технологической операции (перехода);  $Z_{k \min}^{экв}$ ,  $Z_{k \max}^{экв}$  – минимальное и максимальное значения припуска на  $k$ -ю операцию (переход) для эквивалентной схемы расположения припусков и допусков.

Эквивалентная схема (рис.2.2,в) и схемы, соответствующие МППП (рис.2.2,а) и МАПР (рис.2.2,б), построены на основании следующих предположений. Во-первых, на всех трёх схемах минимальные значения припусков являются одинаковыми, поскольку минимальный припуск определяют по таблицам или расчётом как первичную величину. Во-вторых, предыдущий и последующий допуски ( $S_{k-1}$ ,  $S_k$ ) на всех трёх схемах являются, соответственно, одинаковыми, поскольку определяются только свойствами предыдущей и последующей операций (переходов). Из рис.2.2 видно, что при принятых допущениях  $k$ -я составляющая припуска для МППП больше од-

ноимённой составляющей для МАПР на величину  $S_k$ . Следовательно, МАПР в отличие от МППП характеризуется меньшей величиной общего припуска.

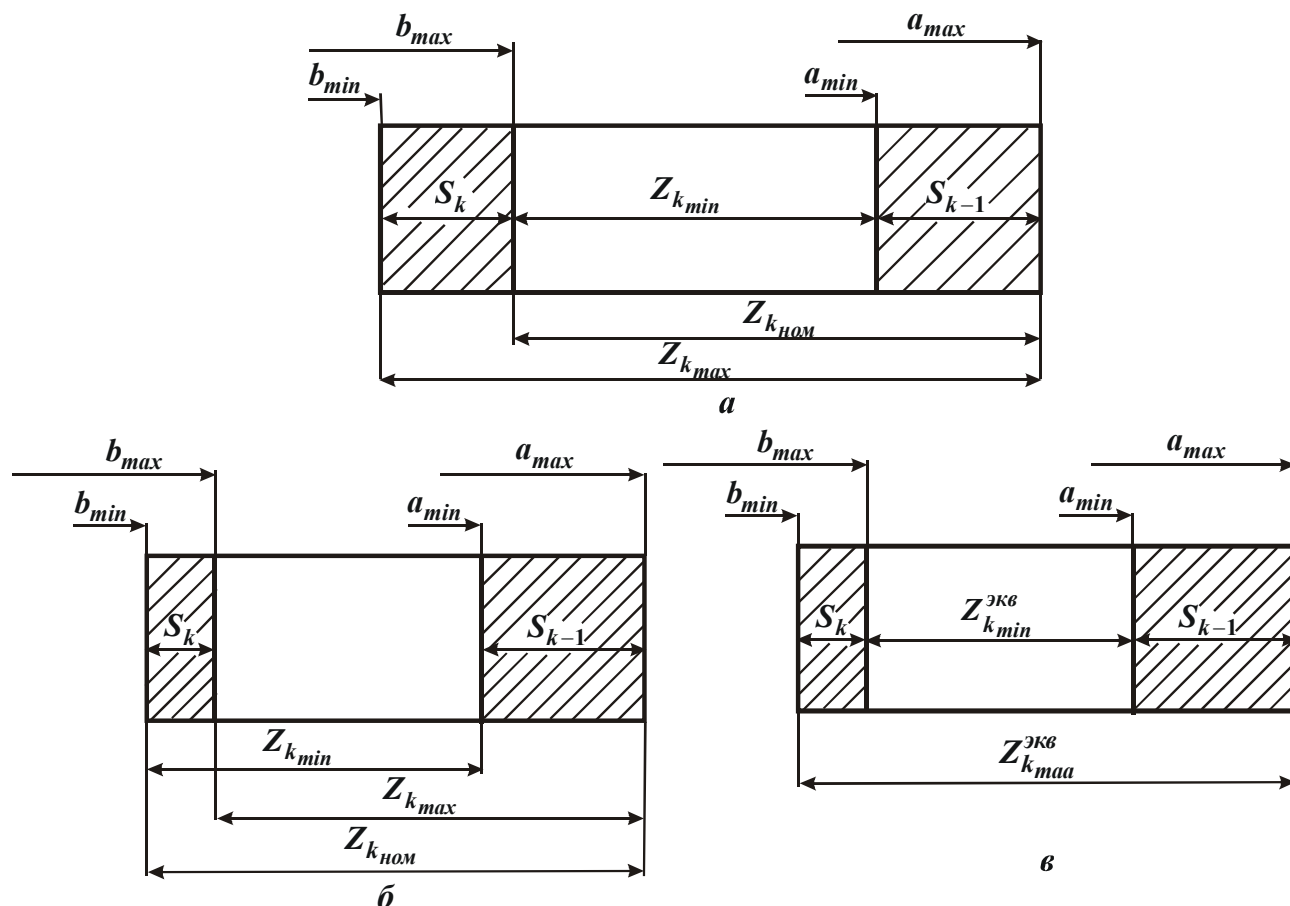


Рис.2.2. Схемы расположения припусков и допусков: для МППП (а), МАПР (б) и эквивалентная схема (в).

Известно, что для одного и того же технологического процесса (операции) структура припуска (т.е. схема расположения припусков и допусков) может быть различной [188]. Поэтому часто возникает задача перехода от одной структуры к другой (т.е. задача преобразования данных одной структуры в данные другой структуры). На основании принятых выше предположений для исследуемых схем расположения припусков и допусков (рис.2.2) могут быть выполнены эквивалентные переходы от одной схемы к другой в соответствии с нижеприведенными формулами.

Переходы:

от эквивалентной схемы (рис.2.2, б и в) к схеме МАПР

$$Z_{k max}^{МАПР} = Z_{k max}^{эКВ} - S_k; \quad (2.12)$$

$$Z_{k min}^{МАПР} = Z_{k min}^{эКВ} + S_k; \quad (2.13)$$

от схемы МАПР (рис.2.2, а и б) к схеме МППП

$$Z_{k \min}^{МППП} = Z_{k \min}^{МАПР}; \quad (2.14)$$

$$Z_{k \max}^{МППП} = Z_{k \max}^{МАПР} + 2S_k; \quad (2.15)$$

от схемы МППП (рис.2.2, а и б) к схеме МАПР

$$Z_{k \min}^{МАПР} = Z_{k \min}^{МППП}; \quad (2.16)$$

$$Z_{k \max}^{МАПР} = Z_{k \max}^{МППП} - 2S_k; \quad (2.17)$$

от эквивалентной схемы (рис.2.2, а и в) к схеме МППП с учетом формул (2.13) и (2.14), а также формул (2.12) и (2.15), соответственно,

$$Z_{k \min}^{МППП} = Z_{k \min}^{экв} + S_k; \quad (2.18)$$

$$Z_{k \max}^{МППП} = Z_{k \max}^{экв} + S_k; \quad (2.19)$$

от схемы МАПР (рис.2.2, б и в) к эквивалентной схеме

$$Z_{k \max}^{экв} = Z_{k \max}^{МАПР} + S_k; \quad (2.20)$$

$$Z_{k \min}^{экв} = Z_{k \min}^{МАПР} - S_k; \quad (2.21)$$

от схемы МППП (рис.2.2, а и в) к эквивалентной схеме с учетом формул (2.14) и (2.20), а также формул (2.16) и (2.21), соответственно,

$$Z_{k \max}^{экв} = Z_{k \max}^{МППП} - S_k; \quad (2.22)$$

$$Z_{k \min}^{экв} = Z_{k \min}^{МППП} - S_k. \quad (2.23)$$

Установленные взаимосвязи между тремя схемами расположения припусков и допусков (схемы по МППП, МАПР и эквивалентная) позволяют переходить от одной схемы к другой в зависимости от конкретных условий производства. Другими словами, результаты расчета межоперационных и межпереходных припусков и допусков для одной из трех указанных схем могут быть преобразованы в соответствующие эквивалентные результаты для других схем.

Удаление общего (суммарного) припуска с какой-либо элементарной поверхности заготовки (плоской, цилиндрической, конической и т.п.) осуществляется (в общем случае) на протяжении нескольких технологических операций, каждая из которых содержит определенное количество технологических переходов. После каждого технологического перехода и/или операции заготовка приобретает определенное промежуточное состояние, которое характеризуется формой и размерами. Эти размеры называют промежуточными (межпереходными, межоперационными или операционными) размерами. Определение их составляет одну из задач технологического проекти-

рования операций механической обработки заготовок. Величину межоперационного (межпереходного) припуска в настоящее время определяют либо табличным (опытно-статистическим), либо расчётным (расчётно-аналитическим) методами [80, 132, 368]. Отметим, что в обоих случаях речь идёт об определении минимальных припусков  $Z_{i\min}$  на выполнение  $i$ -ой операции или  $i$ -ого перехода (не путать с табличным методом определения общего припуска  $Z_{общ}$  по таблицам ГОСТов на заготовки). В ряде случаев под межоперационным табличным припуском подразумевают не минимальную, а номинальную величину этого припуска [60, 80]. Зная допуски на межоперационные (или межпереходные) размеры заготовки, можно определить соответствующие максимальные припуски  $Z_{i\max}$ , величина которых зависит (как установлено выше) от выбранного (принятого) метода обеспечения точности механической обработки [410]. Например, для МАПР получим (рис.2.2,б)

$$Z_{i\max}^{МАПР} = Z_{i\min}^{МАПР} + (T_{i-1} - T_i), \quad (2.24)$$

где  $Z_{i\max}^{МАПР}$ ,  $Z_{i\min}^{МАПР}$  – максимальное и минимальное значения припуска для  $i$ -ой операции или  $i$ -ого перехода при МАПР;  $T_{i-1}$ ,  $T_i$  – предыдущий и последующий допуски на межоперационные (межпереходные) размеры заготовки.

В свою очередь для МППП получим (рис.2.2,а)

$$Z_{i\max}^{МППП} = Z_{i\min}^{МППП} + (T_{i-1} + T_i), \quad (2.25)$$

где  $Z_{i\max}^{МППП}$ ,  $Z_{i\min}^{МППП}$  – максимальное и минимальное значения припуска при МППП.

Учитывая, что величина минимального припуска ( $Z_{i\min}^{МАПР}$  или  $Z_{i\min}^{МППП}$ ) и допуски ( $T_{i-1}$ ,  $T_i$ ) не должны зависеть от метода обеспечения точности механической обработки, из формул (2.24) и (2.25) получаем (см. также уравнение (2.3)):

$$Z_{i\max}^{МППП} = Z_{i\max}^{МАПР} + 2T_i. \quad (2.26)$$

Таким образом, при одном и том же минимальном значении припуска  $Z_{i\min}$  максимальное его значение зависит от метода обеспечения точности обработки (МАПР или МППП) в соответствии с формулами (2.24) и (2.25). Кроме того, как следует из формулы (2.26), для любой  $i$ -ой операции (или  $i$ -ого перехода) максимальное значе-



ние припуска при МППП больше одноимённого значения припуска при МАПР на двойную величину допуска размера, получаемого на этой операции (переходе).

В формулах (2.12)-(2.26) неизвестной первичной величиной (подлежащей определению) является минимальный операционный припуск  $Z_{i\min}$ , где  $i$  - порядковый номер технологической однопереходной операции или порядковый номер технологического перехода многопереходной операции (черновой переход, получистовой переход и т.п.), относящийся к одной и той же элементарной обрабатываемой поверхности. Эту величину либо определяют по таблицам [393], составленным для различных методов механической обработки и одновременно учитывающих метод изготовления исходной заготовки (литьё, ковка, штамповка, прокат), либо рассчитывают по методике проф. Кована В.М. [279, 368].

### 2.8.1.2. ОБЩИЙ ПРИПУСК НА ОБРАБОТКУ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ (МИНИМАЛЬНЫЙ, НОМИНАЛЬНЫЙ, МАКСИМАЛЬНЫЙ И НОРМАТИВНЫЙ)

До сих пор рассматривались минимальные и максимальные межоперационные (межпереходные) припуски – составляющие элементы общего припуска на обработку  $Z_{общ}$ , который может быть минимальным ( $Z_{общ.min}$ ), номинальным ( $Z_{общ.ном}$ ) и максимальным ( $Z_{общ.max}$ ). В этой связи необходимо ввести понятие о *номинальном* межоперационном (межпереходном) припуске. В ряде работ, например, в работах [60, 230, 279] такой термин используется, однако, при различном его толковании. Так в работе [230] под номинальным припуском понимается расчётная его величина, соответствующая максимальному значению припуска при МАПР.

В то же время в работах [60, 80] под номинальным значением межоперационного (межпереходного) припуска понимается табличное его значение. Обобщение имеющихся в литературе данных позволяет сформулировать понятия о минимальном, номинальном и максимальном общем припуске (рис.2.3).

*Минимальный общий (расчётный) припуск ( $Z_{общ.min}$ )* получают путём суммирования минимальных межоперационных или межпереходных (на рис.2.3 названных промежуточными) припусков (блок 2

на рис.2.3), т.е.

$$Z_{\text{общ.}min} = \sum_{i=1}^n Z_{i\text{ min}}, \quad (2.27)$$

где  $n$  - число операций (переходов) механической обработки.

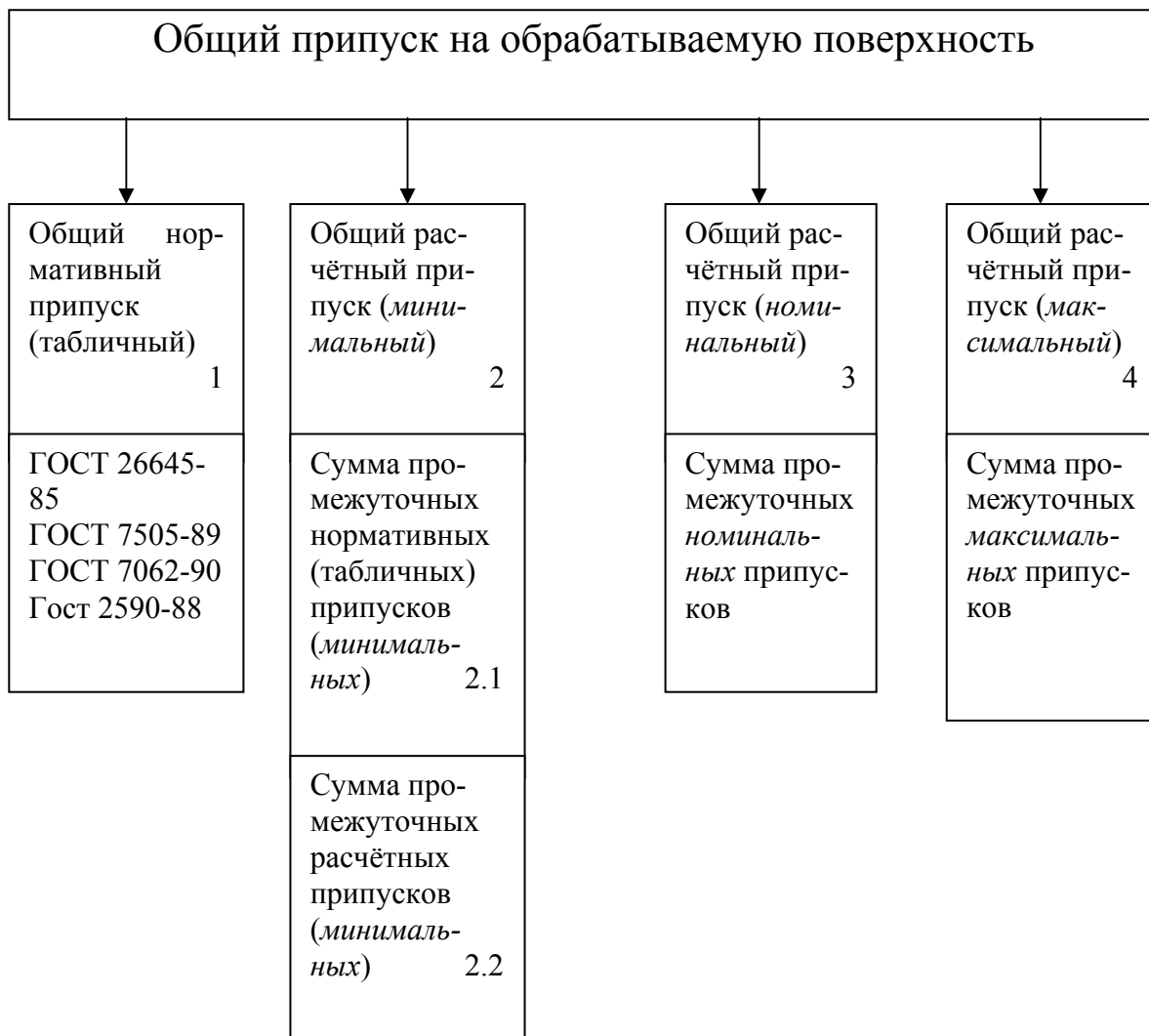


Рис.2.3. Классификация общего припуска по способам его определения.

Следовательно, величину  $Z_{\text{общ.}min}$  можно определить как разность между максимальными размерами исходной заготовки и готовой детали.

*Номинальный общий припуск* получают путём суммирования промежуточных номинальных припусков (блок 3 на рис.2.3), т.е.

$$Z_{\text{общ.}ном} = \sum_{i=1}^n Z_{i\text{ ном}}, \quad (2.28)$$

где  $Z_{i\text{ ном}}$  - номинальный межоперационный или межпереходный (промежуточный) припуск.

Следовательно, величину  $Z_{\text{общ.ном}}$  можно определить как разность между номинальными размерами исходной заготовки и готовой детали.

Максимальный общий (расчётный) припуск ( $Z_{\text{общ.мах}}$ ) получают аналогично, т.е.

$$Z_{\text{общ.мах}} = \sum_{i=1}^n Z_{i \text{ мах}}. \quad (2.29)$$

Следовательно, величину  $Z_{\text{общ.мах}}$  можно определить как разность максимальных размеров исходной заготовки и готовой детали.

Значения промежуточных минимальных, номинальных и максимальных припусков ( $Z_{i \text{ мин}}$ ,  $Z_{i \text{ ном}}$ ,  $Z_{i \text{ мах}}$ ) необходимы при определении соответствующих промежуточных размеров заготовки (включая размеры исходной заготовки). В этой связи промежуточные номинальные припуски можно рассматривать как разность соответствующих промежуточных номинальных размеров заготовки, т.е.

$$Z_{i \text{ ном}} = A_{(i-1) \text{ ном}} - A_i, \quad (2.30)$$

где  $A_{(i-1) \text{ ном}}$ ,  $A_{i \text{ ном}}$  - номинальные размеры заготовки после предшествующей  $(i-1)$ -й и текущей  $i$ -ой операции (перехода).

В технологической литературе нет однозначного понимания термина номинальный припуск. Так в работах [80, с.23; 230] под номинальным припуском  $2Z_{i \text{ ном}}$  понимают максимальный припуск при МАПР  $2Z_{i \text{ мах}}^{\text{МАПР}}$ , т.е.  $2Z_{i \text{ ном}} = 2Z_{i \text{ мах}}^{\text{МАПР}}$ . Для этого случая

$$2Z_{i \text{ ном}} = 2Z_{i \text{ мах}}^{\text{МАПР}} = 2Z_{i \text{ мин}}^{\text{МАПР}} + (T_{i-1} - T_i). \quad (2.31)$$

Такой подход соответствует понятию о номинальных размерах заготовки только при одностороннем («в тело») расположении поля допуска. При расположении номинального размера готовой детали вне поля его допуска (рис.2.4,а) номинальный припуск оказывается больше его максимального значения даже для МППП.

Например, на рис.2.4,а промежуточный размер  $d_{3 \text{ мах}} = d_{3 \text{ ном}}$ . В тоже время номинальный размер обработанной детали ( $d_{4 \text{ ном}} = d_{\text{д ном}}$ ) находится вне поля допуска, ограниченного размерами  $d_{4 \text{ мин}} = d_{\text{д мин}}$  и  $d_{4 \text{ мах}} = d_{\text{д мах}}$ . Такой случай бывает, например, при обработке шейки вала под подшипник. В этом случае

$$2Z_{4 \text{ ном}} = d_{3 \text{ ном}} - d_{\text{д ном}}, \quad (2.32)$$

где  $2Z_{4ном}$  - номинальный припуск на 4-й переход (окончательное шлифование);  $d_{3ном}$ ,  $d_{\partial ном}$  - номинальные размеры заготовки после 3-го перехода (предварительное шлифование) и готовой детали (после 4-го перехода – окончательного шлифования), соответственно.

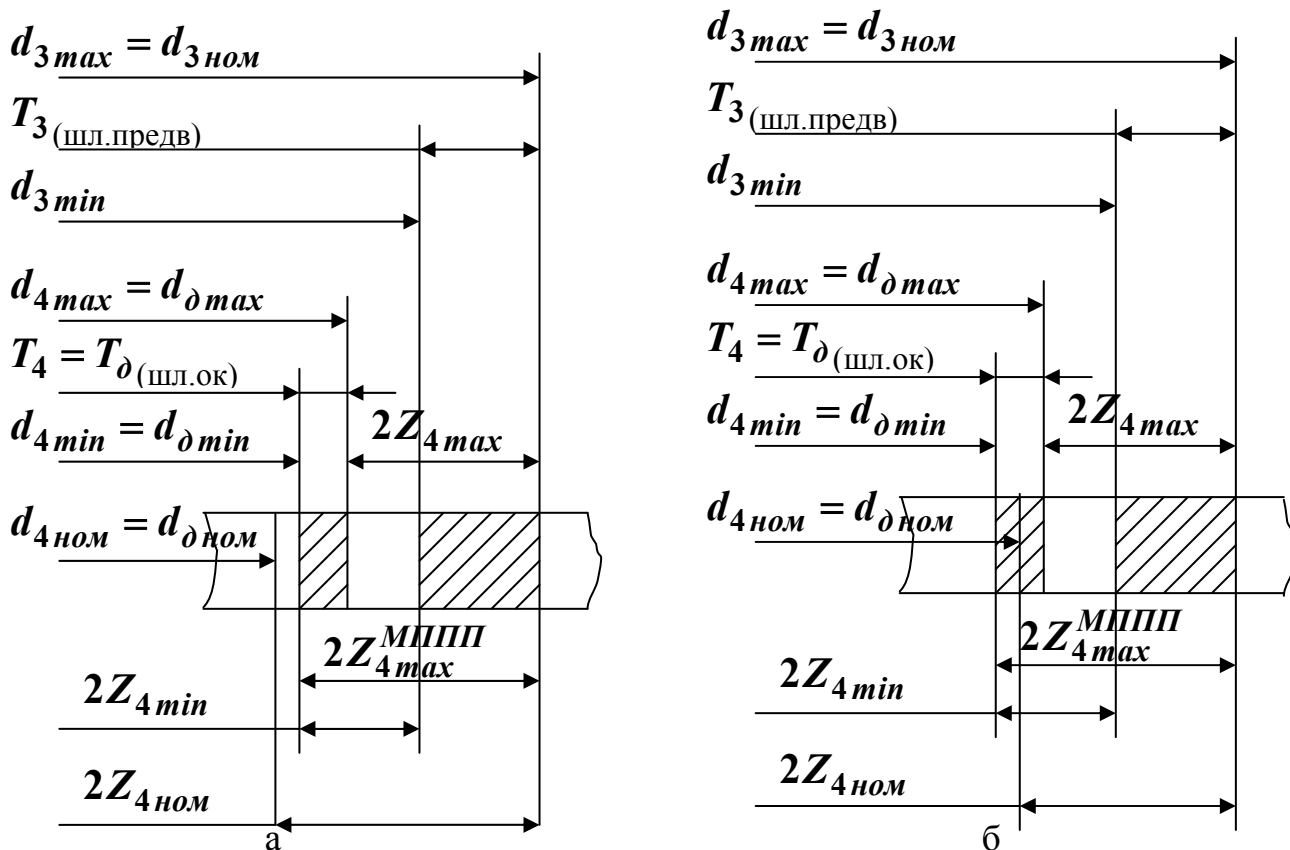


Рис.2.4. Структура припуска на предварительное (3-й переход) и окончательное (4-й переход) шлифование для МАРП при расположении номинального размера детали вне (а) и в пределах (б) его поля допуска ( $2Z_{4max}^{MPP}$  - промежуточный максимальный припуск на 4-й переход для МППП).

Выражение (2.32) можно записать в виде (рис.2.4,а)

$$2Z_{4ном} = 2Z_{4min} + H_{d_3} + H_{d_4}, \quad (2.33)$$

где  $H_{d_3}$ ,  $H_{d_4}$  - нижние отклонения по размерам, соответственно, на 3-ем (предшествующем) и 4-ом (выполняемом) переходах. Здесь  $H_{d_3} = T_3 > 0$  и  $H_{d_4} > 0$ .

При расположении номинального размера заготовки в пределах поля допуска (рис.2.4,б) получим

$$2Z_{4ном} = 2Z_{4min} + H_{d_3} - H_{d_4}. \quad (2.34)$$

Здесь

$$H_{d_3} = T_3 > 0 \text{ и } H_{d_4} < 0.$$

Различие между формулами (2.33) и (2.34) заключается в знаке

перед составляющей  $H_{d_4}$  (в свою очередь численное значение  $H_{d_4}$  берётся со своим знаком).

Обобщая сказанное, получаем следующие формулы для определения промежуточного номинального припуска на обработку наружных поверхностей

$$Z_{i\text{ном}} = Z_{i\text{мин}} + H_{i-1} \mp H_i, \quad (2.35)$$

$$2Z_{i\text{ном}} = 2Z_{i\text{мин}} + H_{d_{i-1}} \mp H_{d_i}, \quad (2.36)$$

где  $H_{i-1}$ ,  $H_{d_{i-1}}$  - нижние отклонения размеров на предшествующем  $(i-1)$ -ом переходе для линейных и диаметральных размеров, соответственно;  $H_i$ ,  $H_{d_i}$  - нижние отклонения размеров на выполняемом  $i$ -м переходе для линейных и диаметральных размеров, соответственно.

Знаки «-» и «+» в формулах (2.35) и (2.36) берутся для отрицательных и положительных нижних отклонений размеров, соответственно. Положительные нижние отклонения размеров готовой детали имеют место при обработке соответствующих поверхностей вала под подшипники. В этом случае для создания посадок с небольшим натягом шейки вала изготавливают с допуском по  $k6$ ,  $m6$  или  $n6$  [63, с.224], т.е. в соответствии с основной системой стандартных посадок для гладких цилиндрических соединений. Так как кольца подшипника являются тонкостенными деталями, то указанная основная система допусков и посадок применяется только для валов и корпусов под подшипники (т.е. для сопрягаемых с подшипниками деталей). Для самих подшипников предусмотрена специальная система допусков и предельных отклонений. Поэтому посадки подшипников качения отличаются от аналогичных посадок общего назначения величинами предельных натягов и зазоров. Кроме того, автомобильные подшипники имеют свои дополнительные отличия [326, с.67-68].

Таким образом, для любого выбранного метода обеспечения точности обработки (МАПР или МППП) минимальный, номинальный и максимальный размеры заготовки (для наружной поверхности) могут быть получены путём прибавления, соответственно, к минимальному, номинальному и максимальному размерам готовой детали суммы, соответственно, минимальных, номинальных и максимальных промежуточных припусков по всем выполняемым операциям (переходам), т.е. путём прибавления минимального, номинального и максимального общих припусков.

В качестве итога проведенных выше исследований рассмотрим

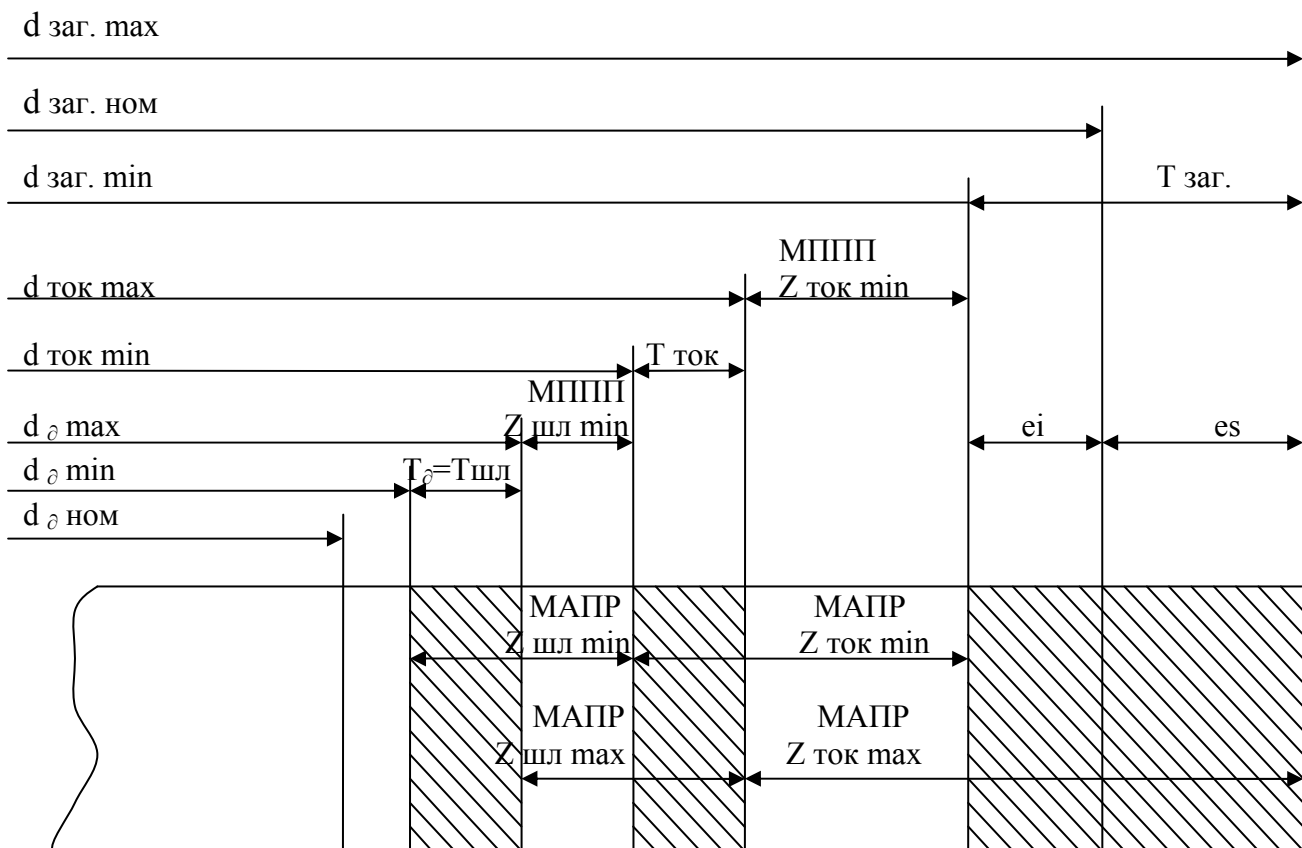


Рис. 2.5. Схема расположения полей припусков и допусков при удалении припуска с наружной поверхности за два перехода (точение и шлифование).

пример послойного удаления припуска за два технологических перехода: точение и шлифование (рис. 2.5). На рис.2.5 приняты следующие обозначения:  $d_{заг.мин}$ ,  $d_{заг.ном}$ ,  $d_{заг.мах}$  – минимальный, номинальный и максимальный диаметры исходной заготовки;  $d_{д.мин} = d_{шл.мин}$ ,  $d_{д.ном} = d_{шл.ном}$ ,  $d_{д.мах} = d_{шл.мах}$  – минимальный, номинальный и максимальный диаметры готовой детали, равные соответствующим размерам после шлифования;  $T_{шл} = T_{д}$ ,  $T_{ток}$  – допуски на размеры после шлифования (готовая деталь) и токарной обработки;  $T_{заг}$  – допуск на размер заготовки, состоящий из верхнего ( $B_{заг}$ ) и нижнего ( $H_{заг}$ ) отклонений;  $Z_{шл.мин}^{МППП}$ ,  $Z_{шл.мах}^{МППП}$  – минимальный и максимальный промежуточные припуски на шлифование при МППП;  $Z_{шл.мин}^{МАПР}$ ,  $Z_{шл.мах}^{МАПР}$  – минимальный и максимальный промежуточные припуски на шлифование при МАПР;  $Z_{шл.ток}^{МППП}$ ,  $Z_{шл.ток}^{МАПР}$  – минимальный и максимальный промежуточные припуски на токарную операцию при МППП;  $Z_{шл.ток}^{МАПР}$ ,  $Z_{шл.ток}^{МАПР}$  – минимальный и максимальный промежуточные припуски на токарную операцию при МАПР.

## 2.8.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩИХ НОРМАТИВНЫХ ПРИПУСКОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК

При проектировании (конструировании) исходной заготовки (отливки, поковки, проката и т.п.) на основе чертежа детали, подлежащей изготовлению, необходимо знать общие нормативные припуски (рис. 2.3, блок 1) на все обрабатываемые поверхности, а также допуски на отклонения размеров указанной заготовки. Расчёт этих припусков на основе табличного (рис. 2.3, блок 2.1) или поэлементного методов (рис. 2.3, блок 2.2) требует времени, поскольку предварительно необходимо разработать маршрутную технологию изготовления детали. В этой связи указанные нормативные припуски и допуски можно определить на основании соответствующих таблиц, приведенных в ГОСТ 26645-85 (отливки), ГОСТ 7505-89 (поковки, полученные штамповкой), ГОСТ 7062-90 (поковки, полученные свободной ковкой), ГОСТ 2590-88 (прокат). Ниже приведены схемы и рекомендации по определению нормативных припусков и допусков на основе указанных ГОСТов.

### 2.8.2.1. ПОКОВКИ, ПОЛУЧЕННЫЕ ШТАМПОВКОЙ

В соответствии с ГОСТ 7505-89 сначала конкретизируют входные параметры для определения *исходного индекса поковки* (1...23):

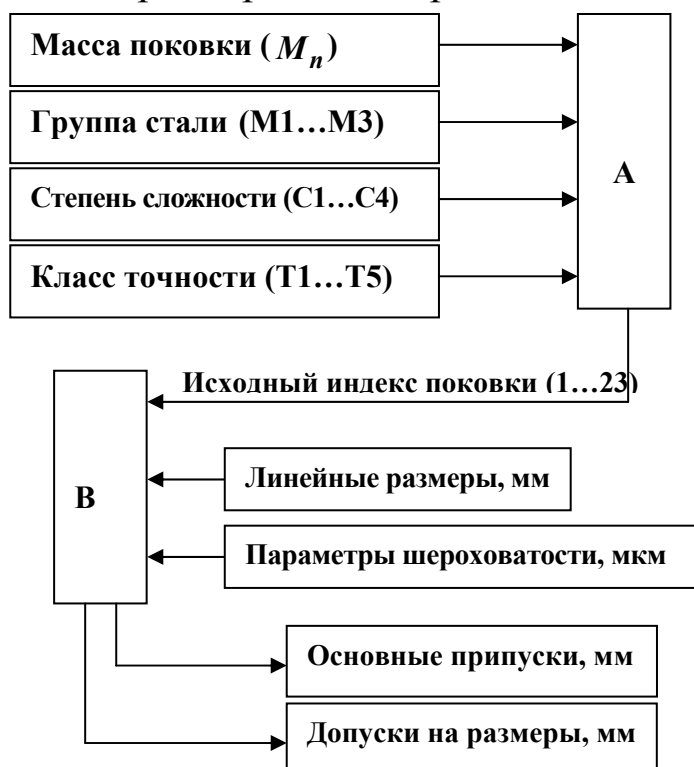


Рис. 2.6. Схема определения припусков на механообработку и допусков на размеры поковки по ГОСТ 7505-89: А - определение исходного индекса поковки; В - определение припусков и допусков.

массу поковки ( $M_n$ ), группу стали (M1, M2, M3), степень сложности поковки (C1, C2, C3, C4), класс точности поковки (T1, T2, T3, T4, T5). Зная исходный индекс поковки, её линейные размеры (мм) и параметры шероховатости поверхности (мкм), определяют основные припуски на механическую обработку и допуски на отклонение размеров поковки (рис. 2.6).

### 2.8.2.2. ПОКОВКИ, ПОЛУЧЕННЫЕ СВОБОДНОЙ КОВКОЙ

Свободная ковка обеспечивает высококачественную структуру материала заготовок и производится для широкого интервала их размеров, включая крупногабаритные (например, заготовки для стволов артиллерийских орудий). Однако в отличие от поковок, полученных горячей штамповкой, свободная ковка обеспечивает меньшую точность размеров. Необходимую информацию по методике определения припусков можно найти в ГОСТ 7062-90.

### 2.8.2.3. ОТЛИВКИ

Схема принятия технологических решений при определении нормативных припусков в соответствии с ГОСТ 26645-85 приведена на рис.2.7 (блоки  $A_o$ ,  $B_o$  и  $C_o$  в указанном ГОСТе представлены таблицами).

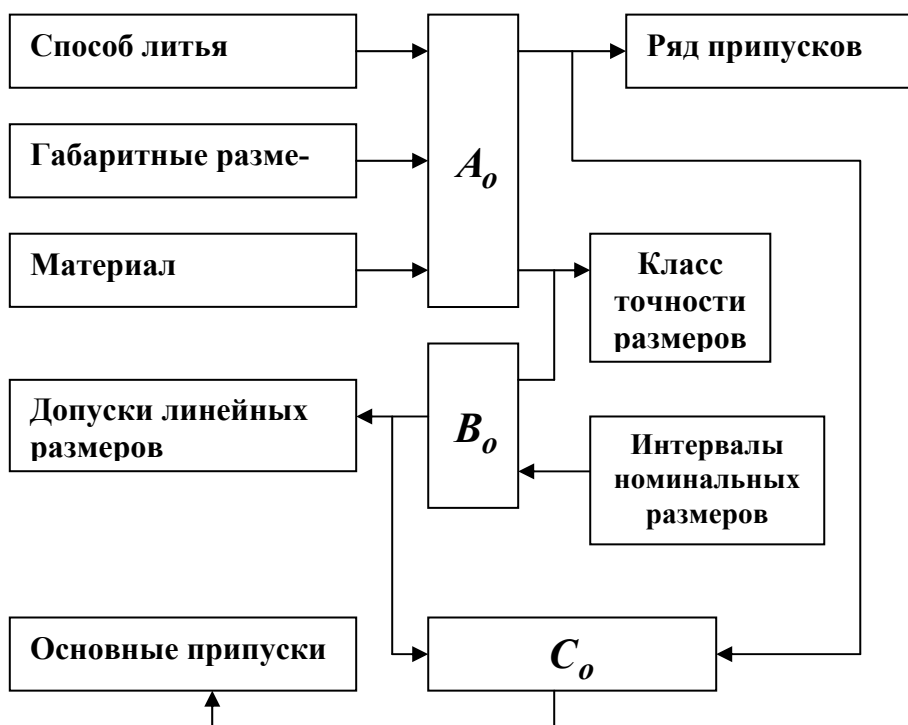


Рис. 2.7. Схема определения припусков на механообработку и допусков на размеры отливки по ГОСТ 26645-85:  $A_o$  - определение ряда припуска и класса точности размеров поковки;  $B_o$  - определение допусков на линейные размеры отливок;  $C_o$  - определение основных припусков на механическую обработку отливок.



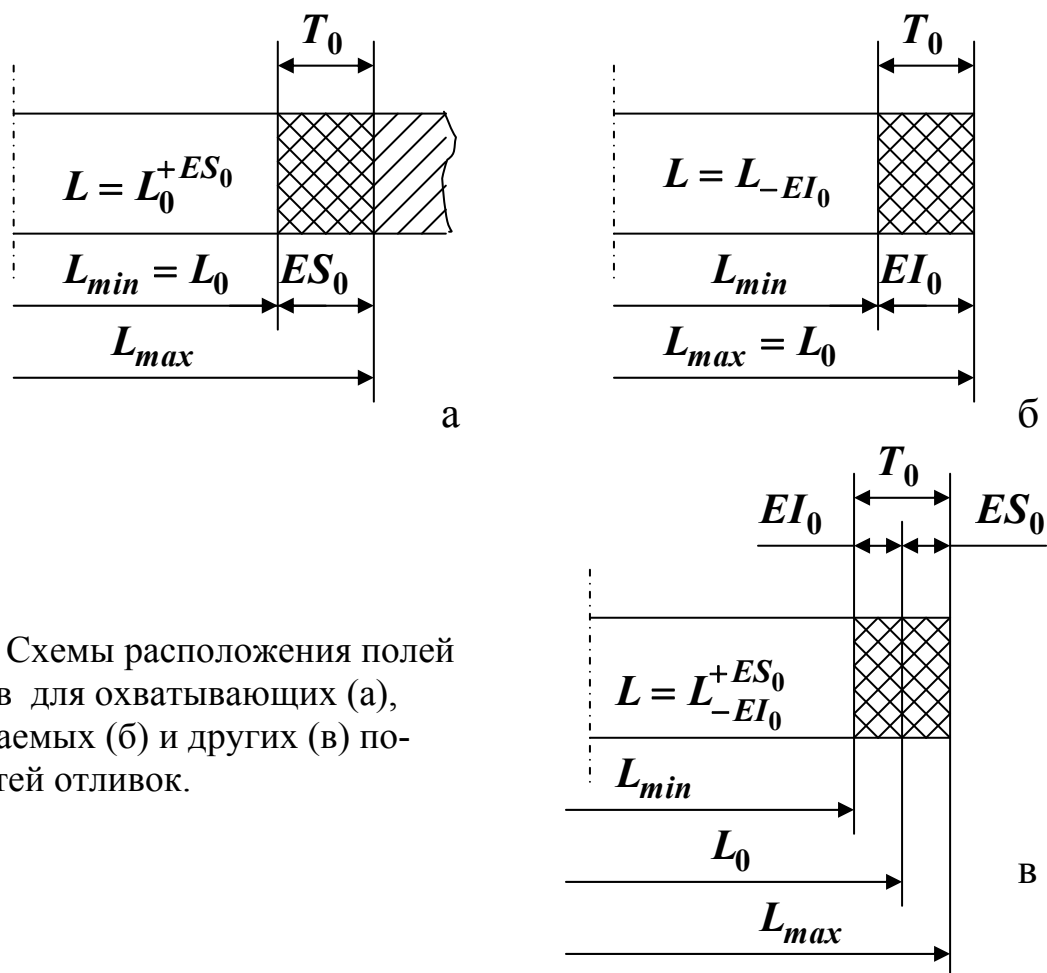


Рис. 2.8. Схемы расположения полей допусков для охватывающих (а), охватываемых (б) и других (в) поверхностей отливок.

Таблица 2.8

Классы точности размеров и масс и ряды припусков на механическую обработку отливок для различных способов литья (по ГОСТ 26645 – 85)

Литье	Наибольшие габаритные размеры отливки, мм	Металлы и сплавы		
		цветные с температурой плавления ниже 700°C	цветные с температурой плавления выше 700°C, серый чугун	ковкий, высокопрочный и легированный чугун, сталь
1	2	3	4	5
Под давлением в металлические формы	До 100	$\frac{3T-5}{1}$	$\frac{3-6}{1}$	$\frac{4-7T}{1}$
	Св. 100	$\frac{3-6}{1}$	$\frac{4-7T}{1}$	$\frac{5T-7}{1}$
В керамические формы и по выплавляемым и выжигаемым моделям	До 100	$\frac{3-6}{1}$	$\frac{4-7T}{1-2}$	$\frac{5T-7}{1-2}$
	Св. 100	$\frac{4-7}{1-2}$	$\frac{5T-7}{1-2}$	$\frac{5-8}{1-2}$

Продолжение табл. 2.8.

1	2	3	4	5
В кокиль и под низким давлением в металлические формы с песчаными стержнями и без них, литье в песчаные формы, отверждаемые в контакте с оснасткой	До 100	$\frac{4-9}{1-2}$	$\frac{5T-10}{1-3}$	$\frac{5-11T}{1-3}$
	Св. 100 до 630	$\frac{5T-10}{1-3}$	$\frac{5-11T}{1-3}$	$\frac{6-11}{2-4}$
	Св. 630	$\frac{5-11T}{1-3}$	$\frac{6-11}{2-4}$	$\frac{7T-12}{2-5}$
В песчаные формы, отверждаемые вне контакта с оснасткой, центробежное, в сварные и сухие песчано-глинистые формы	До 630	$\frac{6-11}{2-4}$	$\frac{7T-12}{2-4}$	$\frac{7-13T}{2-5}$
	Св. 630 до 4000	$\frac{7-12}{2-4}$	$\frac{8-13T}{3-5}$	$\frac{9T-13}{3-6}$
	Св. 4000	$\frac{8-13T}{3-5}$	$\frac{9T-13}{3-6}$	$\frac{9-14}{4-6}$

Примечания:

1. В числителе указаны классы точности размеров и масс, в знаменателе - ряды припусков. Меньшие их значения относятся к простым отливкам и условиям массового автоматизированного производства; большие значения - к сложным, мелкосерийно и индивидуально изготовленным отливкам; средние значения - к отливкам средней сложности и условиям механизированного серийного производства.

2. Классы точности масс следует принимать соответствующими классам точности отливок.

В соответствии с ГОСТ 26645-85 сначала конкретизируют входные факторы (параметры) для определения ряда припусков и класса точности размеров отливок (блок  $A_o$  на рис. 2.7). Выбрав класс точности размеров, и определившись с интервалом номинальных размеров, определяют допуски линейных размеров (блок  $B_o$ ). Зная ряд припусков и допуски линейных размеров, определяют основные припуски (блок  $C_o$ ). Расположение полей допусков относительно номинального размера отливок выбирают в соответствии с рекомендациями, приведенными на рис. 2.8 [368].

Для реализации схемы определения припусков (рис. 2.7) ниже приведены соответствующие табличные данные [269], причём блокам  $A_o$ ,  $B_o$  и  $C_o$  соответствуют табл. 2.8, табл. 2.9 и табл. 2.10.

Таблица 2.9

Допуски линейных размеров отливок (мм, не более) по ГОСТ 26645 - 85

Интервалы номинальных размеров, мм	Класс точности размеров отливок							
	1	2	3т	3	4	5т	5	6
1	2	3	4	5	6	7	8	9
До 4	0,06	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20	0,24	0,32
Св. 4 до 6	0,07	0,09	0,11	0,14	0,18	0,22	0,28	0,36
» 6 » 10	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20	0,24	0,32	0,40
» 10 » 16	0,09	0,11	0,14	0,18	0,22	0,28	0,36	0,44
» 16 » 25	0,10	0,12	0,16	0,20	0,24	0,32	0,40	0,50
» 25 » 40	0,11	0,14	0,18	0,22	0,28	0,36	0,44	0,56
» 40 » 63	0,12	0,16	0,20	0,24	0,32	0,40	0,50	0,64
» 63 » 100	0,14	0,18	0,22	0,28	0,36	0,44	0,56	0,70
» 100 » 160	0,16	0,20	0,24	0,32	0,40	0,50	0,64	0,80
» 160 » 250	—	—	0,28	0,36	0,44	0,56	0,70	0,90
» 250 » 400	—	—	0,32	0,40	0,50	0,64	0,80	1,00
» 400 » 630	—	—	—	—	0,56	0,70	0,90	1,10
» 630 » 1000	—	—	—	—	—	0,80	1,00	1,20
» 1000 » 1600	—	—	—	—	—	—	—	1,40
» 1600 » 2500	—	—	—	—	—	—	—	—
» 2500 » 4000	—	—	—	—	—	—	—	—
» 4000 » 6300	—	—	—	—	—	—	—	—
» 6300 » 10000	—	—	—	—	—	—	—	—
Интервалы номинальных размеров, мм	Класс точности размеров отливок							
	7т	7	8	9т	9	10	11т	11
10	11	12	13	14	15	16	17	18
До 4	0,40	0,50	0,64	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0
Св. 4 до 6	0,44	0,56	0,7	0,9	1,1	1,4	1,8	2,2
» 6 » 10	0,50	0,64	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4
» 10 » 16	0,56	0,70	0,9	1,1	1,4	1,8	2,2	2,8
» 16 » 25	0,64	0,80	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4	3,2
» 25 » 40	0,70	0,90	1,1	1,4	1,8	2,2	2,8	3,6
» 40 » 63	0,80	1,00	1,2	1,6	2,0	2,4	3,2	4,0
» 63 » 100	0,90	1,10	1,4	1,8	2,2	2,8	3,6	4,4
» 100 » 160	1,00	1,20	1,6	2,0	2,4	3,2	4,0	5,0
» 160 » 250	1,10	1,14	1,8	2,2	2,8	3,6	4,4	5,6
» 250 » 400	1,20	1,60	2,0	2,4	3,7	4,0	5,0	6,4
» 400 » 630	1,40	1,80	2,2	2,8	3,6	4,4	5,6	7,0

Продолжение табл.2.9

10	11	12	13	14	15	16	17	18
» 630 » 1000	1,6	2,0	2,4	3,2	4,0	5,0	6,4	8,0
» 1000 » 1600	1,8	2,2	2,8	3,6	4,4	5,6	7,0	9,0
» 1600 » 2500	2,0	2,4	3,2	4,0	5,0	6,4	8,0	10,0
» 2500 » 4000	—	3,2	3,6	4,4	5,6	7,0	9,0	11,0
» 4000 » 6300	—	—	—	5,0	6,4	8,0	10,0	12,0
»6300 » 10000	—	—	—	—	8,0	10,0	12,0	16,0
Интервалы номиналь- ных размеров, мм	Класс точности размеров отливок							
	12	13т	13	14	15	16		
19	20	21	22	23	24	25		
До 4	—	—	—	—	—	—	—	
Св. 4 до 6	2,8	—	—	—	—	—	—	
» 6 » 10	3,2	4,0	5,0	—	—	—	—	
» 10 » 16	3,6	4,4	5,6	7	—	—	—	
» 16 » 25	4,0	5,0	6,4	8	10	12		
» 25 » 40	4,4	5,6	7,0	9	11	14		
» 40 » 63	5,0	6,4	8,0	10	12	16		
» 63 » 100	5,6	7,0	9,0	11	14	18		
» 100 » 160	6,4	8,0	10,0	12	16	20		
» 160 » 250	7,0	9,0	11,0	14	18	22		
» 250 » 400	8,0	10,0	12,0	16	20	24		
» 400 » 630	9,0	11,0	14,0	18	22	28		
» 630 » 1000	10,0	12,0	16,0	20	24	32		
» 1000 » 1600	11,0	14,0	18,0	22	28	36		
» 1600 » 2500	12,0	16,0	20,0	24	32	40		
» 2500 » 4000	14,0	18,0	22,0	28	36	44		
» 4000 » 6300	16,0	20	24,0	32	40	50		
»6300 » 10000	20,0	24	32,0	40	50	64		

Примечания:

1. Классы точности размеров отливок - табл. 2.8.
2. Допуски размеров, указанные в табл.2.8, не учитывают смещение и коробление отливок.
3. Допуски угловых размеров в пересчете на линейные не должны превышать значений, установленных в табл.2.8.
4. Допуски размеров элементов отливки, образованных двумя полуформами, перпендикулярными к плоскости разъема, следует устанавливать соответствующими классу точности размеров отливки. Допуски размеров элементов отливки, образованных одной частью формы или одним стержнем, устанавливают на 1–2 класса точнее. Допуски размеров элементов, образованных тремя частями формы и более, несколькими стержнями или подвижными элементами формы, а также толщины стенок, ребер и фланцев устанавливают на 1–2 класса грубее.
5. Допуски размеров от предварительно обработанной поверхности, используемой в качестве базы, до литой поверхности следует устанавливать на 2 класса точнее.

6. Допускается устанавливать симметричные и несимметричные предельные отклонения, при этом предпочтительно следующее расположение полей допусков: несимметричные односторонние «в тело» — для размеров элементов отливки (кроме толщин стенок), расположенных в одной части формы и не подвергаемых механической обработке, при этом для охватывающих элементов (отверстие) поле допуска располагают «в плюс», а для охватываемых элементов (вал) — «в минус»; симметричные — для размеров всех остальных элементов отливок, как не подвергаемых, так и подвергаемых механической обработке (рис.2.8).

Таблица 2.10

Основные припуски на механическую обработку отливок (по ГОСТ 26645 – 85)

Допуск размеров отливок, мм	Основной припуск на сторону для рядов, мм, не более		
	1	2	3
До 0,12	0,2; 0,4	—	—
Св. 0,12 до 0,16	0,3; 0,5	0,6; 0,8	—
» 0,16 » 0,20	0,4; 0,6	0,7; 1,0	1,0; 1,4
» 0,20 » 0,24	0,5; 0,7	0,8; 1,1	1,1; 1,5
» 0,24 » 0,30	0,6; 0,8	0,9; 1,2	1,2; 1,6
» 0,30 » 0,40	0,7; 0,9	1,0; 1,3	1,4; 1,8
» 0,40 » 0,50	0,8; 1,0	1,1; 1,4	1,5; 2,0
» 0,50 » 0,60	0,9; 1,2	1,2; 1,6	1,6; 2,2
» 0,60 » 0,80	1,0; 1,4	1,3; 1,8	1,8; 2,4
» 0,80 » 1,0	1,1; 1,6	1,4; 2,0	2,0; 2,8
» 1,0 » 1,2	1,2; 2,0	1,6; 2,4	2,2; 3,0
» 1,2 » 1,6	1,6; 2,4	2,0; 2,8	2,4; 3,2
» 1,6 » 2,0	2,0; 2,8	2,4; 3,2	2,8; 3,6
» 2,0 » 2,4	2,4; 3,2	2,8; 3,6	3,2; 4,0
» 2,4 » 3,0	2,8; 3,6	3,2; 4,0	3,6; 4,5
» 3,0 » 4,0	3,4; 4,5	3,8; 5,0	4,2; 5,5
» 4,0 » 5,0	4,0; 5,5	4,4; 6,0	5,0; 6,5
» 5,0 » 6,0	5,0; 7,0	5,5; 7,5	6,0; 8,0
» 6,0 » 8,0	—	6,5; 9,5	7,0; 10,0
» 8,0 » 10,0	—	—	9,0; 12,0
» 10,0 » 12,0	—	—	10,0; 13,0
» 12,0 » 16,0	—	—	13,0; 15,0
» 16,0 » 20,0	—	—	—
» 20,0 » 24,0	—	—	—
» 24,0 » 30,0	—	—	—
» 30,0 » 40,0	—	—	—
» 40,0 » 50,0	—	—	—
» 50,0 » 60,0	—	—	—

Допуск размеров отливок, мм	Основной припуск на сторону для рядов, мм, не более		
	4	5	6
До 0,12	—	—	—
Св. 0,12 до 0,16	—	—	—
» 0,16 » 0,20	—	—	—
» 0,20 » 0,24	—	—	—
» 0,24 » 0,30	1,8; 2,2	2,6; 3,0	—
» 0,30 » 0,40	1,9; 2,4	2,8; 3,2	—
» 0,40 » 0,50	2,0; 2,6	3,0; 3,4	—
» 0,50 » 0,60	2,2; 2,8	3,2; 3,6	—
» 0,60 » 0,80	2,4; 3,0	3,4; 3,8	4,4; 5,0
» 0,80 » 1,0	2,6; 3,2	3,6; 4,0	4,6; 5,5
» 1,0 » 1,2	2,8; 3,4	3,8; 4,2	4,8; 6,0
» 1,2 » 1,6	3,0; 3,8	4,0; 4,6	5,0; 6,5
» 1,6 » 2,0	3,4; 4,2	4,2; 5,0	5,5; 7,0
» 2,0 » 2,4	3,8; 4,6	4,6; 5,5	6,0; 7,5
» 2,4 » 3,0	4,2; 5,0	5,0; 6,5	6,5; 8,0
» 3,0 » 4,0	5,0; 6,5	5,5; 7,0	7,0; 9,0
» 4,0 » 5,0	5,5; 7,5	6,0; 8,0	8,0; 10,0
» 5,0 » 6,0	6,5; 8,5	7,0; 9,5	9,0; 11,0
» 6,0 » 8,0	7,5; 11,0	8,5; 12,0	10,0; 13,0
» 8,0 » 10,0	10,0; 13,0	11,0; 14,0	12,0; 15,0
» 10,0 » 12,0	11,0; 14,0	12,0; 15,0	13,0; 16,0
» 12,0 » 16,0	14,0; 16,0	15,0; 17,0	16,0; 19,0
» 16,0 » 20,0	17,0; 20,0	18,0; 21,0	19,0; 22,0
» 20,0 » 24,0	20,0; 23,0	21,0; 24,0	22,0; 25,0
» 24,0 » 30,0	—	26,0; 29,0	27,0; 30,0
» 30,0 » 40,0	—	—	34,0; 37,0
» 40,0 » 50,0	—	—	42,0
» 50,0 » 60,0	—	—	50,0

## Примечания:

1. Для каждого интервала значений допусков размеров отливки в каждом ряду припусков предусмотрены два значения основного припуска.
2. Меньшие значения припуска устанавливают при более грубых качествах точности обработки деталей, большие значения припуска устанавливают при более точных качествах согласно данным табл.2.11.

Таблица 2.11

Значения параметров точности

Класс точности размеров отливок	1-3т	3-5т	5-7	7-9т	9-16
Квалитет точности размеров деталей, получаемых механической обработкой отливок	IT9 и грубее	IT10 и грубее	IT11 и грубее	IT12 и грубее	IT13 и грубее
	IT8 и точнее	IT8-IT9	IT9-IT10	IT9-IT11	IT10-IT12

3. При более высоких требованиях к точности размеров обрабатываемых деталей допускается увеличение основного припуска до ближайшего большего значения из того же ряда [269].

#### 2.8.2.4. ПРОКАТ

Схема принятия технологических решений в соответствии с ГОСТ 2590-88 предусматривает использование следующих входных параметров: номинальный диаметр детали (по чертежу) и отношение длины детали  $L$  к диаметру заготовки  $D$  (рис. 2.9) Найденное отношение  $L/D$  проверяется на соответствие его одному из следующих случаев:  $L/D \leq 4$ ,  $L/D \leq 8$ ,  $L/D \leq 12$  и  $L/D \leq 20$ .

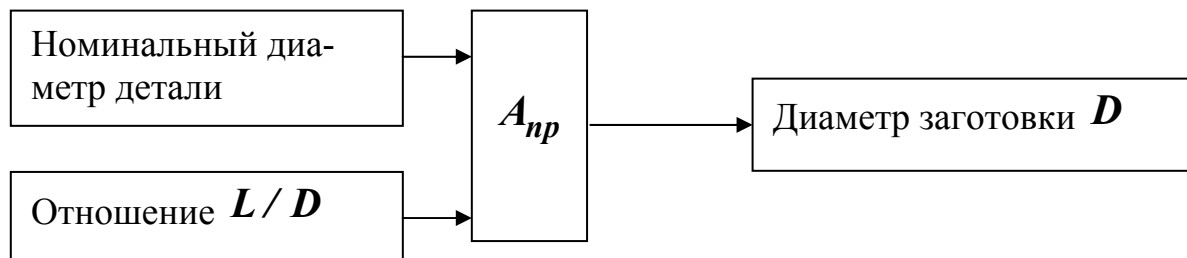


Рис. 2.9. Схема выбора диаметра заготовки для деталей из круглого сортового проката по ГОСТ 2590-88:  $A_{np}$  – определение диаметра заготовки.

Таблица 2.12

Выбор диаметра заготовки для деталей, изготовляемых из круглого сортового проката по ГОСТ 2590-88

Номинальный диаметр детали	Диаметр заготовки $D$ в зависимости от длины детали $L$							
	$L/D \leq 4$		$L/D \leq 8$		$L/D \leq 12$		$L/D \leq 20$	
	$L$	$D$	$L$	$D$	$L$	$D$	$L$	$D$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	20	7	40	7	60	7	100	8
6	24	8	48	8	72	8	120	8

Продолжение табл.2.12

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	28	9	56	9	84	9	140	9
8	32	10	64	10	96	10	160	11
9	36	11	72	11	108	11	180	12
10	40	12	80	12	120	13	200	13
11	44	13	88	13	132	13	220	13
12	48	14	96	14	144	15	240	15
13	52	15	104	15	156	16	260	16
14	56	16	112	16	168	17	280	17
15	60	17	120	17	180	18	300	18
16	64	18	128	18	192	18	320	19
17	68	19	136	19	204	20	340	20
18	72	20	144	20	216	21	360	21
19	76	21	152	21	228	22	380	22
20	80	22	160	22	240	23	400	24
21	84	24	168	24	252	24	420	25
23	92	26	184	26	276	26	460	27
24	96	27	192	27	288	27	480	28
25	100	28	200	28	300	28	500	30
26	104	30	208	30	312	30	520	30
27	108	30	216	30	324	32	540	32
28	112	32	224	32	336	32	560	32
30	120	33	240	33	360	34	600	34
32	128	35	256	35	384	36	640	36
34	132	38	264	38	396	38	680	38
35	140	38	280	38	420	39	700	39
36	144	39	288	40	432	40	720	40
38	152	42	304	42	456	42	760	43
40	160	43	320	45	480	45	800	48
42	168	45	336	45	504	48	840	48
44	176	48	352	48	528	50	880	50
45	180	48	360	48	540	50	900	50
46	184	50	368	50	552	52	920	52
48	192	52	384	52	576	54	960	54
50	200	54	400	54	600	55	1000	55
52	208	55	416	55	624	56	1040	56
54	216	58	432	60	648	60	1080	62
55	220	60	440	60	660	62	1100	65
58	232	62	461	62	696	65	1160	68
60	240	65	480	65	720	68	1200	70
62	248	68	496	68	744	70	1240	72
65	260	70	520	70	780	72	1300	75



Продолжение табл.2.12

1	2	3	4	5	6	7	8	9
68	272	72	544	72	816	72	1360	78
70	280	75	560	75	840	78	1400	80
72	288	78	576	78	864	80	1440	85
75	300	80	600	80	900	80	1500	90
78	312	85	624	85	936	90	1560	90
80	320	85	640	90	960	95	1600	95
82	328	90	656	95	984	95	1640	95
85	340	90	680	95	1020	95	1700	100
88	352	95	704	100	1056	100	1760	105
90	360	95	720	100	1080	105	1800	105
92	368	100	736	100	1104	105	1840	110
95	380	100	760	105	1140	110	1900	110
98	392	105	784	110	1176	110	1960	115
100	400	105	800	110	1200	115	2000	115
105	420	110	840	115	1260	120	2100	120
110	440	115	880	120	1320	125	2200	125
115	460	120	920	125	1380	130	2300	130
120	480	125	960	130	1440	130	2400	135
125	500	130	1000	130	1500	135	2500	140
130	520	135	1040	140	1560	140	2600	150
135	540	140	1080	140	1620	150	2700	150
140	560	150	1120	150	1680	160	2800	160

Примечания:

1. Диаметры заготовок определены с учетом черновой, получистовой и чистой обработки деталей типа тел вращения. В зависимости от конфигурации деталей диаметры заготовок могут быть уточнены.
2. Диаметры заготовок для ступенчатых валов выбирают по максимальному диаметру ступени. В тех случаях, когда эту ступень не требуется обрабатывать с высокой точностью, диаметр заготовки может быть уменьшен.
3. Предусмотрена правка заготовок диаметром до 30 мм.

Реализация схемы по рис. 2.9 может быть произведена по справочной табл. 2.12 [269].

### 2.8.3. РАСЧЁТ ПРИПУСКОВ НА ОСНОВЕ ТАБЛИЧНОГО (ОПЫТНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО) МЕТОДА

Определение припусков на механическую обработку производится расчетно-аналитическим и табличным методами.

В учебных целях расчетно-аналитическим методом определяют

межоперационные и общие припуски на 2-3 размера, относящиеся к характерным, наиболее ответственным поверхностям детали (внутренние поверхности основных отверстий корпусных деталей, наружные поверхности валов и т.п.). Для всех остальных обрабатываемых поверхностей как операционные (переходные), так и общие припуски определяют табличным методом.

*Нормативные общие припуски* на механическую обработку заготовок назначают по таблицам ГОСТов в зависимости от видов заготовки и способа ее изготовления. Так, общие припуски и допускаемые отклонения размеров заготовок могут быть получены по следующим стандартам:

1. Для проката сплошного горячекатаного круглого – ГОСТ 2590-88.
2. Для поковок из углеродистой и легированной стали, изготавливаемых (свободной) ковкой на (гидравлических) прессах – ГОСТ 7062-90.
3. Для поковок стальных штампованных (на всех видах оборудования) – ГОСТ 7505-89.
4. Для отливок из металлов и сплавов – ГОСТ 26645-85.

*Межоперационные табличные припуски*, а также припуски на отдельные переходы устанавливаются по специальным таблицам, приводимым в справочной литературе [393]. Однако часто не оговаривается, какие это припуски: номинальные или минимальные. Поэтому на этапе предварительного проектирования с точки зрения обеспечения технологического запаса по припуску можно считать эти припуски минимальными (как аналог минимальных расчётных припусков). В рассмотренном ниже примере межоперационные табличные припуски являются номинальными. Межоперационные табличные припуски должны быть указаны наряду с величиной общего припуска на механическую обработку рассматриваемой поверхности. По тем же таблицам можно назначить и допуски на операционные (переходные) размеры заготовки, исходя из следующих основных условий:

- а) допуски не должны превышать экономической точности обработки;
- б) допуски должны быть выбраны с учетом размеров припусков, так как пределы дают наибольший и наименьший размеры припуска;
- в) допуски должны быть выбраны с учетом конечной точности размера готовой детали [237].

**Пример.** Определим межоперационные размеры и общий номинальный припуск для цилиндрической поверхности вала  $\varnothing 80\text{ m}6$  [60, 80]. Чертёж детали приведен на рис.2.10. Эту деталь изготавливают из стали 40Х ГОСТ 4543-71. Масса детали 14,74 кг. Вал достаточно

жѳсткий, так как  $L/d = 415/82,6 = 5$ . Твѳрдость детали обеспечивают термической обработкой – закалкой и отпуском, причѳм эту обработку можно выполнить или для исходной заготовки, или непосредственно перед шлифовальной операцией.

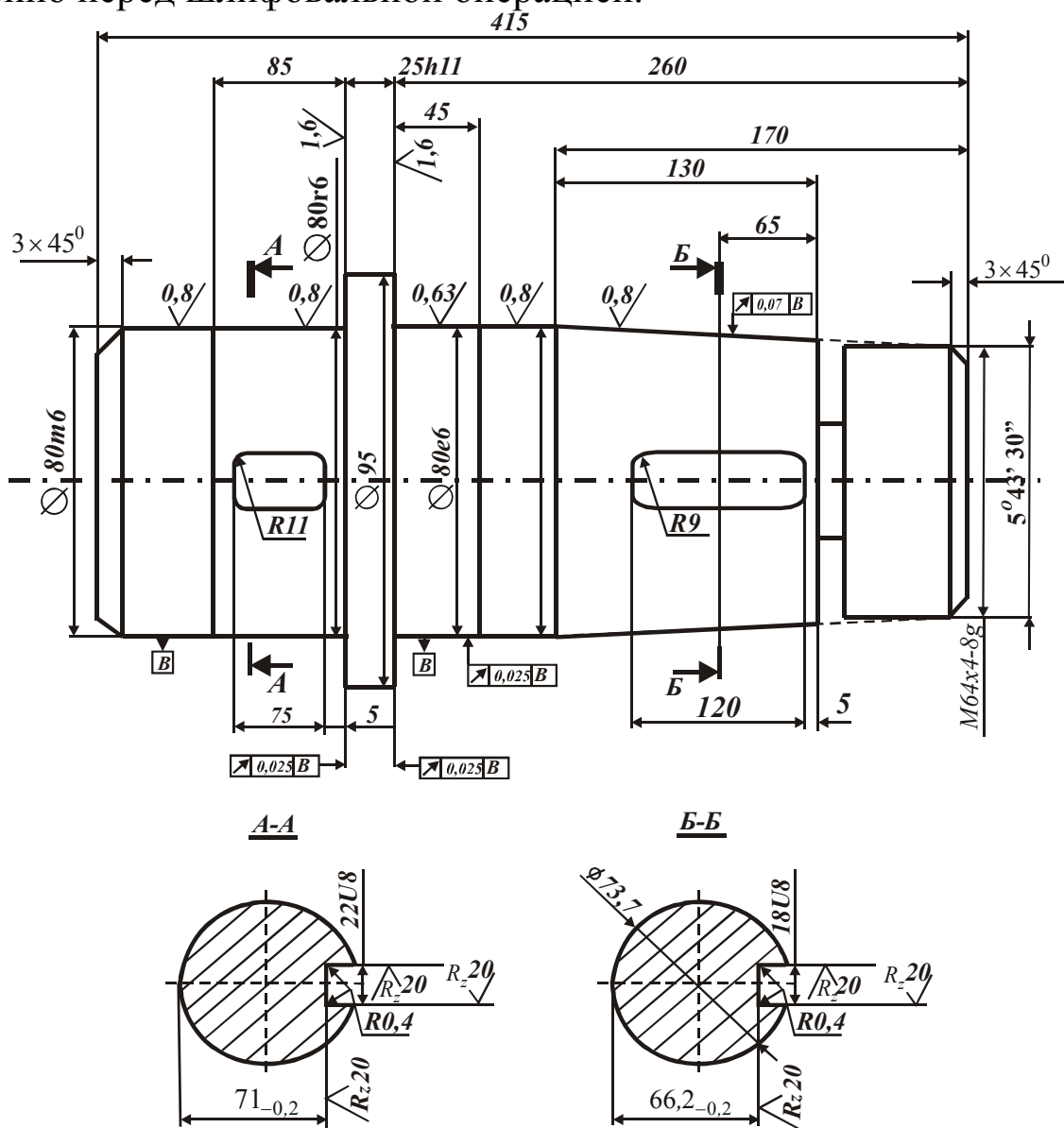


Рис.2.10. Чертеж детали «вал».

Данные о рассматриваемой поверхности (шейки вала): точность – 6-й квалитет (достигается шлифованием), поле допуска  $m$ , шероховатость  $R_a=0,63$  мкм. Шейка вала предназначена для установки шарикоподшипника, её чертѳжные размеры: диаметр  $\varnothing = 80\text{ мм} \begin{pmatrix} +0,011 \\ +0,03 \end{pmatrix}$ , длина  $L=45$  мм. Поковка (рис. 2.11) получена на молоте: масса поковки 18,95 кг, коэффициент использования материала КИМ = 0,78, шероховатость поверхности поковки  $R_z = 200$  мкм ( $R_a = 60$  мкм). По-

верхность поковки штампованной, соответствующая рассматриваемой поверхности детали, имеет размер  $d_{заг} = 86,6^{+1,3}_{-0,7}$  мм. Определенные припуски производят по следующей схеме [80].

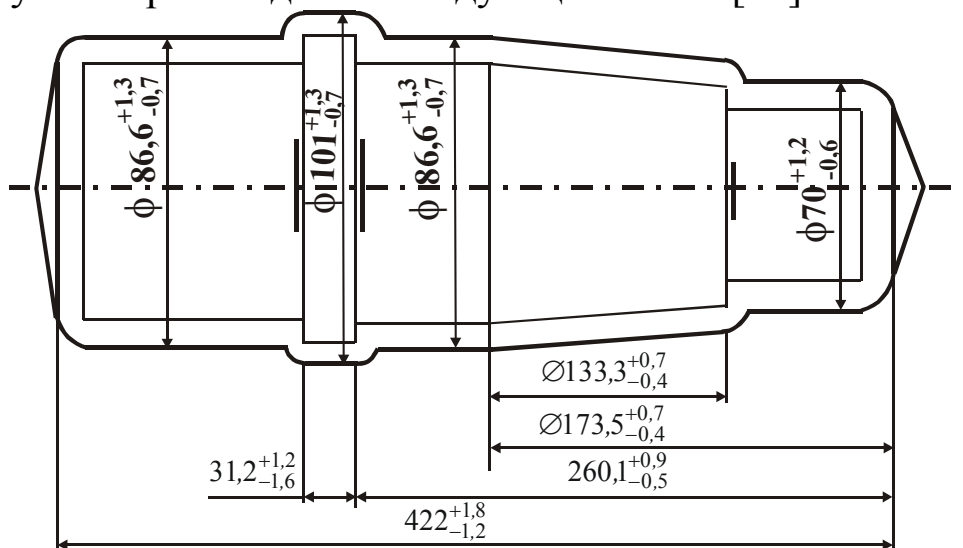


Рис. 2.11. Чертёж заготовки для детали «вал».

1. Определение общего припуска на обработку. Причём

$$2Z_{общ} = d_{заг} - d_{д.исх}, \quad (2.37)$$

где  $d_{заг}$  - номинальный размер заготовки;  $d_{д.исх}$  - исходный диаметр детали.

В качестве  $d_{д.исх}$  для валов принимают наибольший предельный размер, а для отверстий – наименьший [80]. Получаем

$$2Z_{общ} = 86,6 - 80,03 = 6,57 \text{ мм.}$$

2. Определение необходимого количества технологических переходов (операций производим по формуле) [393]

$$n = \frac{\lg \varepsilon_{общ}}{0,5}. \quad (2.38)$$

Здесь

$$\varepsilon_{общ} = \frac{T_{заг}}{T_{д}}, \quad (2.39)$$

где  $\varepsilon_{общ}$  – общее уточнение;  $T_{заг}$ ,  $T_{д}$  – допуски заготовки и детали, соответственно.

В рассматриваемом случае  $T_{заг} = 1,3 + 0,7 = 2,0$  мм;

$$T_{д} = 0,03 - 0,011 = 0,019 \text{ мм.}$$

Следовательно,  $\varepsilon_{общ} = 2/0,019 = 105,3$ ;  $n = \frac{\lg 105,3}{0,5} \approx 4$ .

Таким образом, в структуре припуска должно быть 4 технологических перехода (два перехода точения и два перехода шлифования).

3. Выбираем последовательность обработки в соответствии с табл.2.13.

Таблица 2.13

Характеристика маршрута обработки поверхности

Номер	Маршрут обработки поверхности	Квалитеты и обозначение	Величина допуска, мм	Параметр шероховатости $R_a$ , мкм
1	2	3	4	5
1	Точить предварительно	12(h12)	- 0,35	20
2	Точить под шлифование	9(h9)	- 0,087	5
3	Шлифовать предварительно	7(h7)	- 0,035	1,25
4	Шлифовать окончательно	6(m6)	+0,030 +0,011	0,63

4. Выбор промежуточных операционных припусков. По источнику [393, с.565, приложение 4] выбираем припуск (на диаметр) на чистовое обтачивание (под шлифование):  $2Z_2=1,2$  мм. Припуск на шлифование  $2Z_3 + 2Z_4= 0,5$  мм [393, с.565, приложение 5]. Так как шлифование производится за 2 перехода (предварительное и окончательное), делим этот припуск на две части в отношении 3:1 (для предварительного и окончательного шлифования, соответственно). Получаем,  $2Z_3= 0,35$  мм и  $2Z_4= 0,15$  мм.

Припуск на предварительное точение можно определить двумя путями. По таблице [393, с.564, приложение 2]  $2Z_1=2,8$  мм. Или по формуле [60, с.50]

$$2Z_1 = 2Z_{общ} - \sum_{i=2}^n 2Z_i, \quad (2.40)$$

где  $2Z_1$  – операционный припуск на первый переход (предварительное точение), мм;  $2Z_{общ}$  – общий (нормативный) припуск на механическую обработку, установленный при проектировании заготовки, мм;  $2Z_i$  – промежуточный припуск на  $i$ -й ( $i = 2...n$ ) технологический переход, мм;  $n$  – установленное (принятое) количество технологических переходов для удаления общего припуска.

По формуле (2.40) получаем

$$2Z_1 = 6,57 - (1,2 + 0,35 + 0,15) = 4,87 \text{ мм.}$$

Из двух найденных значений  $2Z_1 = 2,8$  мм и  $2Z_1 = 4,87$  мм принимаем большее значение, т.е.  $2Z_1 = 4,87$  мм (отметим здесь неоднозначность принимаемого технологического решения: припуск на первый технологический переход можно выбрать от  $2Z_1 = 2,8$  мм до  $2Z_1 = 4,87$  мм).

Результаты определения табличных межоперационных припусков сводим в таблицу (табл. 2.14).

Таблица 2.14

Межоперационные припуски				
Припуск на диаметр, мм				
Общий	Промежуточный			
$2Z_{общ}$	$2Z_1$	$2Z_2$	$2Z_3$	$2Z_4$
6,57	4,87	1,2	0,35	0,15

Таблица 2.15

Определение межоперационных размеров заготовки по промежуточным табличным номинальным припускам

Номер перехода	Наименование размера и припуска	Обозначение размера и припуска	Промежуточный размер (диаметр), мм	Шероховатость $R_a$ , мкм
4	Диаметр после окончательного шлифования	$d_{\delta} = d_{черт}$	$80 m6 \left( \begin{smallmatrix} +0,030 \\ +0,011 \end{smallmatrix} \right)$	0,63
	Исходный (расчётный) размер	$d_{исх}$	80,030	
	Припуск на окончательное шлифование	$+2Z_4$	+0,15	
3	Диаметр после предварительного шлифования	$d_{расч.3}$	$80,18 h7 \left( \begin{smallmatrix} -0,035 \end{smallmatrix} \right)$	1,25
	Припуск на предварительное шлифование	$+2Z_4$	+0,35	
2	Диаметр после точения под шлифование	$d_{расч.2}$	$80,53 h9 \left( \begin{smallmatrix} -0,087 \end{smallmatrix} \right)$	5,0
	Припуск на точение под шлифование	$+2Z_2$	+1,2	
1	Диаметр после чернового точения	$d_{расч.1}$	$81,73 h12 \left( \begin{smallmatrix} -0,35 \end{smallmatrix} \right)$	10
	Припуск на предварительное точение	$+2Z_1$	+4,87	
0	Проверка расчетов	—	—	63
	Диаметр поковки	$d_{расч.0}$	$86,6 \begin{smallmatrix} +1,3 \\ -0,7 \end{smallmatrix}$	

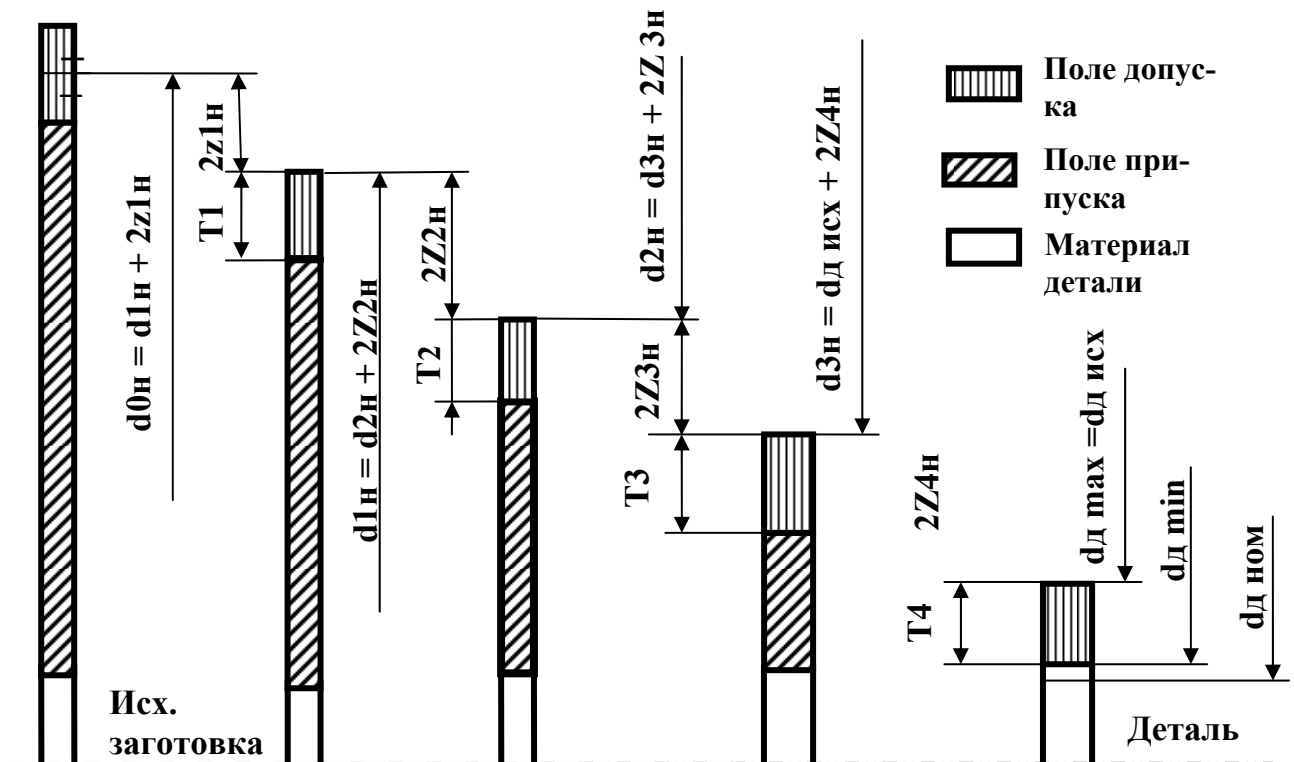


Рис. 2.12. Расположение полей припусков и допусков (и промежуточных номинальных размеров).

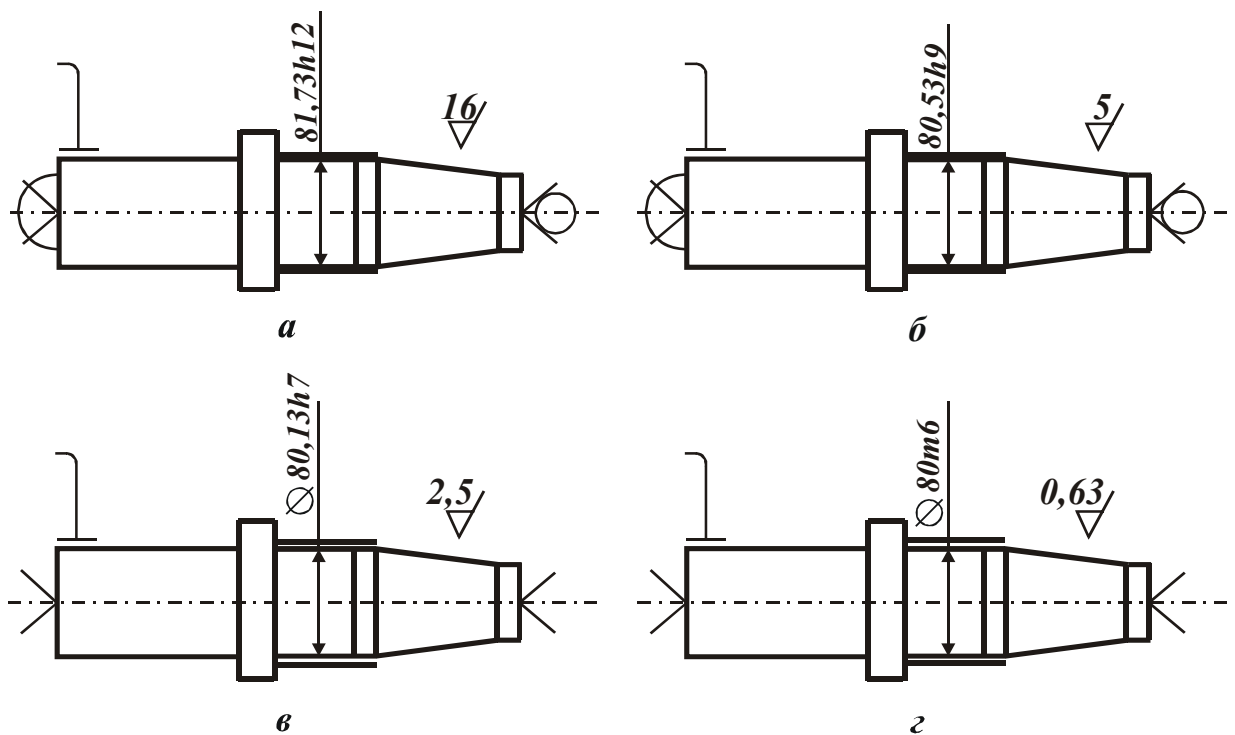


Рис. 2.13. Операционные эскизы заготовки с проставленными промежуточными размерами (табл. 2.15) после предварительного точения (а), точения под шлифование (б), предварительного (в) и окончательного (г) шлифования.

Определение межоперационных (межпереходных) промежуточных размеров заготовки в процессе её механической обработки производим, заполняя табл. 2.15.

Результаты расчётов представлены графически на рис. 2.12. Следует обратить внимание на то, что номинальный размер детали меньше минимального её размера (номинальный размер 80 мм, а минимальный 80,011 мм). При этом расчёт промежуточных номинальных размеров заготовки начинается от *исходного* размера детали, который равен максимальному её размеру, т.е.  $d_{исх} = 80,030$  мм. Другими словами исходный размер детали ( $d_{исх}$ ) в данном случае является как бы условно-номинальным (принятым за номинальный) и соответствует правилу расположения поля допуска относительно номинального размера: «в тело» детали. Другой случай, когда за номинальный размер детали принят её фактический номинальный размер (80 мм) рассмотрен в расчётно-аналитическом методе определения припусков (пример в подразделе 2.8.4).

Результаты расчёта промежуточных размеров заготовки отражают на операционных эскизах (рис. 2.13).

#### 2.8.4. РАСЧЁТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИПУСКОВ

Впервые метод был предложен профессором Кованом В. М. [279, с.244] и, в отличие от предыдущего метода, основан на вычислении минимальных промежуточных припусков.

##### 2.8.4.1. СТРУКТУРА МИНИМАЛЬНОГО ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПРИПУСКА

Расчёт основан на определении четырёх независимых составляющих: 1) высоты микронеровностей  $R_z$ , полученной на предшествующем переходе обработки данной поверхности; 2) глубины дефектного поверхностного слоя  $T$ , полученного на предшествующем технологическом переходе; 3) пространственного отклонения  $\rho$ , оставшегося от предшествующего технологического перехода; 4) погрешности установки  $\varepsilon_y$ , характеризующей отклонение от требуемого положения заготовки на выполняемом переходе



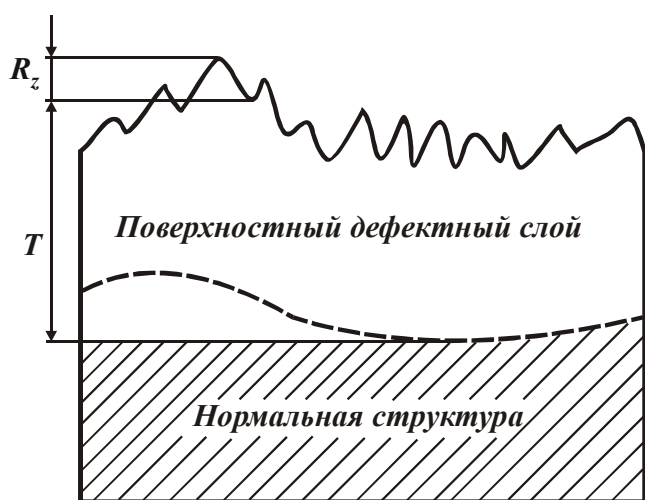


Рис. 2.14. Сечение поверхностного слоя заготовки.

Составляющие  $R_z$  и  $T$  (рис. 2.14,б) можно найти в соответствующих справочных таблицах [64, 368].

Каждому технологическому переходу свойственна определённая шероховатость поверхности ( $R_z$  на рис. 2.14), которая зависит от метода механической обработки. Глубина дефектного поверхностного слоя ( $T$  на рис. 2.14) характеризует толщину

слоя с изменённой структурой. Этот слой подлежит либо полному, либо частичному удалению на выполняемом переходе. Например, у отливок из серого чугуна дефектным слоем является пригар. У стальных отливок дефектный слой представляет собой обезуглероженную зону, которая снижает предел усталости металла. При механической лезвийной обработке стальных заготовок в поверхностном слое возникает зона наклёпа. При последующей механической обработке целесообразно удалять не всю зону наклёпа, а только верхнюю её часть, в которой имеются микротрещины и резко выраженные деформации. При шлифовании дефектным является слой шлифовочных прижогов и микротрещин, который резко снижает эксплуатационные свойства шлифованных деталей (возрастает интенсивность износа деталей и увеличивается вероятность их внезапного разрушения).

*Пространственные отклонения* ( $\rho$ ) возникают из-за неточного изготовления исходных заготовок и, как правило, уменьшаются при последующей механической обработке. Примеры пространственных отклонений: искривление и коробление заготовки, эксцентricность поверхности относительно наружной цилиндрической поверхности, увод оси отверстия, несоосность ступеней базовым поверхностям или линии центровых отверстий у заготовок ступенчатых валов, перпендикулярность торцовой плоскости оси базовой цилиндрической поверхности заготовки и т.п.

Составляющую припуска  $\rho_{кор}$  (на радиус заготовки), необходимую для компенсации её кривизны (рис. 2.15) определяют по формулам

$$\rho_{кор} = R - r, \quad (2.41)$$

$$\rho_{кор} = \frac{\Delta k \cdot L}{2}, \quad (2.42)$$

где  $R$ ,  $r$  – радиусы необработанной и обработанной поверхности;  $\Delta k$  – коробление на единицу длины заготовки или её обрабатываемого участка;  $L$  – длина заготовки или её обрабатываемого участка.

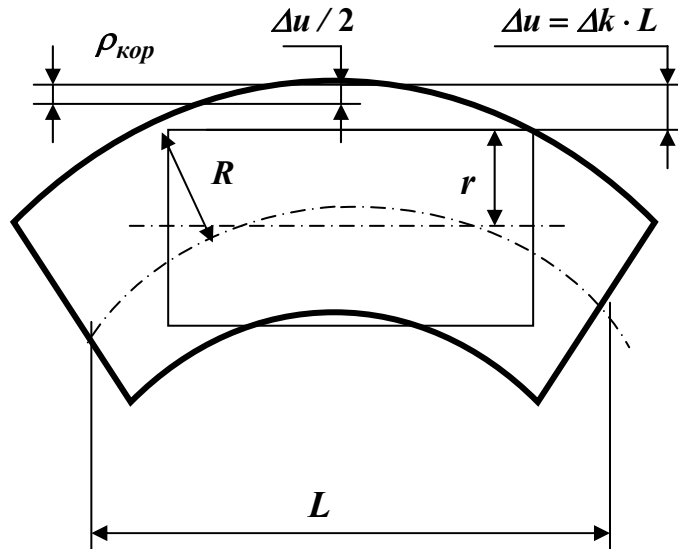


Рис. 2.15. Схема формирования пространственного отклонения ( $\rho_{кор}$ ) из-за коробления вала ( $\Delta u$ ).

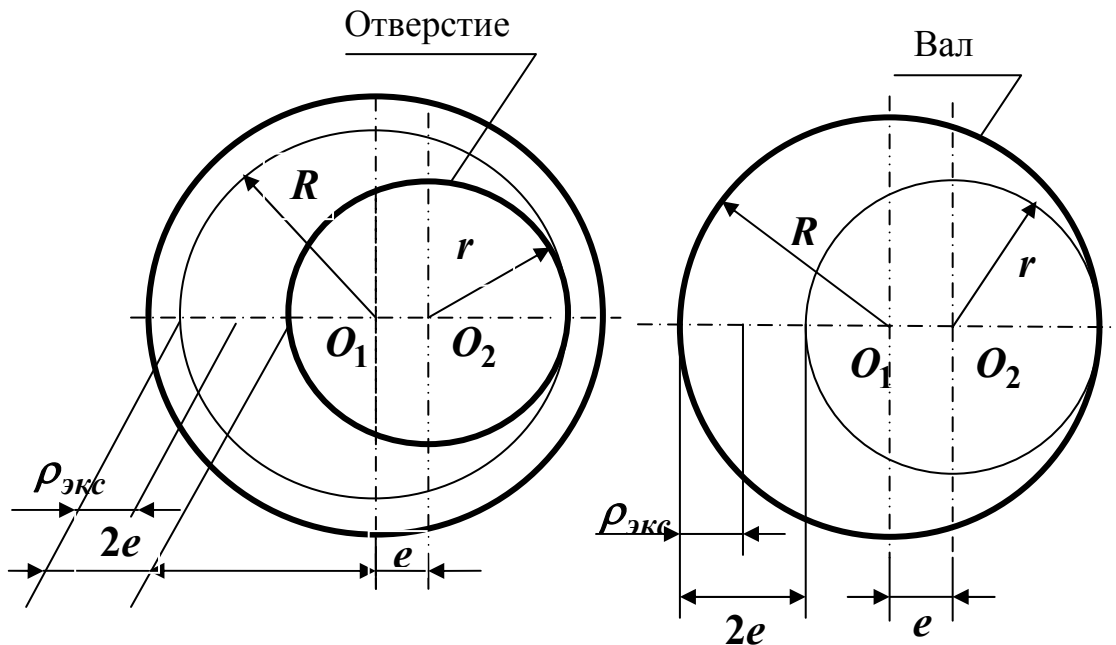


Рис. 2.16. Схема формирования пространственного отклонения ( $\rho_{экс}$ ) из-за эксцентриситета ( $e$ ) при обработке отверстия (а) и вала (б):  $O_1$  – геометрическая ось отверстия после обработки (а) и вала до обработки (б);  $O_2$  – геометрическая ось отверстия до обработки (а) и вала после обработки (б).

Составляющая припуска  $\rho_{\text{экс}}$  (на радиус) обрабатываемого отверстия, эксцентричного относительно установочного наружного диаметра заготовки, необходимая для компенсации этого эксцентриситета (рис. 2.16, а) может быть найдена по формуле

$$\rho_{\text{экс}} = R - r, \quad (2.43)$$

где  $R$ ,  $r$  – радиусы обработанного и необработанного отверстий в заготовке.

Составляющая припуска  $\rho_{\text{экс}}$  (на радиус) обрабатываемого вала, зацентрованного неточно (рис. 2.15,б), необходимая для компенсации получившегося эксцентриситета, может быть определена по формуле (2.43).

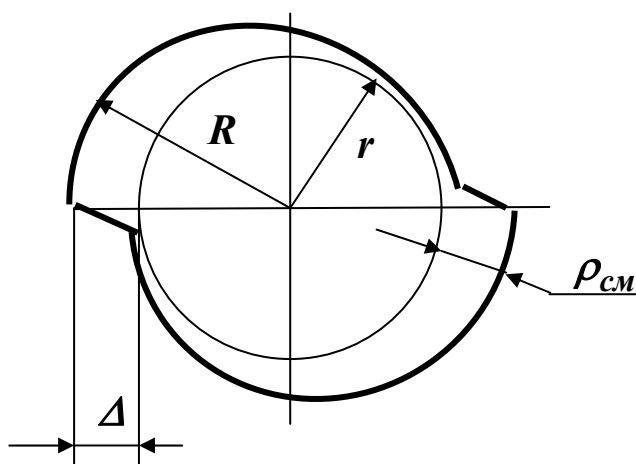


Рис. 2.17. Схема формирования пространственного отклонения  $\rho_{\text{см}}$ .

Составляющая припуска  $\rho_{\text{см}}$  (на радиус) круглой заготовки, поверхности которой имеют поперечное смещение (рис. 2.17), необходимая для компенсации этого смещения, определяется

$$\rho_{\text{см}} = R - r. \quad (2.44)$$

Подводя итог сказанному (относительно параметров пространственного отклонения), отметим, что эти параметры ( $\rho_{\text{кор}}$ ,  $\rho_{\text{экс}}$ ,  $\rho_{\text{см}}$  и т.п.) могут

быть вычислены по геометрическим схемам или взяты из соответствующих справочных таблиц [64, 269, 368, 370].

#### 2.8.4.2. СТРУКТУРНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПРИПУСКА

При определении  $i$ -ого промежуточного припуска ( на  $i$ -ую технологическую операцию или  $i$ -й переход) указанные составляющие этого припуска имеют следующий вид:  $R_{zi-1}$ ,  $T_{i-1}$ ,  $\rho_{i-1}$  и  $\varepsilon_{yi}$ . Здесь индекс  $i - 1$  означает номер предыдущей технологической операции (перехода) и, одновременно, номер предыдущего промежуточного припуска. Таким образом, в соответствии с методом профессора Кована В.М. три составляющие от предыдущего перехода обработки

$(R_{zi-1}, T_{i-1}, \rho_{i-1})$  и одна составляющая  $(\varepsilon_{yi})$  от текущего (выполняемого) перехода полностью определяют величину минимального промежуточного припуска ( $Z_{imin}$ ) на текущий (выполняемый) переход.

Расчёт минимального промежуточного припуска производят по следующим формулам, соответственно, при последовательной обработке противоположащих поверхностей, при параллельной обработке противоположащих поверхностей и при обработке наружных и внутренних поверхностей вращения [60, 64, 80, 230, 279, 368, 370, 393]

$$Z_{imin} = R_{zi-1} + T_{i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_{yi}, \quad (2.45)$$

$$2Z_{imin} = 2(R_{zi-1} + T_{i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_{yi}), \quad (2.46)$$

$$2Z_{imin} = 2(R_{zi-1} + T_{i-1} + \sqrt{\rho_{i-1} + \varepsilon_{yi}}). \quad (2.47)$$

Векторные величины  $\rho_{i-1}$  и  $\varepsilon_{yi}$  определяют как векторную сумму соответствующих составляющих. Например, при трёх составляющих

$$\bar{\rho} = \bar{\rho}_1 + \bar{\rho}_2 + \bar{\rho}_3, \quad (2.48)$$

$$\bar{\varepsilon}_y = \bar{\varepsilon}_b + \bar{\varepsilon}_z + \bar{\varepsilon}_{np}, \quad (2.49)$$

где  $\bar{\varepsilon}_b$ ,  $\bar{\varepsilon}_y$ ,  $\bar{\varepsilon}_{np}$  — погрешности базирования, закрепления и приспособления (в общем случае вектор  $\bar{\varepsilon}_{np}$  содержит ряд составляющих [373]).

В тех случаях, когда направление векторов неизвестно, эти погрешности суммируют как случайные числа, например, при двух составляющих

$$\rho = \sqrt{\rho_1^2 + \rho_2^2}, \quad (2.50)$$

$$\varepsilon_y = \sqrt{\varepsilon_b^2 + \varepsilon_z^2}. \quad (2.51)$$

При механической обработке пространственные отклонения резко уменьшаются (коэффициенты уточнения 0,05...0,06).

### 2.8.4.3. ПРИМЕРЫ РАСЧЁТА ПРИПУСКА

**Пример 1.** Имеется чертёж детали (рис. 2.10), для которой разрабатывается технологический процесс [80].

Предварительно выполнено конструирование исходной заготовки – поковки, полученной горячей штамповкой (рис. 2.11).

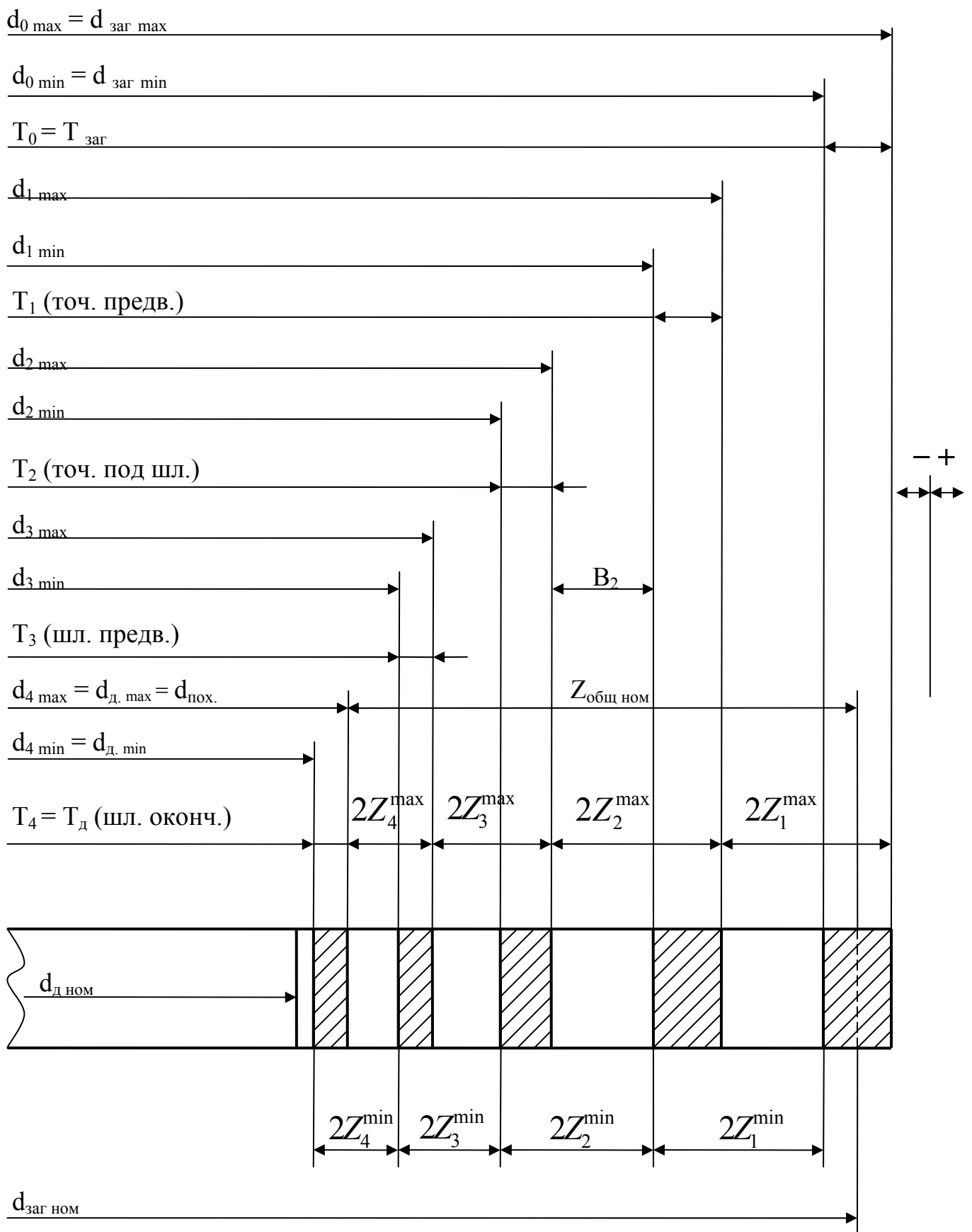


Рис. 2.18. Схема графического расположения полей припусков на механическую обработку ступени вала  $\phi 80\text{m}6:1$  – точение предварительное; 2 – точение под шлифование; 3 – шлифование предварительное; 4 – шлифование окончательное.

Заготовка – поковка, полученная штамповкой на горизонтально-ковочной машине (ГКМ). Масса поковки при массе готовой детали  $M_{\delta}=14,74\text{кг}$  и  $1,6 > K_p > 1,3$  составит  $M_n = M_{\delta} \cdot K_p = 14,74 \cdot 1,45 \approx 21,4$  кг. Длина заготовки 422 мм, длина обрабатываемой ступени 45 мм.

Требуется выполнить расчёт припуска, необходимого для получения наружной цилиндрической поверхности  $\varnothing 80 \text{ m6} \begin{pmatrix} +0,030 \\ +0,011 \end{pmatrix}$ .

Обработка ведётся на станках, настроенных на размер, т.е. используется метод автоматического получения размера (МАПР).

Предварительно установлен маршрут обработки этой поверхности: 1) точение предварительное; 2) точение под шлифование; 3) шлифование предварительное; 4) шлифование окончательное (рис. 2.18).

Расчёт будем вести одновременно с заполнением таблицы по прилагаемой форме (табл. 2.16). Форма этой таблицы впервые была предложена в работе [279, с. 253]. Расчёт выполним в стиле, предложенном в работе [64].

Графа 1 табл. 2.16 содержит формулировки технологических переходов, из которых состоит маршрут обработки поверхности (МОП)  $\varnothing 80 \text{ m6}$ .

В графах 2 и 3 приведены численные значения параметров шероховатости поверхности  $R_z$  и глубины дефектного поверхностного слоя  $T$ , характерные для указанных переходов. Например, для заготовки-штамповки  $R_z = 200$  мкм и  $T = 250$  мкм [368, с.186, табл.12].

В графе 4 проставляют величину пространственного отклонения. Суммарное значение пространственного отклонения при установке вала в центрах для заготовок из проката составляет [370, с.167]

$$\rho = \sqrt{\rho_k^2 + \rho_{\text{ц}}^2}, \quad (2.52)$$

где  $\rho_k$  – величина кривизны (местная или общая), причём  $\rho_k = \rho_{\text{кор}}$ ;  $\rho_{\text{ц}}$  – величина смещения оси заготовки из-за погрешности зацентровки, причём  $\rho_{\text{ц}} = \rho_{\text{экс}}$ .

Для штампованных поковок при обработке их в центрах [370, с.171] возможны два варианта расчёта

$$\rho = \sqrt{\rho_{\text{ко}}^2 + \rho_{\text{ц}}^2}, \quad (2.53)$$

Таблица 2.16

## Определение припуска расчётным методом

Маршрут обработки поверхности	Элементы припуска				Расчётный припуск $2Z_{min}$ мкм	Расчётный раз мер $dp$ , мм	Квалитет (или класс точности по ГОСТ)	Допуск $T_i$ , мкм	Межоперационные размеры, мм			Придельные значения припусков, мкм	
	$R_z$ , мкм	$h$ , мкм	$\rho$ , мкм	$\varepsilon_y$ , мкм					$d_{min}$	$d_{max}$	$d$	$2Z_i^{min}$	$2Z_i^{max}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Заготовка (штамповка)	200	250	795	-	-	82,961	ГОСТ 7505-89	$T_{заг}^{(+1300)}_{-700}$ $T_{заг}=2000$	83,0	85,0	$83,7^{+1,3}_{-0,7}$		
Точение предварительное	50	50	47,7	0	2490	80,471	12(h12)	$T_1=350$	80,50	80,85	$80,85_{-0,35}$	2500	4150
Точение под шлифование	25	25	2,4	0	295	80,176	9(h9)	$T_2=87$	80,176	80,263	$80,263_{-0,087}$	324	587
Шлифование предварительное	10	20	0	0	105	80,071	7(h7)	$T_3=35$	80,071	80,106	$80,106_{-0,035}$	105	157
Шлифование окончательное	5	15	0	0	60	80,011	6(m6)	$T_4^{(+30)}_{+11}$ $T_4=19$	80,011	80,030	$80^{+0,030}_{-0,011}$	60	76

Примечание: Заготовка – штамповка на ГКМ. Масса заготовки  $\approx 21,4$  кг. Длина заготовки 422 мм, длина обрабатываемой ступени 45 мм.  $i$  – порядковый номер технологического перехода. ( $i=\overline{1,4}$ ).

$$\rho = \sqrt{\rho_{км}^2 + \rho_{ц}^2}, \quad (2.54)$$

где  $\rho_{ко}$ ,  $\rho_{км}$  – общая и местная кривизна заготовки, соответственно.

Кривизна  $\Delta k$  (количество мкм на длине 1 мм) стержня после высадки фланца (утолщения) на ГКМ для принятых условий составляет  $\Delta k = 6$  мкм/мм [368, с.187, табл.19]. Следовательно, при длине ступени вала  $L = 45$  мм местная кривизна заготовки составит

$$\rho_{км} = 6 \text{ мкм/мм} \cdot 45 \text{ мм} = 270 \text{ мкм}.$$

В свою очередь величину  $\rho_{ц}$  для проката и поковки определяют по формуле [370, с.168, с.171]

$$\rho_{ц} = 0,25\sqrt{T^2 + 1}, \quad (2.55)$$

где  $T$  – допуск на диаметр базовой цилиндрической поверхности заготовки, которая (поверхность) использована при зацентровке.

Так как допуск на наружный диаметр поковки составляет 2 мм, что следует из предварительно определённого размера заготовки  $\varnothing 86 \begin{pmatrix} +1,3 \\ -0,7 \end{pmatrix}$ , получаем  $\rho_{ц} = 0,25 \cdot \sqrt{2^2 + 1} = 0,25 \cdot 2,236 = 0,56$  мм.

При расчёте пространственного отклонения для штампованной поковки следует также учесть величину смещения  $\rho_{см}$  (мм) оси фланца относительно оси стержня при высадке его на ГКМ, которая для принятых условий составляет  $\rho_{см} = 0,5$  мм [368, с.187, табл.20]. Таким образом, общее пространственное отклонение для штампованной поковки составит

$$\rho_{общ} = \sqrt{\rho_{км}^2 + \rho_{ц}^2 + \rho_{см}^2}. \quad (2.56)$$

Подставляя численные данные, получим

$$\rho_{общ} = \sqrt{0,27^2 + 0,56^2 + 0,5^2} = 0,795 \text{ мм}.$$

После первого технологического перехода (предварительного точения) остаточное пространственное отклонение  $\rho_{ост.1}$  составит

$$\rho_{ост.1} = \rho_{общ} \cdot K_{y1}, \quad (2.57)$$

где  $K_{y1}$  – коэффициент уточнения для первого технологического перехода,  $K_{y1} = 0,06$  [368, с.190, табл. 29]. Получаем

$$\rho_{ост.1} = 795 \text{ мкм} \cdot 0,06 = 47,7 \text{ мкм}.$$

После второго технологического перехода (точения под шлифование)



$$\rho_{ост.2} = \rho_{ост.1} \cdot K_{y2}, \quad (2.58)$$

где  $K_{y2}$  – коэффициент уточнения для второго технологического перехода,  $K_{y2} = 0,05$  [368, с.190, табл. 29].

Получаем

$$\rho_{ост.2} = 47,7 \text{ мкм} \cdot 0,05 = 2,39 \text{ мкм},$$

т.е. после 2 перехода практически погрешности формы не будет.

В графе 5 проставляют погрешность установки для выполняемого перехода. При закреплении вала в центрах эта погрешность по выполняемому размеру – диаметру вала отсутствует, т.е.  $\varepsilon_{уст} = 0$ .

Графа 6 заполняется вычисленными значениями *минимального промежуточного припуска*. Расчёт выполняют по формуле (2.29), которая при  $\varepsilon_{уст} = 0$  принимает вид

$$2Z_{i\min} = 2(R_{zi-1} + h_{i-1} + \rho_{i-1}). \quad (2.59)$$

По формуле (2.59) минимальные припуски на первый (точение предварительное,  $Z_{min1}$ ), второй (точение под шлифование,  $Z_{min2}$ ), третий (шлифование предварительное,  $Z_{min3}$ ) и четвёртый (шлифование окончательное,  $Z_{min4}$ ) составят

$$2Z_{min1} = 2 \cdot (200 + 250 + 795) = 2490 \text{ мкм},$$

$$2Z_{min2} = 2 \cdot (50 + 50 + 47,7) = 295 \text{ мкм},$$

$$2Z_{min3} = 2 \cdot (25 + 25 + 2,4) = 105 \text{ мкм},$$

$$2Z_{min4} = 2 \cdot (10 + 20 + 0) = 60 \text{ мкм}.$$

Графа 7 заполняется, начиная с конечного (чертёжного) *минимального размера детали* ( $d_{\partial min}$ ) путём последовательного прибавления *расчётного минимального припуска* каждого технологического перехода (рис. 2.18). Т.е. расчётные минимальные размеры готовой детали ( $d_{p4}$ ), заготовки ( $d_{p3}$ ,  $d_{p2}$ ,  $d_{p1}$ ) и исходной заготовки ( $d_{0min}$ ) составят

$$d_{p4} = d_{4min} = d_{\partial min} = 80,011 \text{ мм},$$

$$d_{p3} = d_{3min} = 80,011 + 0,060 = 80,071 \text{ мм},$$

$$d_{p2} = d_{2min} = 80,071 + 0,105 = 80,176 \text{ мм},$$

$$d_{p1} = d_{1min} = 80,176 + 0,295 = 80,471 \text{ мм},$$

$$d_{0min} = d_{заг.min} = 80,471 + 2,490 = 82,961 \text{ мм}.$$

Графа 8 заполняется на основе информации о достигаемом

качестве точности при механической обработке и классе точности поковки (по ГОСТ 7505-89).

Графа 9 заполняется на основе данных в графе 8 с использованием табличных значений допусков (по ГОСТ 25346-82) [89, с.16; 4, с.192 и др.].

Графа 10 заполняется на основе данных графы 7 путём округления в большую сторону с учётом количества десятичных знаков после запятой, с каким установлен допуск (в мм). Например, в нижних трёх строках (допуски 0,019 мм, 0,035 мм и 0,087 мм) необходимо оставить три знака после запятой (80,011 мм, 80,071 мм, 80,176 мм). В четвёртой строке (допуск 0,35 мм) оставляем два знака (80,50 мм). В пятой строке (допуск 2,0 мм) – один знак (80,0 мм).

Графа 11 заполняется путём построчного прибавления допуска к округлённым наименьшим предельным значениям  $d_{i\min}$ . Получаем (см. рис. 2.18 и табл. 2.16)

$$d_{4\max} = 80,011 + 0,019 = 80,03 \text{ мм},$$

$$d_{3\max} = 80,071 + 0,035 = 80,106 \text{ мм},$$

$$d_{2\max} = 80,176 + 0,087 = 80,263 \text{ мм},$$

$$d_{1\max} = 80,50 + 0,35 = 80,85 \text{ мм},$$

$$d_{\text{заг.}\max} = 83,0 + 2,0 = 85,0 \text{ мм}.$$

В графе 12 записываем промежуточные размеры заготовки в форме, которая принята для чертёжных размеров (проставляемых на операционных эскизах):  $\varnothing 80^{+0,030}_{-0,011}$ ,  $\varnothing 80,106_{-0,035}$ ,  $\varnothing 80,263_{-0,087}$ ,  $\varnothing 80,85_{-0,35}$ ,  $\varnothing 83,7^{+1,3}_{-0,7}$ .

В графах 13 и 14 указывают предельные значения промежуточных припусков  $2Z_{i\min}$  и  $2Z_{i\max}$ , которые определяют как разность соответствующих наибольших и наименьших предельных значений размеров предшествующего и выполняемого перехода (рис. 2.18). Получим

$$2Z_{4\min} = 80,071 - 80,011 = 0,06 \text{ мм} = 60 \text{ мкм},$$

$$2Z_{3\min} = 80,176 - 80,071 = 0,105 \text{ мм} = 105 \text{ мкм},$$

$$2Z_{2\min} = 80,50 - 80,176 = 0,324 \text{ мм} = 324 \text{ мкм},$$

$$2Z_{1\min} = 83,0 - 80,5 = 2,5 \text{ мм} = 2500 \text{ мкм},$$

$$2Z_{4\max} = 80,106 - 80,030 = 0,076 \text{ мм} = 76 \text{ мкм},$$

$$2Z_{3\max} = 80,263 - 80,106 = 0,157 \text{ мм} = 157 \text{ мкм},$$

$$2Z_{2max} = 80,85 - 80,263 = 0,587 \text{ мм} = 587 \text{ мкм},$$

$$2Z_{1max} = 85,0 - 80,85 = 4,15 \text{ мм} = 4150 \text{ мкм}.$$

Общие припуски минимальный ( $2Z_{общ.min}$ ) и максимальный ( $2Z_{общ.max}$ ) находим путём построчного сложения соответствующих предельных значений промежуточных припусков ( $2Z_{imin}$  и  $2Z_{imax}$ ) в графах 13 и 14 табл. 2.16. Получаем

$$2Z_{общ.min} = \sum_{i=1}^4 2Z_{imin} = 60 + 105 + 324 + 2500 = 2989 \text{ мкм},$$

$$2Z_{общ.max} = \sum_{i=1}^4 2Z_{imax} = 76 + 157 + 587 + 4150 = 4970 \text{ мкм}.$$

Из анализа рис. 2.18 следует, что правильность выполненных расчётов (применительно к МАПР) можно проверить по формуле

$$2Z_{общ.max} - 2Z_{общ.min} = T_z - T_\delta, \quad (2.60)$$

где  $T_z$ ,  $T_\delta$  – допуски на размеры исходной заготовки и готовой детали, соответственно.

Имеем  $4970 \text{ мкм} - 2989 \text{ мкм} = 2000 \text{ мкм} - 19 \text{ мкм}$ , т.е.  $1981 \text{ мкм} = 1981 \text{ мкм}$ .

Следовательно, расчёты (при принятых условиях) выполнены верно. Выше отмечалось, что в научно-технической литературе не однозначно определяются номинальные припуски: общий ( $2Z_{общ.ном}$ ) и промежуточные ( $2Z_{iном}$ ). Так в работах [60, 80] общим номинальным припуском ( $2Z_{общ.ном}$ ) называют такой припуск, прибавление которого к максимальному размеру детали типа «вал» (применительно к МАПР) позволяет получить номинальный размер исходной заготовки. Следовательно,

$$2Z_{общ.ном} = d_{заг.ном} - d_{\delta.max}. \quad (2.61)$$

При обеспечении точности обработки по МАПР (т.е. для станков, которые предварительно настроены на размер) в соответствии с рис. 2.18 применительно к  $n$  переходам имеем

$$2Z_{общ.ном} = 2 \sum_{i=1}^n Z_{imax} - B_z, \quad (2.62)$$

где  $2Z_{imax}$  – максимальное значение промежуточного  $i$ -го припуска (т.е. для  $i$ -го перехода);  $B_z$  – верхнее отклонение поля допуска

заготовки.

Например, для рассматриваемого случая, т.е. при  $n = 4$ , получим

$$2Z_{общ.ном} = 4970 - 1300 = 3670 \text{ мкм.}$$

Проверку можно выполнить по формуле (2.61). Действительно,  $d_{заг.ном} = d_{\delta.max} + 2Z_{общ.ном} = 80,030 \text{ мм} + 3,670 \text{ мм} = 83,7 \text{ мм}$ .

Отметим, что формулу (2.62) можно было записать в другом виде, например, так [64, с.90; 368]:

$$2Z_{общ.ном} = 2Z_{общ.min} + H_z - H_{\delta}, \quad (2.63)$$

где  $H_z$ ,  $H_{\delta}$  – нижние отклонения размеров исходной заготовки и готовой детали соответственно (когда в качестве номинального размера готовой детали условно принимается его максимальное значение – так называемый исходный размер).

Для рассматриваемого случая имеем

$$2Z_{общ.ном} = 2989 + 700 - 19 = 3670 \text{ мкм.}$$

В соответствии с подходом, рассмотренным в параграфе 2.8.3,

$$2Z_{общ.ном} = d_{з.ном} - d_{\delta.ном}, \quad (2.64)$$

где  $d_{з.ном}$ ,  $d_{\delta.ном}$  – номинальные размеры (диаметры) исходной заготовки и готовой детали.

Применительно к рассматриваемому случаю по формуле (2.64):

$$2Z_{общ.ном} = 83,7 \text{ мм} - 80,0 \text{ мм} = 3,7 \text{ мм} = 3700 \text{ мкм.}$$

Этот же самый результат можно получить по очевидной формуле

$$2Z_{общ.ном} = 2 \sum_{i=1}^4 Z_{i.ном}. \quad (2.65)$$

Здесь

$$2Z_{4.ном} = 2Z_{4.max} + B_{\delta}, \quad (2.66)$$

где  $B_{\delta}$  – верхнее отклонение поля допуска готовой детали.

Как следует из формулы (2.66), номинальное значение промежуточного припуска (под окончательное шлифование) больше максимального его значения. Далее номинальные и максимальные значения припусков совпадают, т.е.

$$2Z_{з.ном} = 2Z_{з.max}, \quad (2.67)$$

$$2Z_{2.ном} = 2Z_{2.max}. \quad (2.68)$$

И, наконец,

$$2Z_{1ном} = 2Z_{1max} - B_3. \quad (2.69)$$

Как следует из формулы (2.69), номинальное значение промежуточного припуска (на точение предварительное) меньше максимального его значения. По формуле (2.65) получаем

$$2Z_{общ.ном} = 30 + 76 + 157 + 587 + 4150 - 1300 = 3700 \text{ мкм.}$$

Таким образом, разные подходы к определению номинальных припусков – общего и промежуточных – приводят к несколько различным результатам для случая, когда номинальное значение размера готовой детали типа «вал» меньше его номинального значения (диаметр шейки вала под подшипник). Например, для рассматриваемого случая общие номинальные припуски (3670 мкм и 3700 мкм) отличаются на величину верхнего допускаемого отклонения размера готовой детали ( $B_\partial = 30$  мкм). В данном случае это различие не превышает 1%. В то же время формула (2.64) в отличие от формулы (2.65), носит более общий характер.

Подведём итоги: назначенный по ГОСТ 7505-89 диаметр ступени вала – исходной заготовки составляет  $d_{заг} = 86,6_{-0,7}^{+1,3}$ , а вычисленный –  $d_{заг} = 83,7_{-0,7}^{+1,3}$ . При этом диаметр готовой детали  $d_\partial = 80_{+0,011}^{+0,030}$ . Номинальные общие припуски составляют, соответственно: нормативный – 6,57 мм (6,6 мм) и расчётный – 3,67 мм (3,7 мм). В скобках указаны результаты расчёта по формуле (2.64). Различие между нормативным и расчётным припусками составляет 2,9 мм, т.е. нормативный припуск завышен более, чем на 75% по отношению к расчётному припуску.

Можно было бы рассмотреть ещё один (третий) вариант расчёта, когда минимальный припуск на первый технологический переход (точение предварительное) берут в соответствующей справочной таблице [393]. В этом случае  $2Z_{1min} = 2,6$  мм (вместо использованного в подразделе 2.8.3 значения  $2Z_{1min} = 4,87$  мм). В этом случае диаметр заготовки составил бы  $d_{заг} = 85,2_{-0,7}^{+1,3}$ .

В заключение отметим, что расчёт выполнен для структуры припуска, соответствующей МАПР, т.е. когда для  $i$ -го промежуточного припуска выполняется условие

$$2Z_{imax}^{МАПР} - 2Z_{imin}^{МАПР} = T_{i-1} - T_i. \quad (2.70)$$

В этом случае минимальный промежуточный припуск ( $2Z_{imin}$ )

включает допуски ( $T_i$ ), показанные заштрихованными участками на рис. 2.18, и элементы  $B_i$ , показанные не заштрихованными участками. Например, при  $i = 2$  получим  $2Z_{2min} = T_2 + 2B_2$  (рис. 2.18). В общем случае имеем

$$2Z_{i min} = T_i + 2B_i. \quad (2.71)$$

Для метода индивидуального получения размеров, или, как его ещё называют, метода пробных проходов и промеров (МППП) ситуация изменится. В этом случае (т.е. при МППП) минимальный припуск  $Z_{i min}^{МППП}$  будет совпадать с элементом  $B_i$ , т.е.  $Z_{i min}^{МППП} = B_i$ . Например, на рис. 2.18 при  $i = 2$  получим  $Z_{2min}^{МППП} = B_2$ . В этом случае  $2Z_{2max}^{МППП} = 2Z_{2min}^{МППП} + T_2 + T_1$ . В более общем случае (для любого  $i$ -го перехода) имеем

$$2Z_{i max}^{МППП} - 2Z_{i min}^{МППП} = T_i + T_{i-1}. \quad (2.72)$$

Из сравнения формул (2.70) и (2.72) следует, что при МППП максимальные промежуточные и, следовательно, максимальные общие припуски будут больше, чем при МАПР (при одних и тех же значениях минимальных промежуточных и минимальных общих припусков). Этот факт до сих пор не нашёл должного отражения в технологической литературе, учебных расчётах и научных исследованиях. В то же время в указанной литературе справедливо отмечается, что при переходе от МАПР к МППП следует вместо погрешности установки  $\varepsilon_{yi}$  учитывать погрешность выверки  $\varepsilon_{\delta i}$  на выполняемом переходе [368, с.176; 370, с.177].

И последнее. До сих пор в литературе и в программных продуктах САПР(Т) нет соответствующего материала по применению современных IBM-совместимых персональных компьютеров (РС) для расчёта припусков и промежуточных размеров заготовки, хотя попытки применения компьютерных технологий предпринимались ещё в 70-х годах прошлого века [124, с.109-113]. Нами опубликованы материалы применительно к расчёту припуска на переходы шлифования стальных деталей [187, 188, 184, 911].

**Пример 2.** Рассмотрим ещё один пример расчёта припуска на обработку и промежуточных размеров для отверстия  $\varnothing 56H9$  детали «колодка» (рис. 2.19). Предварительно выбранный маршрут обработки внутренней цилиндрической поверхности (при одной

установке заготовки) содержит две операции (или два перехода) растачивания: черного и чистового (рис. 2.14). Обработку производят на станке, настроенном на размер (МАПР). Исходная заготовка – отливка 9-го класса точности размеров (по ГОСТ 26645-85 предусмотрено 22 класса точности размеров). В соответствии с указанным ГОСТом допуск на диаметр 56 мм (или для заготовки на диаметр 46 мм) составляет 2,0 мм [269, с.582, табл.2].

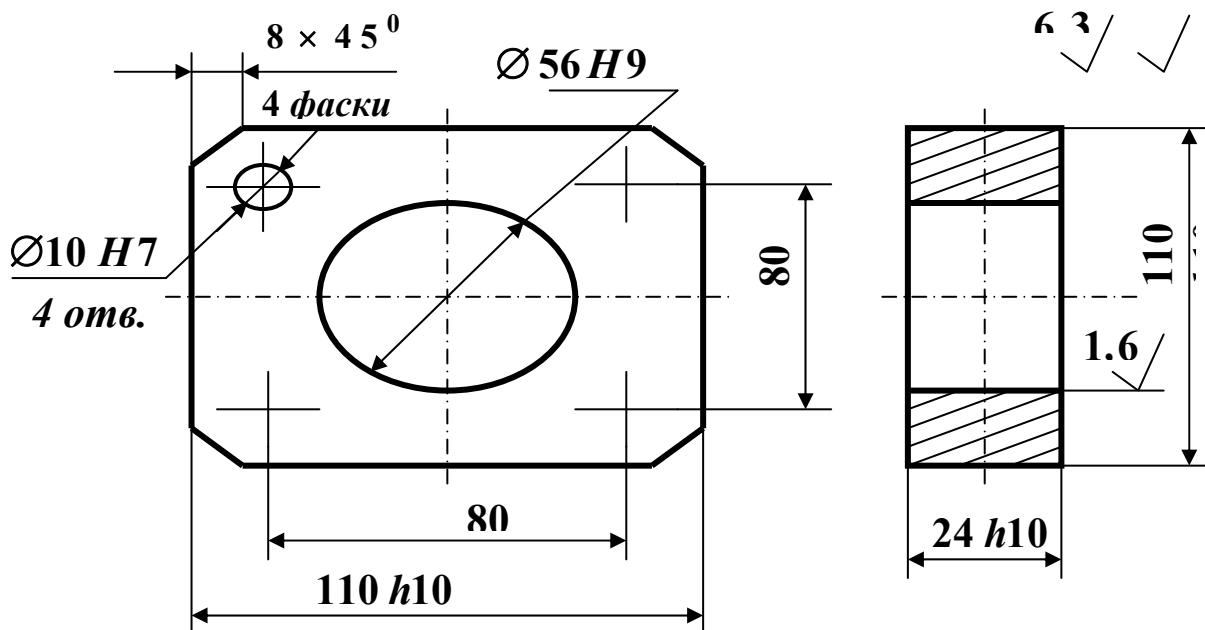


Рис. 2.19. Чертеж детали “колодка” (материал – СЧ20, неуказанные предельные отклонения:  $H14$ ,  $h14$ ,  $\pm IT14/2$ ).

Базирование заготовки – по плоскости основания и двум отверстиям  $\varnothing 10 H7$  (информация для определения погрешности установки  $\varepsilon_y$  и одной из составляющих пространственного отклонения). Расчёт припусков производим с одновременным заполнением табл. 2.17, составленной по форме табл. 2.16.

В графе 1 последовательно записан технологический маршрут обработки поверхности (МОП) отверстия.

В графах 2-5 указаны все значения элементов припуска. Например, суммарное значение  $R_z$  и  $h$ , характеризующих качество поверхности исходных литых заготовок составляет 600 мкм [64, 368]. После первого технологического перехода (расточивания черного) получим  $R_{z1} = 50$  мкм и  $h_1 = 50$  мкм [64, с. 65, табл. 4.6], однако принимаем  $h_1 = 0$ , так как заготовка не из стали, а из чугуна. После второго технологического перехода, соответственно, получаем  $R_{z1} = 20$  мкм [64, с.65, табл. 4.6] и  $h_2 = 0$ .

Таблица 2.17

## Определение припуска расчётным методом

МОП	Элементы припуска, мкм				Расчётный припуск $2Z_{i \min}$ , мкм	Расчётный размер $d_p$ , мкм	Квалитет или класс точности по ГОСТ	Допуск $T_i$ , мкм	Межоперационные размеры, мм			Предельные значения припусков, мкм	
	$R_z$ , мкм	$h$ , мкм	$\rho$ , мкм	$\varepsilon_y$ , мкм					$d_{i \min}$	$d_{i \max}$	$d_i$	$2Z_{i \min}$	$2Z_{i \max}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Заготовка	$R_z + h = 600$ мкм		168	–	–	54,416	9 кл. точн. (или IT16)	2000	52,4	54,4	53,4±1	–	–
Растачивание <u>черновое</u>	50	0	10,1	20	1538	55,954	H 12	300	55,65	<b>55,95</b>	55,65 <sup>+0,3</sup>	1550	3250
Растачивание <u>чистовое</u>	20	0	0,5	1	120	56,074	H 9	74	56,00	56,07 4	56 <sup>+0,074</sup>	124	350



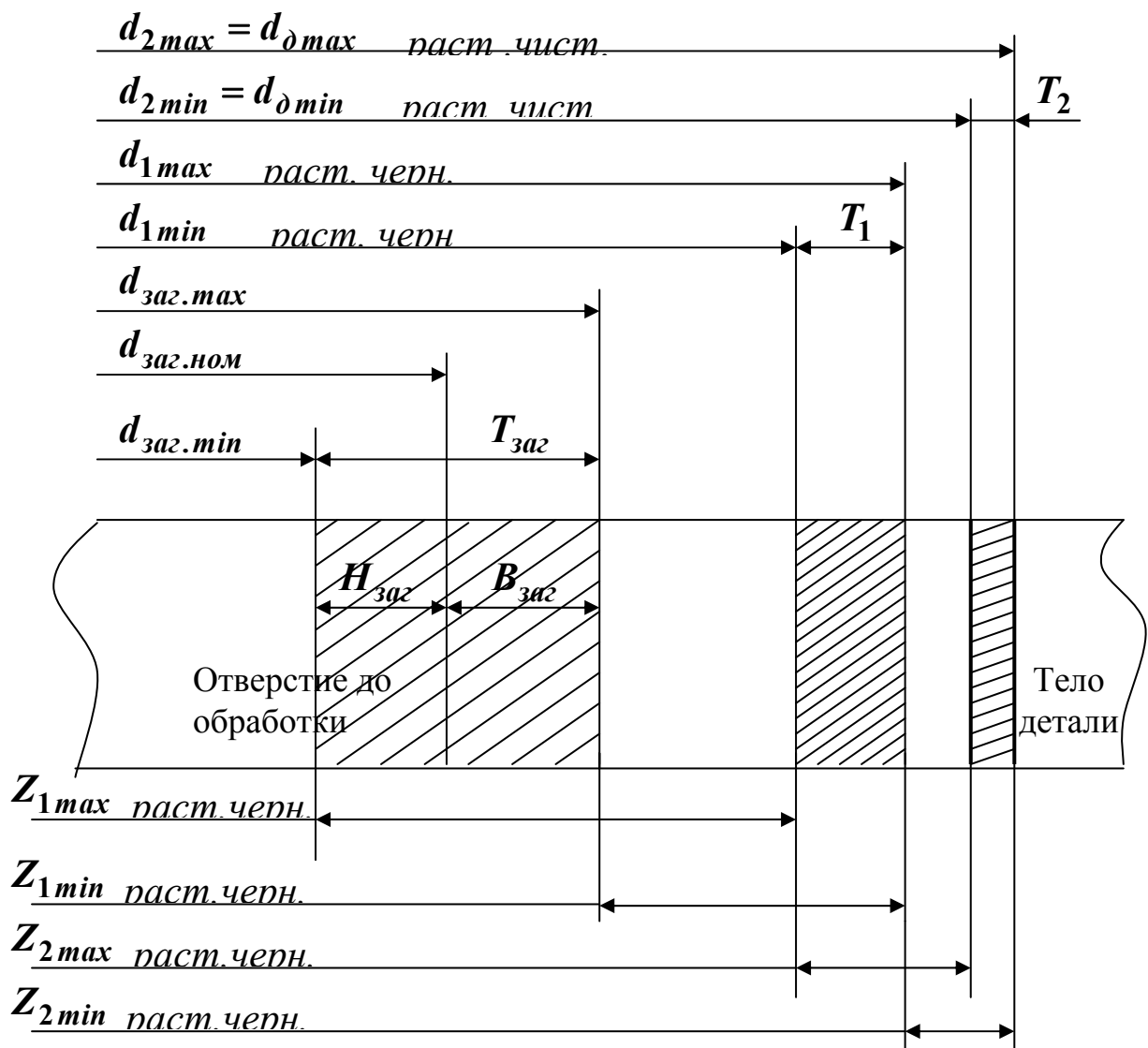


Рис.2.30. Схема графического расположения полей припусков и допусков на растачивание отверстия  $\varnothing 56 H9$ .

Суммарное пространственное отклонение для внутренней цилиндрической поверхности отверстия определяем по формуле [64] при  $\rho_{ц}=0$ , т.е.

$$\rho_{общ} = \sqrt{\rho_{ко}^2 + \rho_{см}^2} \quad (2.73)$$

В свою очередь коробление отверстия будем учитывать одновременно в поперечном (диаметральном) и осевом его сечении, т.е.

$$\rho_{ко} = \sqrt{\Delta k^2 (d^2 + L^2)}, \quad (2.74)$$

где  $d, L$  - диаметр и длина обрабатываемого отверстия ( $d = 56$  мм;  $L = 24$  мм). При  $\Delta k = 2,5$  мкм/мм [64, с. 71, табл. 4.8] получим  $\rho_{ко} = \sqrt{2,5^2 \cdot (56^2 + 24^2)} = 152,3$  мкм.

При определении смещения  $\rho_{см}$  следует учесть схему установки заготовки при растачивании отверстия. Если технологическими базами служат плоскость основания заготовки и два отверстия, то следует учесть смещение этих отверстий при их сверлении и развёртывании относительно оси отверстия. В свою очередь базой для отверстий служила боковая поверхность отливки, которая смещена на определённую величину относительно оси стержня, формирующего отверстие. Эта величина равна половине допуска на размер  $110\ h10\ (-0,14)$ , т.е. составляет 70 мкм. Таким образом, по формуле (2.73) получаем суммарное (общее) значение пространственного отклонения

$$\rho_{общ} = \sqrt{152,3^2 + 70^2} = 167,6 \text{ мкм} \approx 168 \text{ мкм}.$$

Остаточное пространственное отклонение после чернового и чистового растачивания составит, соответственно,

$$\rho_1 = 0,06 \cdot \rho_{общ} = 0,06 \cdot 168 = 10,1 \text{ мкм},$$

$$\rho_2 = 0,05 \cdot \rho_1 = 0,05 \cdot 10,1 = 0,5 \text{ мкм}.$$

Погрешность установки  $\varepsilon_y$  определяем по формуле (2.31), которая при неколлинеарных векторах составляющих (общий случай) может быть записана, например, в виде [60, с.52]

$$\varepsilon_y = \sqrt{\varepsilon_{\delta}^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_{np}^2}, \quad (2.75)$$

где  $\varepsilon_{\delta}$ ,  $\varepsilon_3$ ,  $\varepsilon_{np}$  — погрешности (скалярные величины) базирования, закрепления и приспособления.

Погрешность базирования  $\varepsilon_{\delta}$  в рассматриваемом примере может быть принята равной нулю, так как возможный перекоп заготовки в горизонтальной плоскости при установке её на штыри приспособления (из-за зазоров между этими штырями и отверстиями  $\varnothing 10\ H7$ ) не оказывает влияние на смещение оси обрабатываемого отверстия. Учитывая достаточно высокую жёсткость отливки (деталь типа «плита») принимаем  $\varepsilon_3 = 0$ . Что касается величины  $\varepsilon_{np}$ , то, учитывая её многокомпонентный состав [373], принимаем  $\varepsilon_{np} = 20$  мкм (например, это погрешность расположения станочного приспособления на столе станка). Итак, получаем  $\varepsilon_y = \varepsilon_{y1} = 20$  мкм. Остаточная погрешность установки при чистовом растачивании составит:

$$\varepsilon_{y2} = 0,05 \cdot \varepsilon_{y1} + \varepsilon_{инд.2} = 0,05 \cdot 20 \text{ мкм} + 0 \text{ мкм} = 1 \text{ мкм}.$$

При расчёте  $\varepsilon_{y2}$  принято, что индивидуальная составляющая

погрешности второго технологического перехода (операции) равна нулю, так как черновое и чистовое растачивание производится с одной установки заготовки.

В графу 6 табл.2.17 помещаем результаты расчёта минимальных промежуточных припусков, которые вычисляем по формуле (2.47):

$$2Z_{i\min} = 2(R_{zi-1} + h_{i-1} + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \varepsilon_{yi}^2}).$$

В соответствии с этой формулой для чернового и чистового растачивания получим, соответственно, (табл. 2.17):

$$2Z_{1\min} = 2 \cdot (600 + \sqrt{168^2 + 20^2}) = 1538,37 \text{ мкм} \approx 1538 \text{ мкм},$$

$$2Z_{2\min} = 2 \cdot (50 + \sqrt{10,1^2 + 1^2}) = 120,3 \text{ мкм} \approx 120 \text{ мкм}.$$

В графе 7 табл. 2.17 приводятся так называемые «расчётные размеры»  $d_p$ , т.е. теоретические исходные размеры, из которых затем формируют чертежные (практические, округлённые до количества знаков, которые используются для допускаемых отклонений на эти размеры) размеры в графах 10, 11 и 12.

Поскольку расчётными являются минимальные припуски, то исходным (для расчёта) внутренним размером является максимальный размер (для наружных поверхностей, наоборот, используется минимальный размер). Таким образом, имеем

$$d_{p2} = d_{2\max} = d_{\partial\max} = 56,074 \text{ мм}.$$

Теперь из этого размера будем вычитать минимальные значения найденных промежуточных припусков (для наружных поверхностей, наоборот, нужно прибавлять эти значения). Получим

$$d_{p1} = d_{1\max} = d_{2\max} - 2Z_{2\min} = 56,074 - 0,12 = 55,954 \text{ мм},$$

$$d_{p0} = d_{\text{заг.}\max} = d_{1\max} - 2Z_{1\min} = 55,954 - 1,538 = 54,416 \text{ мм}.$$

В графах 8 и 9 указаны качества и численные значения допусков, которые соответствуют выбранным методам обработки [368]. Например, для чистового растачивания значение допуска составляет 74 мкм (допуск чертёжного размера), для чернового растачивания – 300 мкм, для отливки 9-го класса точности по ГОСТ 26645-85 – 2,0 мм.

Графы 10 и 11 заполняют, начиная с графы 11, в которую переносят соответствующие значения из графы 6 после их округления до числа знаков в допусках (графа 8). Например, число 56,074 мм не изменяется (три знака после запятой). В то же время вместо числа 55,954 мм принимаем число 55,95 мм (при уменьшении

числа настолько же увеличиваем минимальный припуск, в то время как для наружных поверхностей при округлении числа его следует увеличивать), а вместо числа 54,416 мм принимаем число 54,4 мм. Графу 10 получаем путём построчного вычитания чисел в графах 11 и 9.

В графе 12 записываем чертёжные размеры, проставляемые на операционных эскизах, в соответствии с известными правилами простановки предельных отклонений. При этом для исходной заготовки – отливки учитываем предпочтительное расположение полей допусков [269, с. 582].

В графе 13 проставляем минимальные предельные значения промежуточных припусков. Эти значения равны разности наибольших предельных значений рассматриваемого и предшествующего переходов

$$2Z_{2min} = 56,074 - 55,95 = 0,124 \text{ мм},$$

$$2Z_{1min} = 55,95 - 54,4 = 1,55 \text{ мм}.$$

В графе 14 проставляем максимальные предельные значения промежуточных припусков, эти значения равны разности наименьших предельных значений рассматриваемого и предшествующего переходов, т.е.

$$2Z_{2max} = 56,0 - 55,65 = 0,35 \text{ мм},$$

$$2Z_{1max} = 55,65 - 52,4 = 3,25 \text{ мм}.$$

Общие минимальный ( $2Z_{общ.min}$ ) и максимальный ( $2Z_{общ.max}$ ) припуски определяем путём суммирования соответствующих промежуточных припусков. Получаем

$$2Z_{общ.min} = 124 \text{ мкм} + 1550 \text{ мкм} = 1674 \text{ мкм},$$

$$2Z_{общ.max} = 350 \text{ мкм} + 3250 \text{ мкм} = 3600 \text{ мкм}.$$

Производим проверку правильности выполненных расчётов:

$$2Z_{общ.max} - 2Z_{общ.min} = T_z - T_d.$$

Получаем  $3600 \text{ мкм} - 1674 \text{ мкм} = 2000 \text{ мкм} - 74 \text{ мкм}$ .

Или:  $1926 \text{ мкм} = 1926 \text{ мкм}$ . Таким образом, проверка подтверждает правильность выполненных расчётов.

В заключение определим *общий номинальный припуск* (применительно к отверстию)

$$2Z_{общ.ном} = -(d_{зном} - d_{дном}). \quad (2.76)$$

Получим  $2Z_{общ.ном} = -(53,4 - 56,0) = 2,6 \text{ мм}$ .

Формулу (2.75) можно представить в виде [64, с. 87] (рис. 2.18)

$$2Z_{\text{общ.ном}} = 2Z_{\text{общ.мин}} + B_z - B_\delta, \quad (2.77)$$

где  $B_z, B_\delta$  – верхние отклонения размеров исходной заготовки и готовой детали. Формула (2.77) справедлива для случая, когда номинальный размер готовой детали находится между его предельными значениями или совпадает с одним из них. Соответствующее исследование приведено выше и проиллюстрировано в предыдущем примере. Имеем

$$2Z_{\text{общ.ном}} = 1674 \text{ мкм} + 1000 \text{ мкм} - 74 \text{ мкм} = 2600 \text{ мкм}.$$

На основании рассмотренных примеров расчёта припуска для наружных (вал) и внутренних (отверстие) поверхностей вращения сформулируем практические выводы по определению припусков и промежуточных размеров заготовки применительно к методу автоматического получения размеров (МАПР).

1. Расчёту (или выбору из соответствующих нормативных таблиц) прежде всего, подлежат *промежуточные минимальные припуски* (в отличие от номинальных): межоперационные или межпереходные.
2. При определении промежуточных минимальных (для вала) или максимальных (для отверстия) размеров детали к *исходному расчётному размеру* детали прибавляют (для вала) или отнимают (для отверстия) указанные в п.1 припуски.
3. Исходным расчётным размером готовой детали является один из предельно допустимых её размеров: минимальный размер (для вала) или максимальный размер (для отверстия).
4. *Минимальный размер исходной заготовки (для вала)* и соответствующие минимальные промежуточные её размеры будут получены при последовательном прибавлении к исходному расчётному размеру (вала) соответствующих минимальных промежуточных припусков. При этом минимальный размер исходной заготовки (по диаметру вала) равен сумме исходного расчётного размера и минимального общего припуска (равного сумме минимальных промежуточных припусков).
5. *Максимальный размер исходной заготовки (для отверстия)* и соответствующие максимальные промежуточные её размеры будут получены при последовательном вычитании из исходного расчётного размера (отверстия) соответствующих минимальных промежуточных припусков. При этом максимальный размер

исходной заготовки (по диаметру отверстия) равен разности исходного расчётного размера и минимального общего припуска (равного сумме минимальных промежуточных припусков).

6. *Номинальные (промежуточные и общий) припуски* определяют после нахождения промежуточных предельных и промежуточных номинальных размеров заготовки, как разность соответствующих промежуточных номинальных размеров заготовки. Этот вывод соответствует условию, когда номинальный размер готовой детали находится между её предельными размерами или совпадает с одним из них (наиболее частый случай).
7. Если номинальный размер готовой детали не соответствует условию п.6, то при определении номинальных припусков учитывают особенности, рассмотренные в подразделе 2.8.4.

При использовании метода пробных проходов и промеров (МПП) расчёт припусков и промежуточных размеров заготовки выполняют в два этапа. На первом этапе выполняют расчёт для МАПР по вышеприведенной схеме (рассмотренные примеры для вала и отверстия). На втором – осуществляют корректировку результатов выполненного расчёта по формулам эквивалентного пересчёта, приведенным в подразделе 2.8.1 [184, 187, 188, 911, 383].

## **2.9. РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

В общем случае математическая модель технологического процесса может быть построена по любому из бесконечного числа свойств этого процесса [409]. При моделировании этот процесс или технологическая система, которая его реализует, являются объектами моделирования. В технологии машиностроения выделяют два важнейших свойства указанных выше объектов моделирования: точность изделий (деталей, сборочных единиц и машины в целом) и качество поверхностного слоя деталей из которых это изделие состоит.

Процесс изготовления изделия содержит этапы механической обработки деталей и их сборки. На обоих этих этапах выполняют размерный (технологический) анализ, который становится возможным на основе моделирования указанных процессов механической обработки и сборки. Совокупность взаимосвязанных уравнений размерных цепей может быть названа математической моделью соответствующего процесса (обработки или сборки) по такому важному его свойству как точность. Вопросы точности механической

обработки (и, в частности, размерный анализ, как один из методов обеспечения точности) достаточно подробно изложены в соответствующей технологической литературе [230, 368, 393, 453]. Однако, моделирование процессов сборки при помощи математического аппарата размерных цепей (и создание соответствующей САПР) рассмотрено в меньшей степени.

Приступая к разработке маршрутной технологии сборки, следует:

- 1) четко определить вид сборки в зависимости от программы выпуска и конструкции изделия;
- 2) провести размерный анализ собираемого изделия.

При проведении размерного (технологического) анализа необходимо учитывать технологические требования, предъявляемые к собираемому изделию. Исходя из этих требований, определяют величины замыкающих звеньев размерных цепей. В ряде случаев размеры замыкающих звеньев и их отклонения указывают в чертеже изделия [237].

После выявления замыкающих звеньев (требований по точности) выявляют сами размерные цепи, определяющие величину конечного замыкающего звена.

Если конструкцией машины предусматривается обеспечение точности за счет взаимозаменяемости, необходимо провести поверочный расчет допусков на размеры деталей, входящих в размерные цепи. Если предусмотрен метод компенсации, необходимо установить виды связей между связанными размерными цепями, определяющими точность замыкающего звена. Следует иметь в виду, что при параллельной связи сборку следует начинать с деталей, имеющих общие (для нескольких связанных цепей) звенья. При этом точность замыкающего звена в каждой из цепей обеспечивается изолированно от других связанных цепей при помощи независимых друг от друга компенсаторов.

Если в конструкции узла предусмотрено звено-компенсатор, необходимо определить предельные его размеры, т.е. найти величину минимальной компенсации [410]. Если предусмотрена компенсация при помощи регулировки, необходимо дать анализ конструкции регулировочного звена и также подсчитать пределы регулировки.

Если конструкцией не предусмотрено наличие регулировочных устройств или звеньев-компенсаторов, необходимо указать, какая из деталей узла может быть использована в качестве компенсатора. В

некоторых случаях рекомендуется изменение конструкции узла для облегчения достижения требуемой точности.

После проведения размерно-технологического анализа можно приступить к назначению последовательности сборки.

Порядок компенсирования изделия и его узлов при сборке удобно изображать при помощи технологических схем сборки. Детали и сборочные группы на схемах сборки изображают в виде прямоугольников, в которые вписывают наименование и номер детали или сборочной группы и их количество в изделии. На технологических схемах сборки делают необходимые надписи и указания в соответствии с техническими условиями на сборку или особенностями выполнения сборочного процесса.

Разбивка процесса сборки на операции (технологический маршрут сборки) производится таким образом, чтобы продолжительность операций была по возможности равна или кратна темпу выпуска изделий. Чем быстрее темп, тем в большей степени приходится расчленять сборочный процесс на отдельные операции. Из сказанного выше следует, что вначале необходимо произвести нормирование всех сборочных работ и только после этого, учитывая темп выпуска, производить разбивку процесса на операции, т.е. устанавливать технологический маршрут сборки [237].

## **2.10. РАСЧЁТ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И МАШИННОГО ВРЕМЕНИ ОБРАБОТКИ**

Режимы резания определяют после того, как установлена структура технологического процесса механической обработки. Этот вопрос достаточно подробно рассмотрен в технологической литературе применительно к одноинструментальной последовательной обработке поверхностей детали [230, 279, 368, 370, 393]. В меньшей степени рассмотрены особенности расчёта режимов резания при многоинструментальных наладках.

При назначении режимов резания учитывают следующие основные положения [237].

1. В процессе расчета режимов резания необходимо вносить в спроектированный технологический процесс изменения, если эти изменения дают возможность повысить производительность или улучшить условия обработки.

Например, при определении подач суппортов многолезцовых



станков может быть выявлена целесообразность уменьшения длины хода суппорта (лимитирующего производительность по времени работы) за счёт введения дополнительных инструментов. Возможно перенесение части обработки на другие суппорты и позиции, а в отдельных случаях, и на другие операции. При расчёте мощности резания может оказаться необходимым сместить время начала или окончания работы отдельных суппортов. Иногда может оказаться целесообразным изменение конструкций инструментов, инструментальных материалов и т.п.

2. Рассчитанные по нормативам режимы резания не являются предельными и их следует рассматривать как первый этап установления рациональных режимов обработки. В зависимости от загрузки станка (по программе производства) режимы резания могут быть повышены, если, например, станок является узким местом в линии, или, наоборот, понижены на недогруженных по программе станках. Форсирование режимов резания (за счёт снижения стойкости инструмента на узких местах) возможно до режима так называемой наибольшей производительности станка, когда количество обработанных деталей будет наибольшим, хотя стоимость обработки повысится. В этих случаях достигается повышение экономически рентабельных скоростей резания (в последнее время скоростное резание является одним из основных направлений резкого увеличения производительности труда и рентабельности производства, налажен выпуск соответствующих станков). Однако здесь следует учитывать, что дальнейшее повышение режимов резания может привести к понижению производительности станка вследствие возрастания времени простоя станка по его техническому обслуживанию и ремонту.

3. Одной из основных особенностей расчета режимов резания при многоинструментальных наладках является необходимость согласования работ отдельных позиций, шпинделей, суппортов и отдельных инструментов между собой, с подчинением расчёта какому-либо общему кинематическому параметру или общему времени обработки. Таким общим параметром является при тжнении на одношпиндельных многорезцовых станках общая для всех инструментов одного суппорта подача на оборот (мм/об) и общее число оборотов детали в минуту; при обработке многошпиндельной сверлильной головкой – единая минутная подача (мм/об), при работе на многошпиндельном станке общим является время обработки (мин) и т.д.

4. Назначение режимов резания в большинстве случаев начина-

ется с выбора подачи (при известной глубине резания, равной припуску на обработку), после чего рассчитывают (или выбирают по таблицам) стойкость, скорость резания и (при необходимости) – усилия и мощность резания. Выбранные подачи и рассчитанные числа оборотов уточняются по паспорту станка.

После определения режимов резания становится возможным расчёт основного (технологического) времени обработки, которое при механизированной и автоматизированной обработке называют машинным временем (параграф 2.12).

## **2.11. ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ**

Вопросы выбора технологического оборудования (металлорежущих станков, сборочных стандов и т.п.) достаточно подробно рассмотрены в литературе [269, 368, 393]. Поэтому ниже рассмотрены особенности выбора технологической оснастки и средств автоматизации [237].

### **2.11.1. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СТАНОЧНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ (СП)**

При выборе типа СП учитывают тип производства, для которого это СП проектируется. Специальные приспособления обеспечивают более высокую точность и производительность, но они обычно предназначаются для выполнения вполне определенной операции по обработке данной детали. Специальные неразборные приспособления экономически выгодны только в массовом и крупносерийном производстве, где они достаточно быстро окупаются за счет большой и постоянной загрузки.

В серийном производстве, которому присуща большая номенклатура изделий и деталей, а также сравнительно частая сменяемость объектов производства, специальные неразборные приспособления экономически себя не оправдывают и не обеспечивают быстрой перестройки производства при переходе на изготовление другого изделия. При таком типе производства экономически целесообразно применять приспособления, обеспечивающие быструю переналадку их для обработки небольших партий сменяемых объектов производства.

Практика эксплуатации приспособлений показала, что в мелко-серийном и серийном производстве наиболее рентабельны универсально-наладочные (УНП) и сборно-разборные приспособления (СРП), а при разработке групповых технологических процессов – специализированные (групповые) приспособления.

В индивидуальном и опытном производстве, где большая номенклатура изделий запускается в производство мелкими партиями с частой сменяемостью изделий, оправдывают себя универсально-наладочные (УНП) и универсально-безналадочные (УБП) приспособления, а также универсально-сборные (УСП) приспособления.

### **Исходные данные для проектирования СП**

Основными исходными документами для проектирования специальных приспособлений являются чертеж детали и операционная карта технологического процесса.

На этапе проектирования СП должны быть известны все необходимые характеристики станка, для которого выполняется проектирование: высота центров, размеры и подъем стола, диаметр отверстия в шпинделе и прочие. При проектировании необходимо максимально использовать нормализованные и стандартные детали, и узлы приспособлений [326, 373].

### **Порядок и техника проектирования СП**

Разработку конструкции приспособления следует начинать с эскиза (или на бумаге, или на мониторе компьютера). Эскиз приспособления должен выражать саму идею приспособления, а именно: как деталь базируется и закрепляется. Здесь же следует показать элементы для направления инструмента. Разработка всех деталей приспособления в эскизе не требуется. Некоторые детали можно не показывать совсем.

Эскиз на бумаге можно выполнять от руки, выдерживая при этом соотношения размеров приспособления – длины, ширины и толщины, чтобы избежать неправильных представлений и ошибок в конструкции. Поэтому эскиз приспособления лучше выполнять на миллиметровой или клетчатой бумаге. При выполнении эскиза на компьютере пользуются соответствующими графическими редакторами или специальными пакетами прикладных программ (типа AutoCAD, Компас–График, Inventor и другие).

СП изображается в необходимых количествах проекций с сече-

ниями и разрезами. Вычерчивание конструкции должно начинаться с изображения самого изделия на всех проекциях. Изделие (заготовка) вычерчивается тонкими линиями и считается прозрачным. Проектирование заключается в постепенном построении элементов приспособления вокруг контуров изделия. Для этого проекции изделия должны быть размещены при достаточном расстоянии между ними, чтобы сохранялась возможность разместить детали СП.

Отдельные детали приспособления вычерчиваются в следующем порядке [237]:

- а) детали для направления инструмента;
- б) установочные детали (опоры);
- в) зажимы;
- г) корпус;
- д) второстепенные детали.

Рекомендуется при этом вести проектирование одновременно во всех проекциях, чтобы избежать ошибок.

Законченный чертеж СП должен содержать кроме габаритных размеров так называемые контрольные размеры, определяющие необходимую точность СП. По этим размерам производится приемка готового СП. Например, на чертеже кондуктора необходимо указать размеры кондукторных втулок с допусками и расстояние между центрами втулок. Центр одной из втулок связывают координатами с установочной базой для заготовки, а каждую из остальных втулок связывают размерами с первой. Во фрезерных приспособлениях изображают внешние очертания инструмента (тонкими штрихпунктирными линиями) и указывают размер под щуп от габарита. Кроме того, проставляются размеры, связывающие рабочие поверхности габарита с базирующими элементами СП. Указывают также все важнейшие посадочные размеры цилиндров и штоков пневмо- и гидрорыводов (и пневмогидрорыводов), шпонок для закрепления приспособления на столе станка и т.д. При проектировании приспособлений с отдельными откидными и поворотными элементами (планками, рычагами) их необходимо на чертеже изображать тонкими линиями в крайних (а при необходимости и промежуточных) положениях.

К сборочному чертежу СП на отдельном листе даётся спецификация деталей и узлов приспособления (по ГОСТу ЕСКД). Стандартные детали СП должны иметь наименования в соответствии со стандартами.

Процесс выполнения расчётов СП должен поясняться соответ-

ствующими расчётными схемами: структурной, силовой, кинематической и т.п. Например, токарный самоцентрирующий патрон на основе спирально-реечного механизма содержит: корпус, три шестерни, спиральный диск (совмещённый с зубчатым колесом), крышку, три цилиндрических штифта с резьбой, три винта. Возможны различные варианты графического изображения этого патрона: чертёж общего вида, сборочный чертёж, кинематическая схема, структурная схема для определения статической передаточной функции и т.п. Так на (рис.2.21) обозначены три входа (по углу поворота шестерен), три выхода (по радиальному перемещению кулачков). Кроме того: Ш1...Ш3 – шестерни, ЗК-СД – зубчатое колесо–спиральный диск, К1...К3 – кулачки патрона, ТСП – токарный самоцентрирующий патрон.

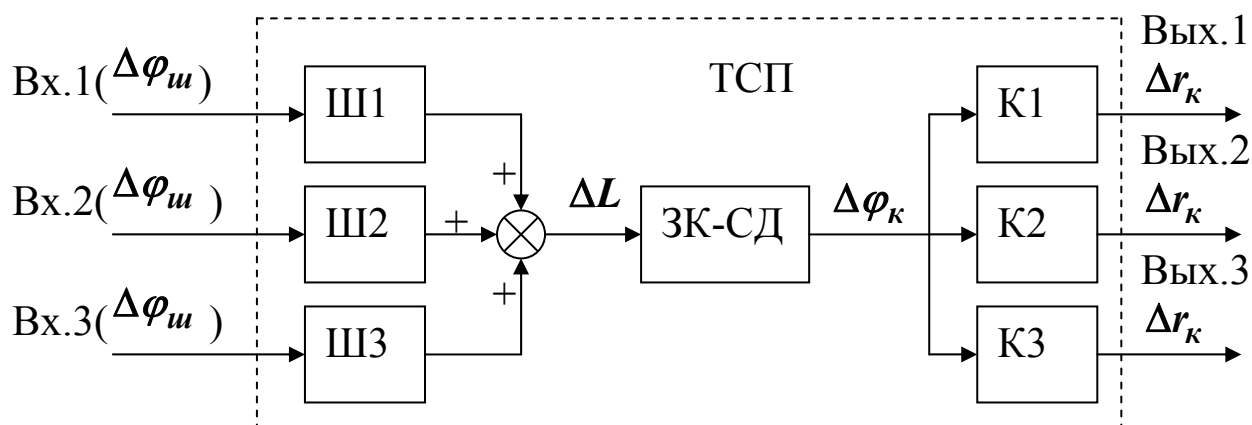


Рис.2.21. Структурная схема токарного самоцентрирующего патрона:  $\Delta\varphi_{ш}$ ,  $\Delta L$ ,  $\Delta\varphi_k$ ,  $\Delta r_k$  - приращения угла поворота входных шестерён, длины дуги обката по начальной окружности, угла поворота зубчатого колеса и осевого перемещения кулачков.

### 2.11.2. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КОНТРОЛЬНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ (КП).

Вид и конструкция контрольно-измерительных средств зависит от планируемой формы контроля. В целях обеспечения требуемого качества продукции применяются следующие формы организации контроля [237]:

- а) 100%-ный контроль готовых изделий;
- б) выборочный контроль (в том числе статистический контроль);
- в) активный контроль или контроль изделий в процессе их изготовления с немедленным воздействием на технологический процесс;

г) контроль средств производства.

Выбор вида контроля определяется условиями производства: программой выпуска изделий, местом контрольной операции в технологическом процессе, характером изделия и эксплуатационными требованиями и т.д.

Каждый из перечисленных видов контроля может осуществляться различными по конструкции и по принципу действия средствами контроля. Так, при 100%-ом контроле используют универсальные (индивидуальное и мелкосерийное производство), специализированные и специальные средства контроля (крупносерийное и массовое производство). В зависимости от степени механизации и автоматизации различают контрольные автоматы, полуавтоматы, механизированные и ручные КП, а также компьютеризированные КП и координатно-измерительные машины. При выборочном контроле также применяют универсальные средства и приспособления, дающие отсчет размеров по шкале.

Контроль в процессе обработки является наиболее прогрессивным. Этот вид контроля наиболее целесообразно применять на финишных операциях (шлифование, хонингование), где, с одной стороны, требуется высокая точность, а, с другой, экономические потери от брака особо велики.

В зависимости от принципа действия и конструкции измерительное устройство на станке может обеспечить отсчет размера, световой или звуковой сигнал о достижении заданного размера, переключение подачи, выключение станка. При выборе объекта проектирования предпочтение следует отдавать средствам активного контроля и компьютеризированным средствам, которые осуществляют автоматический сбор и статистическую обработку измерительных данных.

Контроль средств производства применяется для выявления и учета геометрических и кинематических погрешностей технологического оборудования, для проверки геометрических параметров сложных формообразующих инструментов (многоночных резьбошлифовальных кругов, червячных фрез, долбяков и т.п.).

Проектируемые КП могут иметь как предельные, так и отсчетные измерительные устройства. Предельные измерители (например, электроконтактные и другие) констатируют выход размеров за пределы установленного поля допуска, но не показывают действительных значений проверяемых размеров.

Отсчетные измерители (индикаторы часового типа, пневматические измерительные приборы и другие) позволяют определять действительные размеры.

Для контроля деталей крупносерийного и особенно массового производства в целях сокращения времени, затрачиваемого на контроль, целесообразно создание конструкций многомерных КП, применение механического привода, быстродействующих зажимов, использование пневматического, электрического и других методов измерений.

Многомерные контрольные приспособления, предназначенные для одновременного или последовательного контроля ряда элементов детали сложной конфигурации на одну установку, могут проектироваться для контроля заготовок, технологического межоперационного и окончательного контроля заготовок и деталей.

После выбора формы и принципа контроля разрабатывается схема КП. Особое внимание при этом следует уделить выбору базы измерения, т.е. поверхности детали, которой она устанавливается на приспособление относительно измерительного элемента. Выбор базы измерения зависит от того, на какой стадии технологического процесса производится измерение.

В приспособлениях для контроля заготовок и межоперационного контроля рекомендуется использовать технологические (установочные) базы. Для окончательного контроля готовых деталей используют конструкторские базы.

Исходным материалом для разработки схемы приспособления и окончательной отработки его конструкции должны служить технические условия и требования чертежа на изготовления детали или изделия.

При конструировании измерительных приспособлений и их отдельных узлов (зажимных, установочных, измерительных устройств) необходимо стремиться к использованию стандартизованных и нормализованных элементов (корпусов, стоек, передаточных рычагов, центров и т.п.).

В пояснительной записке отражают следующие вопросы:

- 1) технические условия и требования чертежа, подлежащие контролю;
- 2) описание конструкции проектируемого приспособления и принципа действия измерительных устройств;
- 3) обоснование целесообразности применения данного приспособ-

- ления;
- 4) расчет приспособления на точность измерения (определение погрешностей, связанных с установкой контролируемой детали в приспособлении, с точностью самих мерительных устройств и т.д.);
  - 5) расчет производительности КП.

При 100%-ном контроле необходимо произвести сопоставление времени проведения контрольной операции с ритмом выпуска деталей или изделий.

При изложении материала в записке следует использовать необходимые для понимания рассматриваемых вопросов схемы и эскизы; при описании конструкции спроектированного КП – ссылаться на соответствующие позиции чертежа КП.

### **Оформление чертежей контрольно-измерительных приспособлений**

Чертежи контрольно-измерительных приспособлений относятся к типу сборочных чертежей. Их выполняют, как правило, на листах формата А1 (594x841 мм) по ГОСТу ЕСКД. При невозможности поместить чертеж на одном листе, его помещают на двух или более листах с указанием на каждом листе его порядкового номера и количества листов, на которых вычерчено данное измерительное или контрольное приспособление.

Спецификацию к чертежу КП, составленную по принятой форме и с соблюдением необходимых требований, выполняют на отдельном листе и помещают в пояснительной записке.

Чертеж КП должен содержать [237]:

- 1) изображение КП с необходимым и достаточным количеством проекций. Иногда для лучшего представления конструкции и принципа работы проектируемого КП целесообразно использовать частичные или вспомогательные виды и виды отдельных частей КП, а также дополнительные разрезы и сечения;
- 2) в отдельных случаях на чертеже дополнительно следует дать принципиальную схему КП (электрическую, пневматическую, кинематическую и т.д.), уясняющую принцип действия данного приспособления;
- 3) габаритные размеры измерительного приспособления;
- 4) контрольные и координирующие размеры с допусками, характеризующие точность взаимного расположения элементов КП и



- проверяемые при его сборке и отладке;
- 5) допуски на взаимную непараллельность, неперпендикулярность, неплоскостность установочных поверхностей и несоосность осей центрирующих элементов;
  - 6) указания на характер сопряжений и посадок, а иногда на метод их обеспечения, если точность сопряжения обеспечивается не заданными отклонениями размеров, а пригонкой, подбором и т.п. (например, сверлить и развернуть в сборе, притереть, шабрить);
  - 7) указания о крайних (исходных и предельных) положениях движущихся элементов. При этом одно положение изображается, например, контурными линиями, второе – штриховыми с двумя точками;
  - 8) установочные или присоединительные размеры, т.е. размеры, определяющие правильность установки приспособления на месте его монтажа;
  - 9) часть требований может быть представлена в технических условиях, которые даются на том же листе чертежа.

Контролируемая деталь также вычерчивается на чертеже общего вида приспособления. Деталь изображается в том положении, которое она занимает в процессе контроля, причем деталь условно считается прозрачной и вычерчивается тонкой или штрих-пунктирной линией.

Разработку чертежа КП выполняют с соблюдением нормалей и ГОСТов на отдельные детали приспособления.

### **2.11.3. ВЫБОР И РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ**

При разработке технологических процессов крупносерийного и массового производств в пояснительной записке должны быть представлены средства автоматизации операций механической обработки деталей и сборки узлов или машин. Объектом частичной автоматизации операций технологического процесса могут быть [237]: устройства для автоматической загрузки заготовок на станки, механизмы автоматизации закрепления деталей на станке или в приспособлении, средства автоматического выключения станков и ограничения рабочих ходов, устройства для автоматизации рабочих узлов станков, устройства для размерной подналадки инструмента и периодического поворота заготовок (при многопозиционной обработке). При полной

автоматизации нескольких операций или всего технологического процесса – автоматические станочные линии.

На чертежах выбранное средство автоматизации должно быть представлено в виде чертежа, из которого отчетливо были бы понятны принцип его работы и взаимодействие деталей, а также способ соединения с основным станком, который им обслуживается. На чертеже указывают габаритные и установочные размеры, диапазон перемещения исполнительных элементов и т.п.

В пояснительной записке должно быть дано подробное описание работы разрабатываемого устройства, в случае большой конструктивной сложности принцип его работы дополнительно поясняется, например, кинематической схемой. Наряду с описанием способа автоматизации в пояснительной записке необходимо указать рабочие характеристики схемы, а наиболее важные из этих характеристик подтверждают расчетами.

Раздел пояснительной записки и чертежи устройства автоматизации по глубине разработки должны соответствовать техническому проекту на это устройство и быть пригодными для дальнейшей разработки в случае практического использования. Аналогичные требования предъявляются и к дипломным проектам, в которых разрабатывается, например, комплекс механического оборудования автоматической станочной линии.

В технологических процессах индивидуального и мелкосерийного производства возможна механизация отдельных элементов станочных операций. Наиболее оригинальные устройства из средств механизации должны быть представлены на чертежах и описаны в пояснительной записке.

Эффективность принятых средств механизации и автоматизации должна подтверждаться сроками окупаемости затрат на их изготовление и снижением себестоимости продукции, выпускаемой в условиях механизированного или автоматизированного производства.

## **2.12. НОРМИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

### **2.12.1. СТРУКТУРА ТЕХНИЧЕСКОЙ НОРМЫ ВРЕМЕНИ**

В условиях серийного и массового производства технические нормы времени на станочные работы устанавливаются расчётным

методом по нормативам времени, исходя из типового содержания операции, расчлененной до приемов или до комплексов приемов [237]. При заданном содержании операции, технических условиях на обработку, инструменте и станке определение технически обоснованной нормы времени на станочную работу производится в такой последовательности.

1. Анализируется и при необходимости корректируется разработанный технологический процесс нормируемой операции.
2. Для каждого перехода в соответствии с нормативами и паспортными данными станка устанавливается оптимальный (или рациональный) режим работы оборудования, при котором достигается более высокая производительность труда и экономичность обработки.
3. На основании установленного режима работы оборудования рассчитывается основное (технологическое) время для каждого перехода.
4. Для каждого перехода устанавливается содержание вспомогательной операции (по приемам или комплексам приемов) и определяется по нормативам времени её продолжительность (с учетом целесообразных совмещений и перекрытий по времени).
5. По нормативам в зависимости от вида обработки и группы станков определяется (в процентах от оперативного времени) время на обслуживание рабочего места, отдых и естественные надобности.
6. Определяется норма штучного времени.
7. В зависимости от условий выполнения работы для серийного производства устанавливается содержание подготовительно-заключительной работы и по нормативам определяется норма подготовительно-заключительного времени.

Норма времени на станочную работу состоит из нормы штучного времени ( $T_{ш}$ , мин) и нормы подготовительно-заключительного времени ( $T_{п.з}$ , мин). Для поддетальной калькуляции штучно-калькуляционное время на одну штуку ( $T_{ш.к}$ , мин) определяют по формуле [393]

$$T_{ш.к} = T_{ш} + \frac{T_{п.з}}{n_{ш}}, \quad (2.78)$$

где  $n_{ш}$  - число штук деталей в партии.

В состав нормы штучного времени  $T_{ш}$  входит основное (технологическое) время  $t_0$ , вспомогательное время  $t_в$ , время на обслуживание рабочего места  $t_{об.р.м}$  и время на отдых и естественные надобности  $t_{отд}$ . Норма штучного времени рассчитывается по формуле

$$T_{ш} = t_0 + t_в + t_{об.р.м} + t_{отд}. \quad (2.79)$$

Основное (технологическое) время  $t_0$  - это время, необходимое на непосредственное изменение геометрических формы и размеров обрабатываемой детали (станочные и слесарные работы), её качественного состояния (например, твёрдости) или на изменение взаимного расположения частей изделия (сборочные работы). Для операций обтачивания, строгания, фрезерования, шлифования и других основное время рассчитывают по формуле [393]

$$t_0 = \frac{L}{S_m} i = \frac{L}{nS} \frac{Z}{t}, \quad (2.80)$$

где  $L$  – расчетная длина обработки (общая длина прохода инструмента) в направлении подачи;  $S_m$  – подача инструмента (детали) в минуту, мм /мин;  $i$  – количество проходов;  $Z$  – припуск на обработку, мм;  $n$  – число оборотов (двойных ходов) детали (инструмента), мин;  $S$  – подача инструмента (детали) за один оборот (двойной ход), мм /об;  $t$  – глубина резания, мм.

Вспомогательное время  $t_в$  затрачивается рабочим на различные приемы, обеспечивающие выполнение основной работы и повторяющиеся либо с каждой обрабатываемой деталью, либо в определенной последовательности через некоторое их число.

Вспомогательное время подразделяется на составляющие:

- а) вспомогательное время на установку и снятие заготовки (это время зависит от веса и конфигурации заготовки, конструкции приспособления, характера и точности установки заготовки на станке);
- б) вспомогательное время, связанное с переходом, например, время на управление механизмами станка (это время зависит от точности и чистоты обрабатываемой поверхности, метода её обработки (продольное точение, нарезание резьбы резцом, сверление и другие), способа управления станком и конструкции режущего инструмента);
- в) вспомогательное время на промеры обрабатываемых поверхностей (это время зависит от конфигурации обрабатываемых деталей и их габаритных размеров, от точности обрабатываемых поверхностей и конструкции измерительного инструмента).

Сумма основного и вспомогательного времени составляет оперативное время  $t_{он}$

$$t_{он} = t_0 + t_в. \quad (2.81)$$

Время на обслуживание рабочего места  $t_{об.р.м}$  затрачивается рабочим на уход за рабочим местом на протяжении рабочей смены. В станочных работах время обслуживания рабочего места подразделяется на время технического и организационного обслуживания рабочего места:

- а) время технического обслуживания рабочего места  $t_{тех.р.м}$  затрачивается рабочим на уход за рабочим местом при выполнении конкретной работы. Сюда входит время на смену затупившегося инструмента, время на регулирование и подналадку станка в процессе работы, время на правку лезвийного инструмента оселком или шлифовального круга алмазом, а также время на уборку стружки во время работы;
- б) время организационного обслуживания рабочего места  $t_{орг.р.м}$  затрачивается рабочим на уход за рабочим местом на протяжении всей рабочей смены и преимущественно в начале и в конце рабочего дня. Сюда входит время на раскладку и уборку рабочего и вспомогательного инструмента (ключи, подкладки и т.п.) в начале и в конце смены и время на чистку и смазку в конце рабочей смены.

Время обслуживания рабочего места (техническое и организационное) и время на естественные надобности и отдых для упрощения расчетов определяют в процентном отношении от основного и вспомогательного времени, в связи с чем определение штучного времени в условиях массового и крупносерийного производства для станочных работ можно представить следующей формулой [237]

$$T_{шт} = t_0 + t_e + t_0 \frac{K_1}{100} (t_0 + t_e) \frac{K_2 + K_3}{100}, \quad (2.82)$$

где  $K_1$  – время на техническое обслуживание рабочего места в процентах от основного времени;  $K_2$  – время на организационное обслуживание рабочего места в процентах от оперативного времени;  $K_3$  – время на естественные надобности и отдых в процентах от оперативного времени.

Для упрощения расчета (в условиях мелкосерийного и серийного производства и при нормировании слесарно-сборочных работ во всех типах производства) формула для определения штучного времени  $T_{шт}$  может быть представлена в следующем виде [237]

$$T_{шт} = (t_0 + t_e) \left( 1 + \frac{K}{100} \right), \quad (2.83)$$

где  $K$  - суммарное время на обслуживание рабочего места, отдых и естественные надобности в процентах от оперативного времени.

Необходимо обратить внимание на особенности нормирования машинного времени для многоинструментальных работ. Общие методические указания по нормированию машинного времени при многоинструментальной обработке, а также соответствующие нормативы по расчёту режимов обработки имеются в литературе [64, 230, 279, 368, 370, 393].

### **2.12.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛИ ИЛИ СБОРКИ УЗЛА**

Современное состояние техники позволяет решать технологические задачи различными методами, обеспечивающими выполнения заданных норм качества изделия. Каждая технологическая операция и технологический процесс в целом могут быть разработаны в нескольких технически равноценных вариантах. Выбор оптимального варианта производится на основе технико-экономического сравнительного анализа путем сопоставления отдельных вариантов, каждый из которых оценивают системой объективных показателей, характеризующих эффективность и рентабельность сравниваемых вариантов.

Основным показателем рациональности технологического процесса является себестоимость продукции. Дополнительное сравнение вариантов технологического процесса может быть осуществлено посредством других показателей, например, трудоемкости изготовления деталей, коэффициентов использования материала, коэффициентов загрузки оборудования и т.п.

Существует несколько методов выбора оптимального варианта технологического процесса на основе сравнения себестоимости изделий.

#### **Определение оптимального варианта технологического процесса путём сравнения цеховых себестоимостей изделий [237]**

Данный метод позволяет наиболее полно определить себестоимость изделия и одинаково пригоден для выбора оптимального варианта технологического процесса применительно к механической обра-

ботке детали и к сборке узла или машины. Для сравнения вариантов технологического процесса методом технико-экономического анализа необходимо определить для каждого из них себестоимость изделия.

При заготовках разного вида себестоимость детали определяется

$$C = M + P + R. \quad (2.84)$$

При одних и тех же заготовках сравниваемые стоимости обработки определяется

$$C = P + R, \quad (2.85)$$

где  $M$  - затраты на материал;  $P$  - заработная плата основных производственных рабочих;  $R$  - цеховые накладные расходы.

В свою очередь

$$M = Q \cdot S_{k2} - q_{отх} \cdot S_{отх}, \quad (2.86)$$

где  $Q$  - вес заготовки, кг;  $S_k$  - цена 1 кг материала;  $q_{отх}$  - вес отходов, кг;  $S_{отх}$  - цена 1 кг отходов.

Заработная плата

$$P = \sum_1^n P_{он_i} = \sum_1^n t_{ум_i} \cdot S_{n_i}, \quad (2.87)$$

где  $P_{он_i}$  - заработная плата основных производственных рабочих за одну операцию;  $t_{ум_i}$  - штучное (или штучно-калькуляционное, в зависимости от вида производства) время одной операции;  $S_{n_i}$  - заработная плата в единицу времени для данного разряда работы;  $n$  - число операций.

Цеховые накладные расходы

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7, \quad (2.88)$$

где  $R_1$  - доля ежегодного отчисления на амортизацию станков;  $R_2$  - затраты на малый ремонт, осмотры и проверки станков, исчисляемые в процентах от их балансовой стоимости;  $R_3$  - отчисления на амортизацию приспособлений и покрытие расходов на их ремонт;  $R_4$  - расходы на режущий инструмент;  $R_5$  - затраты на оплату силовой электроэнергии;  $R_6$  - доплата и начисления на основную заработную плату производственных рабочих;  $R_7$  - цеховые расходы, выражающие постоянную или мало изменяющуюся по отношению к выпуску деталей часть затрат на их изготовление (эти затраты учитывают зарплату инженерно-технических работников, младшего обслуживающего и счетно-

конторского персонала, расходы по содержанию и текущему ремонту зданий и сооружений, расходы на освещение и отопление помещений цеха, затраты на наладку станка, расходы на эксплуатацию специальной оснастки и специального оборудования).

Указанные составляющие цеховых накладных расходов можно определить следующим образом

$$R_1 = \sum_1^n R'_{1i}; \quad (2.89)$$

$$R'_{1i} = \frac{\alpha_i \cdot S_{cmi} \cdot t_{umi}}{100 \cdot 60 \cdot F_{di} \cdot m_i \cdot \eta_{3i}}, \quad (2.90)$$

где  $\alpha_i$  - процент амортизационных отчислений от балансовой стоимости станка;  $S_{cmi}$  - балансовая стоимость станка (первоначальная стоимость) вместе с расходами на монтаж, установку, транспортировку и связанными с этим накладными расходами;  $F_{di}$  - действительный годовой фонд времени использования станка при работе в одну смену;  $m_i$  - число смен работы станка в сутки;  $\eta_{3i}$  - коэффициент загрузки станка во времени

$$R_2 = \sum_1^n R'_{2i}. \quad (2.91)$$

Здесь

$$R'_{2i} = \frac{\beta_i \cdot S_{cmi} \cdot t_{umi}}{100 \cdot 60 \cdot F_{gi} \cdot m_i \cdot \eta_{3i}}, \quad (2.92)$$

где  $\beta$  - процент отчислений от балансовой стоимости на малый ремонт, осмотры и проверки;

$$R_3 = \sum_1^n R'_{3i}. \quad (2.93)$$

Здесь

$$R'_{3i} = \frac{(\gamma + \delta) \cdot S_{npi}}{100 N_i}, \quad (2.94)$$

где  $\gamma$  - процент амортизационных отчислений;  $\delta$  - процент расходов на ремонт приспособлений;  $S_{npi}$  - затраты на приспособления;  $N_i$  - количество деталей, обрабатываемых в течение года с помощью данного приспособления;

$$R_4 \sum_1^n R'_{4i}. \quad (2.95)$$



Здесь

$$R'_{4i} = \left[ S_{ni} \cdot Z_i + t_{3i} P_i \left( 1 + \frac{\lambda_i}{100} \right) \right] \cdot \frac{t_{oi}}{t_{ci}}, \quad (2.96)$$

где  $S_{ni}$  - затраты на инструмент;  $Z_i$  - число заточек инструмента до полного использования его рабочей части;  $t_{3i}$  - норма времени на заточку;  $P_i$  - минутная заработная плата за заточку инструмента;  $\lambda_i$  - процент цеховых накладных расходов от основной заработной платы рабочих-заточников на содержание заточного отделения;  $t_{oi}$  - основное время данной операции;  $t_{ci}$  - период стойкости инструмента.

При обработке детали несколькими инструментами расходы на режущий инструмент определяются суммированием расходов на отдельные инструменты

$$R_5 = \sum_1^n R'_{5i}. \quad (2.97)$$

Здесь

$$R'_{5i} = S_3 \cdot \frac{N_y \cdot \eta_m \cdot t_n}{60 \cdot \eta_c \cdot \eta}, \quad (2.98)$$

где  $S_3$  - цена 1 квт-ч силовой электроэнергии;  $N_y$  - установочная мощность электродвигателей станка;  $\eta$  - к.п.д. электродвигателей;  $\eta_m$  - коэффициент загрузки электродвигателей станка;  $\eta_c$  - коэффициент, учитывающий потери в сети;

$$R_6 = \sum_1^n R'_{6i}. \quad (2.99)$$

Здесь

$$R'_{6i} = P_{oni} \left[ \frac{\rho}{100} + \frac{\tau}{100} \left( 1 + \frac{\rho}{100} \right) \right], \quad (2.100)$$

где  $\rho$  - процент доплаты от основной заработной платы;  $\tau$  - процент начислений от суммы основной и дополнительной заработной платы

$$R_7 = \sum_1^n R'_{7i}. \quad (2.101)$$

Здесь

$$R'_{7i} = \frac{\omega P_{oni}}{100}, \quad (2.102)$$

где  $\omega$  - процент постоянных затрат от основной заработной платы производственных рабочих (при отсутствии данных о величине коэффициента  $\omega$  процент постоянных расходов определяется путем

вычитания из общего числа процентов накладных расходов по цеху (обычно  $\approx 300-350\%$ ) числа процентов, приходящихся на остальные составляющие накладных расходов).

При определении оптимального варианта технологического процесса сборки используются формулы (2.87)–(2.102), составляющими элементами которых являются нормативные элементы сборочных работ.

Следует отметить, что при выборе оптимального варианта технологического процесса нет необходимости в определении полной себестоимости продукции. Сравнивают лишь те затраты, которые изменяются в разных вариантах технологического процесса.

Определение оптимального варианта технологического процесса производится в следующем порядке:

- 1) составляются маршруты механической обработки детали или сборки изделия по составляемым вариантам;
- 2) определяются нормативные элементы составляющих формулы себестоимости;
- 3) по формулам (2.84)–(2.102) определяются себестоимости всего изделия при полностью различающихся вариантах технологического процесса или части затрат, которые изменяются в сравниваемых вариантах. В последнем случае в целях уменьшения объема вычислений можно ограничиться определением затрат на три-четыре операция, наибольшим образом отличающих сравниваемые варианты технологических процессов.

### **Определение оптимального варианта технологического процесса графо-аналитическим методом [237]**

Если при сопоставлении различных вариантов технологического процесса необходимо учитывать изменения программы выпуска изделий, следует воспользоваться графо-аналитическим методом.

Затраты на изготовление изделий в течение определенного календарного срока (полные или только частичные, изменяющиеся в сравниваемых вариантах технологических процессов) могут быть представлены формулой

$$C = A \cdot x + R_7, \quad (2.103)$$

где  $A$  - переменные расходы,  $x$  - программа выпуска изделий в течение рассматриваемого календарного срока;  $R_7$  - постоянные расходы для программы  $x$ , определяемые формулой (2.102).

В свою очередь

$$A = M + P + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6. \quad (2.104)$$

Значения слагаемых определяются по формулам (2.86)–(2.100).

Формула (2.103) выражает уравнение прямой линии в координатах  $C - x$ . Увеличение программы выпуска изделий вызывает необходимость ввода дополнительного оборудования и комплектов оснастки, затраты на использование и погашение стоимости которой (через определенные интервалы изменения программы) будут резко повышать первоначальную сумму расходов. На графике  $C - x$  себестоимости изготовления изделий по каждому варианту технологического процесса в этих случаях будут изображаться ломаными линиями. Каждая вертикальная ступень в ломаных линиях соответствует размеру увеличения себестоимости изделия при достижении программой такого значения  $|x_i| m$  ( $i$  - номер варианта;  $m$  - программа данного варианта), когда потребное количество каждого из видов оборудования и оснастки увеличивается на одну единицу.

Примечание. Исключение из расчетов одинаковых показателей для сравнения только изменяющихся затрат изменяет на графике лишь углы наклона линий себестоимости (коэффициенты  $A$ ). Относительное расположение линий сохраняется. Таким образом, графоаналитический метод позволяет для определения оптимального варианта технологического процесса сравнивать лишь те затраты, которые изменяются в различных вариантах технологического процесса.

### **Определение оптимального варианта технологического процесса нормативным методом [237]**

Данный метод предусматривает наличие заранее разработанных норм по всем статьям прямых затрат на производство, приведенным к станко-минутам. При отсутствии таких норм на предприятии могут быть использованы справочные данные. Метод характеризуется малым объемом расчетов. Себестоимость полной обработки детали или выполнения отдельной операции механосборочного производства по каждому из вариантов технологического процесса определяется суммированием затрат по элементам за одну минуту и умножением итогов на фактическое время обработки изделия, т.е.

$$C = M + (Z_c + Z_n + Э + И + П + А + О + P) T_{cp}, \quad (2.105)$$

где  $M$  - стоимость материала или заготовок;  $Z_c, Z_n$  - заработная плата, соответственно, станочника и наладчика с начислением по соци-

альному страхованию;  $\mathcal{E}$  - затраты на электроэнергию для технологических целей;  $\mathcal{I}$  - затраты на инструмент;  $\mathcal{П}$  - затраты на приспособления;  $\mathcal{A}$  - амортизационные отчисления;  $\mathcal{O}$  - затраты на содержание оборудования;  $\mathcal{P}$  - затраты на текущий ремонт оборудования;  $T_{cp}$  - время выполнения операций (определяется нормированием).

Нормативные данные при проведении сравнения вариантов технологического процесса следует записывать в таблицу (табл.2.18).

Таблица 2.18

Определение себестоимости

№ п.п.	Элементы затрат	Себестоимость	
		вариант А	вариант В
1	.....		
2	.....		
3	Итого себестоимость станко-минуты обработки детали	$S_1$	$S_2$
	Фактическое время обработки детали	$t_1$	$t_2$
	Итого затраты на обработку	$S_1 t_1$	$S_2 t_2$
	Себестоимость заготовки	$b_1$	$b_2$
	Полная себестоимость обработки детали	$S_1 t_1 + b_1$	$S_2 t_2 + b_2$

Сравнение различных вариантов технологических процессов производится аналогичным образом.

Дополнительные критерии оценки сравниваемых технологических процессов:

а) трудоемкость

$$T_{\partial} = \sum_{i=1}^n t_{ум i}, \quad (2.106)$$

где  $t_{ум}$  - нормы времени по каждой операции;

б) коэффициент использования материала

$$K_{ум} = \frac{M_{дет}}{M_{заг}}, \quad (2.107)$$

где  $M_{дет}$  и  $M_{заг}$  - соответственно, масса готовой детали и заготовки;

в) коэффициент загрузки оборудования

$$\eta_{ст} = \frac{N_p}{N_n}, \quad (2.108)$$

где  $N_p$  и  $N_n$  - соответственно расчетное и принятое число станков, (позволяет более полно охарактеризовать выбранный вариант технологического процесса).

## ГЛАВА 3

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

#### 3.1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОКАРНО-РЕВОЛЬВЕРНОЙ ОПЕРАЦИИ

Исходный чертёж детали и последующие операционные эскизы, характеризующие её обработку, приведены на рис.3.1 [80] и рис.3.2, соответственно.

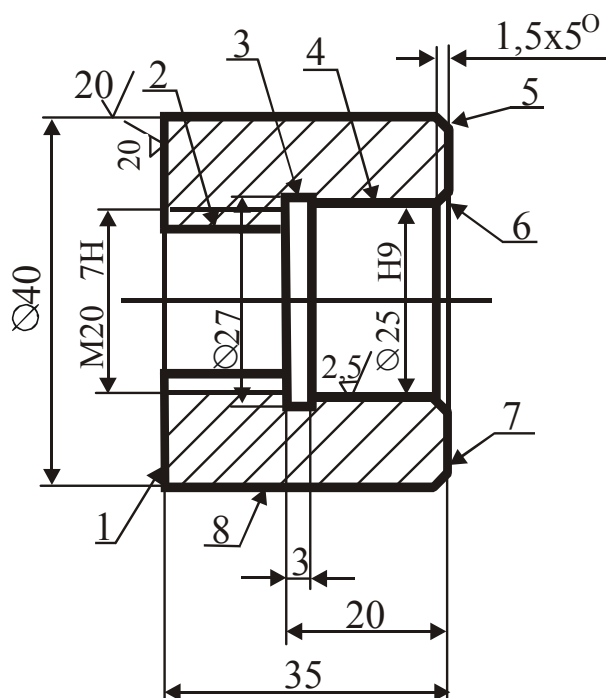


Рис.3.1. Чертёж детали “втулка”.

Материал детали: Ст.А12 по ГОСТ 1414-75 (сталь углеродистая сернистая, относится к группе автоматных сталей, содержание серы – до 0,3 %,  $\sigma_s = 500 \text{ МПа/м}^2$ ). Масса детали 0,23 кг. Годовая программа выпуска 600...1000 шт. Неуказанные предельные отклонения  $h14, H14, \pm IT14/2$ .

Неуказанная шероховатость  $R_a = 10$  мкм.

В качестве исходной заготовки выбираем прутковую калиброванную сталь, которая изготавливается либо холодной

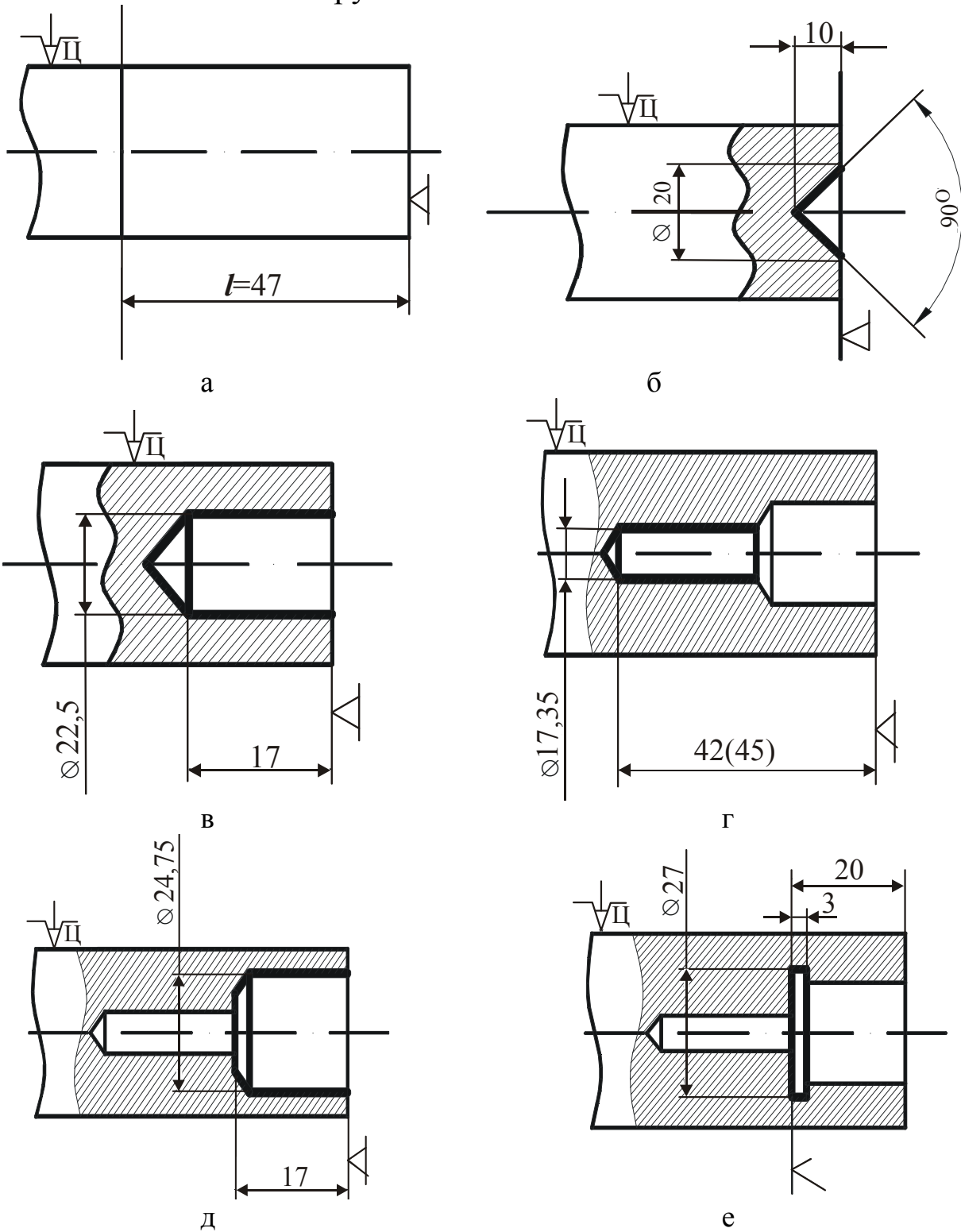
прокаткой, либо волочением из горячекатаного проката. Целесообразность револьверной обработки вытекает из следующих рассуждений [80].

1. Деталь изготавливают из прутка (на револьверных станках механизированы подача и зажим прутка).
2. Предполагается последовательное участие большого количества инструментов.
3. Производство серийного типа.

Операция на токарно-револьверном станке будет состоять из одного установа и нескольких позиций и переходов (рис.3.2).

Далее выбирают технологическое оборудование и оснастку. Например, можно выбрать механизированный и частично автоматизированный токарно-револьверный станок мод.1Г340П. Этот станок

имеет круглую 16-ти позиционную револьверную головку с горизонтальной осью вращения (параллельно оси шпинделя станка). Кроме того, имеется командоаппарат, гидравлический механизм подачи и зажима прутка (станочное приспособление), копирная линейка, резьбонарезное устройство (позволяет нарезать резьбу на левой части заготовки). Командоаппарат в каждой позиции револьверной головки автоматически изменяет частоту вращения шпинделя и подачу заготовки относительно инструмента.



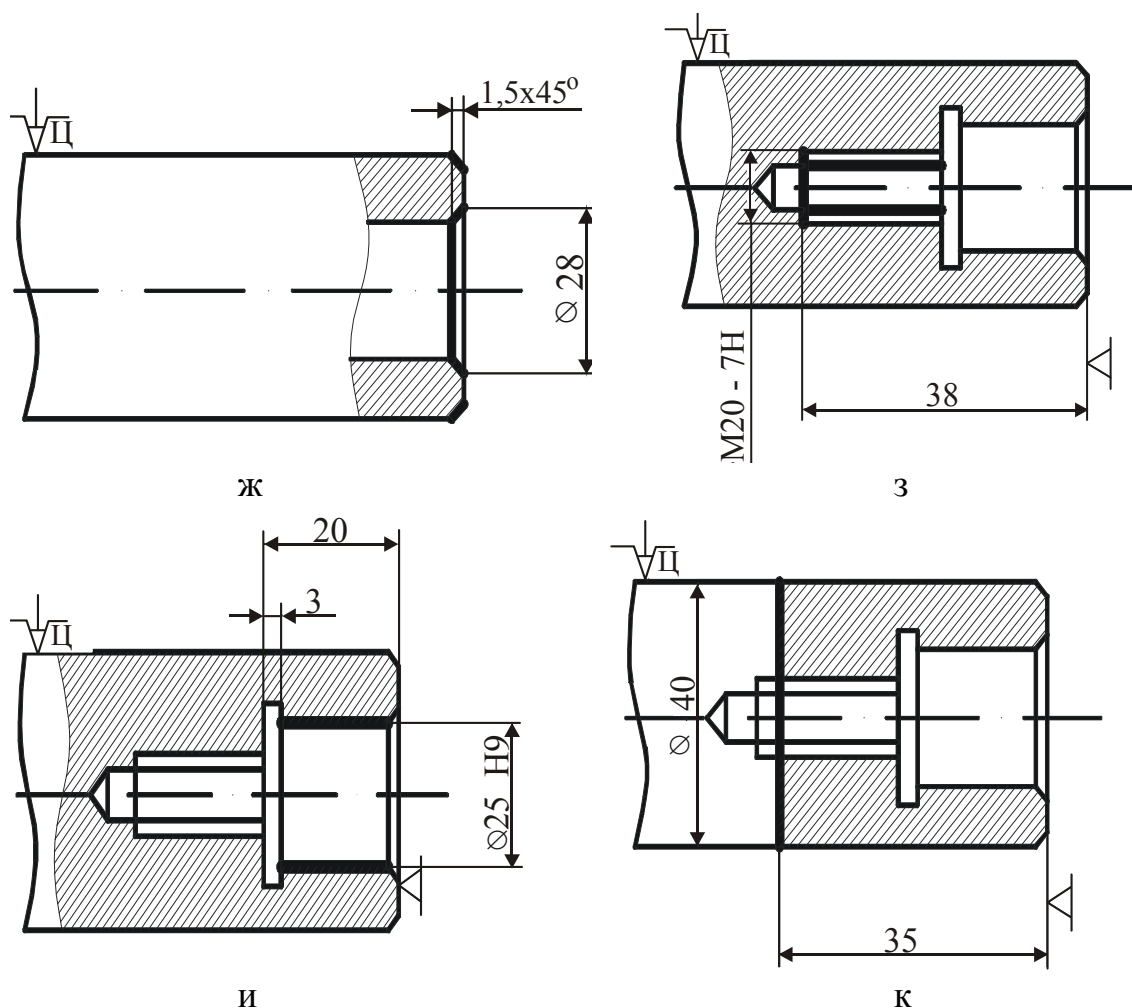


Рис. 3.2. Операционные эскизы обработки заготовки на токарно-револьверном станке: а, б, в, г, д, е, ж, з, и, к – последовательно сменяемые позиции и переходы обработки.

Таблица 3.1

Технологические переходы обработки заготовки

Переход	Содержание перехода
1	Подать пруток до упора и закрепить (рис.3.2, а)
2	Подрезать торец, выдерживая размер 45 мм от торца цанги, окончательно (на рис.3.2 не показано)
3	Центровать торец, выдерживая размер $\varnothing 20$ мм (рис.3.2, б)
4	Сверлить отверстие $\varnothing 22,5$ мм, выдерживая размер 17 мм (рис.3.2, в)
5	Сверлить отверстие $\varnothing 17,35$ мм, выдерживая размер 42...45 мм (рис.3.2, г)
6	Зенкеровать отверстие $\varnothing 24,75$ мм, выдерживая размер 17 мм (рис.3.2, д)
7	Расточить канавку $\varnothing 27$ мм шириной 3 мм, выдерживая размер 20 мм (рис.3.2, е)
8	Зенкеровать фаску в размер $\varnothing 28$ мм и точить фаску 1,5 x 45° одновременно (рис.3.2, ж)
9	Нарезать резьбу метчиком М20-7Н (рис.3.2, з)
10	Развернуть отверстие $\varnothing 25$ Н9 начисто (рис.3.2, и)
11	Отрезать заготовку, выдержав размер 35 мм (рис.3.2, к)

Здесь следует отметить, что ещё большей эффективностью отличается токарно-револьверный станок с ЧПУ. Имеются такие станки с двумя револьверными головками (с горизонтальной и вертикальной осями вращения). Они позволяют реализовать групповую технологию обработки деталей, имеющих общие конструкторско-технологические признаки, на основе групповой управляющей программы, записанной в параметрическом виде.

### 3.2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ

Величина припуска связана с допусками на промежуточные размеры, получаемые на разных операциях технологического процесса или на разных переходах (для одной операции). Межоперационный припуск (на границе двух смежных операций) предопределяется величинами допусков двух смежных операций ( $(i-1)$ -я и  $i$ -я операции).

При выполнении операции шлифования за несколько технологических переходов припуски на эти переходы предопределяются допусками на промежуточные размеры, получаемые на этих переходах (т.е. на  $(i-1)$ -м и  $i$ -м переходах). Припуск на  $i$ -й технологический переход называется межпереходным и связан с одним из трех элементов режима резания – глубиной резания (которая в свою очередь может быть лимбовой  $t_l$  и фактической  $t_f$ ). Различие между глубинами  $t_l$  и  $t_f$  характеризуют величину упругого технологического отжатия  $y_i$ . Для операций лезвийной обработки, как правило, глубину резания принимают равной величине межоперационного (межпереходного) припуска, а затем, с учетом выбранной глубины резания, определяют величину подачи, скорость резания, частоту вращения шпинделя. Особенностью операций шлифования является многопереходное или многопроходное удаление припуска, соответственно, для переменных и постоянных глубин шлифования.

Глубина резания при шлифовании оказывает существенное влияние на теплонапряжённость процесса и, как следствие, на производительность обработки [383]. По этой причине шлифовальные операции оказываются более трудоемкими по сравнению с другими операциями механической обработки лезвийным инструментом. Проведенные нами экспериментальные исследования операций черного и



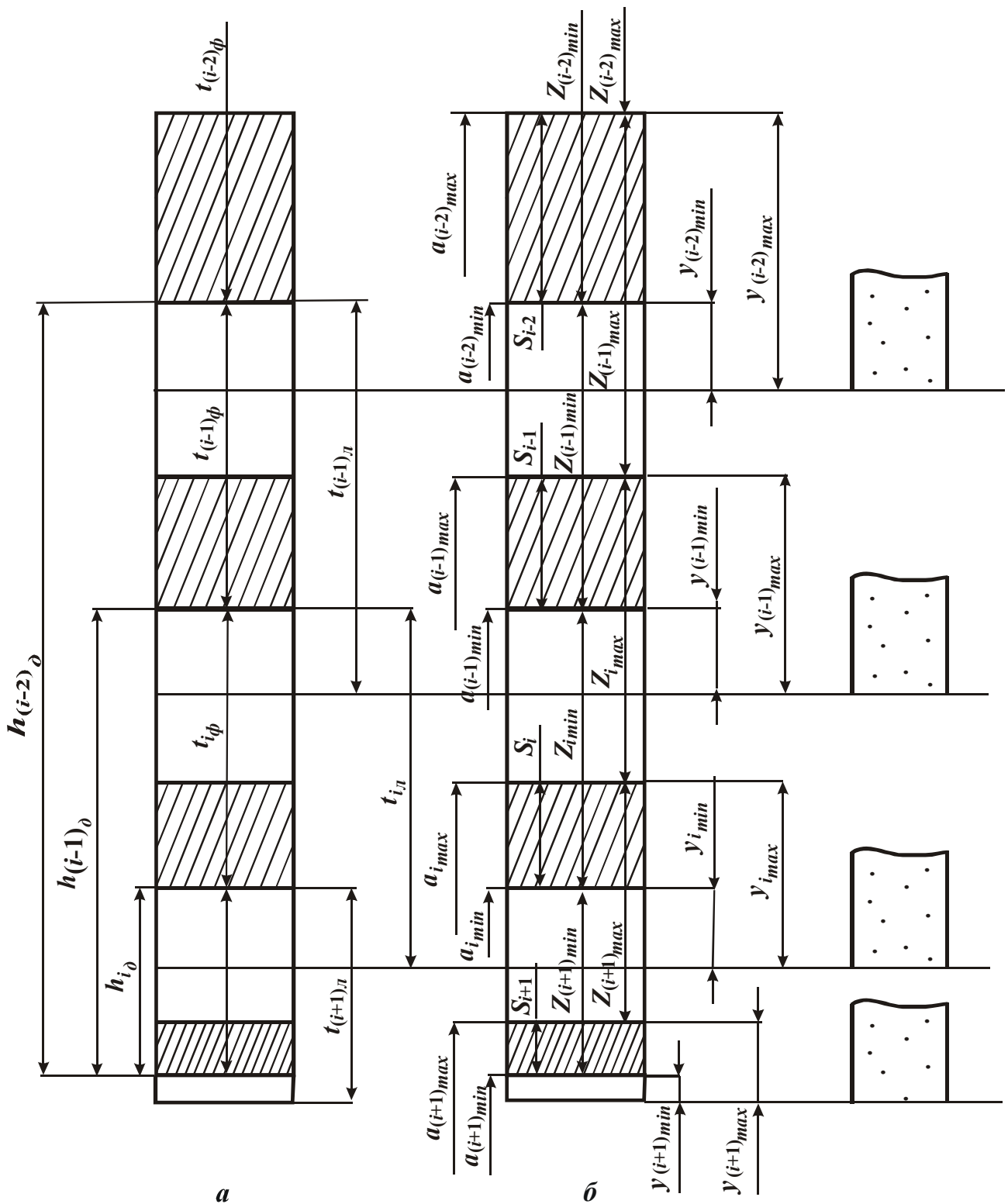


Рис. 3.3. Схема расположения припусков и допусков при шлифовании по МАПР в частном случае при  $y_i = y_{i\min}$  ( $1 \leq i \leq n$ ) (а) и для  $(i-2)$ -ого,  $(i-1)$ -ого и  $i$ -ого технологических переходов (б).

получистового шлифования труднообрабатываемых материалов показали, что глубина образуемого на предшествующем переходе шлифования дефектного слоя ( $h_\delta$ ) часто превышает другие составляющие

межпереходного припуска (высота шероховатости  $R_z$  и пространственное отклонение  $\rho$  от предшествующего перехода, и погрешность установки  $\varepsilon_y$  для данного перехода). По этой причине для указанных случаев величину минимального припуска на соответствующий переход (проход) шлифования можно выбирать исходя из условия, что образуемый на предшествующем переходе (проходе) дефектный слой по величине не должен превышать припуска, оставшегося на последующие переходы (проходы) шлифования [409].

В качестве примера расположения межпереходных припусков, удаляемых при шлифовании (например, плоском шлифовании на станках с прямоугольным столом и горизонтальным шпинделем), рассмотрим структурную схему расположения припусков и допусков для различных технологических переходов шлифования (рис.3.3). На схеме (правая сторона рис.3.3) показаны положения шлифовального круга, выставленного по лимбу настроенного на размер станка (метод автоматического получения размеров или МАПР).

Заштрихованные зоны соответствуют допускам на промежуточные размеры, получаемые в ходе послойного удаления припуска. Величина этих допусков определяется, например, разностью упругих отжатий при шлифовании с разной глубиной резания или колебаниями жесткости плоскошлифовальных станков, имеющих в цехе (на участке). Например, для  $(i-2)$ -ого и  $(i-1)$ -ого и  $i$ -ого технологических переходов, соответственно, получаем следующие допуски ( $S_{i-2}$ ,  $S_{i-1}$  и  $S_i$ ) на промежуточные размеры (рис.3.3,а)

$$S_{i-2} = Y_{(i-2)max} - Y_{(i-2)min}, \quad (3.1)$$

$$S_{i-1} = Y_{(i-1)max} - Y_{(i-1)min}, \quad (3.2)$$

$$S_i = Y_{imax} - Y_{imin} \quad (3.3)$$

и фактические глубины резания при шлифовании (рис.3.3,б)

$$Z_{(i-2)min} = t_{(i-2)\phi}, \quad (3.4)$$

$$Z_{(i-1)min} = t_{(i-1)\phi}, \quad (3.5)$$

$$Z_{imin} = t_{i\phi}. \quad (3.6)$$

Кроме того, на рис.3.3,б принято, что величины упругих отжатий  $Y_{(i-2)}$ ,  $Y_{(i-1)}$ ,  $Y_i$  и  $Y_{(i+1)}$  равны минимальным значениям, т.е.  $Y_{(i-2)min}$ ,  $Y_{(i-1)min}$ ,  $Y_{imin}$  и  $Y_{(i+1)min}$ , соответственно.

Для определения трудоемкости операции шлифования необходимо решить задачу распределения припуска на переходы шлифова-

ния с учётом упругих технологических отжатий. Максимальная производительность шлифования может быть обеспечена при оптимальном распределении припуска на переходы при условии [409, 410]

$$h_{\partial.k} = \frac{Z_{ocm.k} + Z_0}{\xi_k}, \quad (3.7)$$

где  $Z_{ocm.k}$  - оставшийся к моменту  $k$ -го перехода припуск на данной операции шлифования;  $Z_0$  - припуск, предусмотренный на последующую операцию;  $\xi_k$  - коэффициент запаса по прижогу, показывающий, на какую часть припуска может проникать дефектный слой.

Оставшийся припуск на данной операции после любого  $k$ -го перехода можно представить в виде

$$Z_{ocm.k} = \sum_{i=k+1}^n t_i, \quad (3.8)$$

где  $t_i$  - глубина шлифования на  $i$ -м переходе;  $n$  - число переходов шлифования, необходимое для удаления припуска.

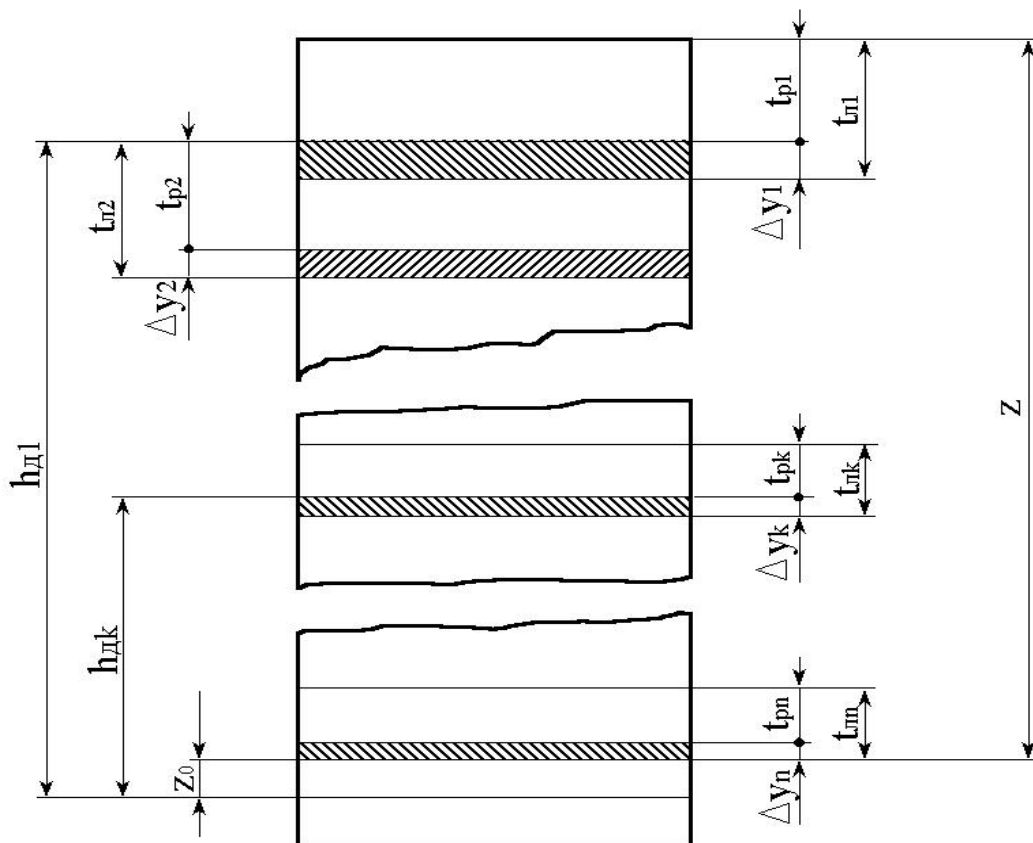


Рис. 3.4. Схема для расчёта распределения припуска на переходы шлифования.

Учитывая для каждого  $k$ -го перехода величину отжатия, получим фактическую (реальную) глубину шлифования

$$t_{pk} = t_{lk} - \Delta y_k, \quad (3.9)$$

где  $t_{lk}$  - установленная по лимбу глубина шлифования;  $\Delta y_k$  - величина упругого технологического отжатия (рис.3.4).

Припуск на обработку  $Z$  удаляется за  $n$  переходов. Фактическая и установленная по лимбу глубины резания на первом технологическом переходе составляют, соответственно,  $t_{p1}$  и  $t_{l1}$ , а величина упругого отжатия  $\Delta y_1$ . На втором переходе указанные параметры, соответственно, равны:  $t_{p2}$ ,  $t_{l2}$ ,  $\Delta y_2$ . На любом  $k$ -м переходе ( $1 \leq k \leq n$ ):  $t_{pk}$ ,  $t_{lk}$ ,  $\Delta y_k$ . На последнем переходе  $t_{pn}$ ,  $t_{ln}$ ,  $\Delta y_n$ . Задача расчета распределения припуска на переходы заключается в определении такой глубины резания  $t_{pk}$ , при которой образуется дефектный слой  $h_{dk}$ , равный оставшемуся припуску (или части его) на обработку для любого  $k$ -го перехода. Величина  $Z_0$  также включается в этот оставшийся припуск. Кроме того, видно, что упругие отжатия  $\Delta y_1$ ,  $\Delta y_2$ ,  $\Delta y_k$ ,  $\Delta y_n$  последовательно уменьшаются по величине, что соответствует общепринятой схеме расположения полей припусков и допусков на различных технологических переходах. Взаимосвязь между рис.3.3 и рис.3.4 обуславливается выполнением условий  $i - 2 = 1$ ,  $i - 1 = 2$ ,  $i = 3$  и  $i + 1 = 4$ .

## ГЛАВА 4 ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ

### 4.1. ЗНАЧЕНИЕ СБОРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Процесс сборки является заключительным этапом изготовления машины, который оказывает существенное влияние на ее эксплуатационные свойства. Обеспечение высоких эксплуатационных качеств машины зависит не только от создания удачной конструкции, но также от качества изготовления деталей и высококачественного проведения всех этапов сборки (то есть сборки и регулировки отдельных сборочных единиц – узлов и общей сборки и испытаний изготавливаемого изделия в целом). Это связано с тем, что в процессе сборки по разным причинам могут возникнуть погрешности взаимного расположения деталей, существенно снижающие служебные качества собираемого изделия. Причинами возникновения таких погрешностей могут быть:

1. Погрешности ориентации собираемых деталей, нарушение правильной последовательности затяжки резьбовых соединений.
2. Образование задиров при запрессовке сопрягаемых поверхностей деталей.
3. Попадание грязи и стружки между сопрягаемыми поверхностями и др.

Сборка может осуществляться простым соединением деталей, их запрессовкой, свинчиванием, сваркой, пайкой, клепкой и т. д.

По объему выполнения сборочных работ организационные формы сборки подразделяются на общую и узловую. Объектом общей сборки является изделие, а объектом узловой сборки – сборочная единица или узел.

В единичном и мелкосерийном производствах преимущественно применяется общая сборка и лишь малая доля сборочных операций выполняется над отдельными сборочными единицами.

С увеличением серийности производства возрастает объем разделения изделия на отдельные сборочные единицы. В условиях массового и крупносерийного производства объем узловой сборки становится равным и даже превосходит объем общей сборки. По стадии организации сборочных операций процесс сборки подразделяется на предварительную сборку и промежуточную сборку.

**Предварительная сборка** сопровождается последующей раз-

боркой. Она производится с целью определения в собранном виде размера замыкающего звена, которое компенсирует все погрешности звеньев размерной цепи. Например, регулировка зазоров в конических роликоподшипниках производится с помощью прокладки, которая устанавливается между корпусом и крышкой (рис. 4.1). Для определения толщины прокладки производится предварительная сборка. Крышка с помощью болтов прижимает наружное кольцо подшипника с силой, необходимой для полного выбора зазоров в подшипниках. После этого производится измерение зазора между крышкой и корпусом  $\Delta$ .

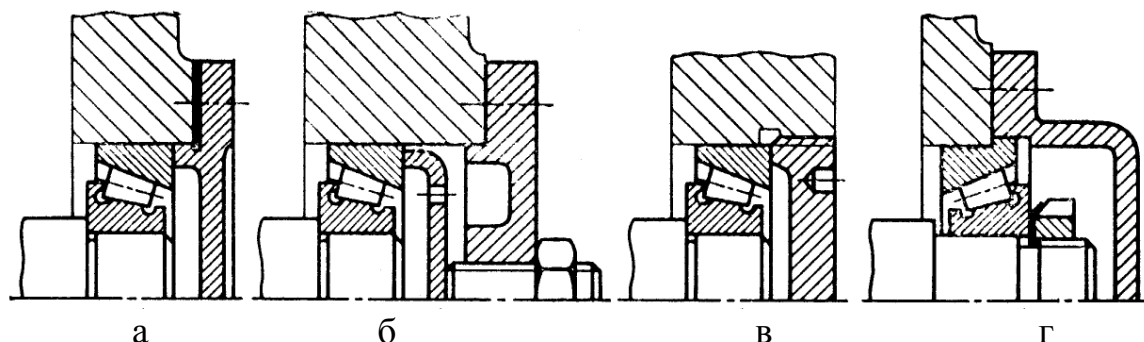


Рис. 4.1. Способы регулирования зазора в конических роликоподшипниках: а – с помощью прокладки; б– регулировочным винтом; в и г – регулировочной гайкой.

Определяется толщина прокладки, которую необходимо подложить под крышку

$$\delta = \Delta + C,$$

где  $C$  – осевое перемещение кольца, обеспечивающее требуемый радиальный зазор  $e$  и зазор по линии давления  $\lambda$  (рис. 4.2);  $e = 2c \cdot \operatorname{tg} \beta$ ;

$$\lambda = e \cdot \cos \beta.$$

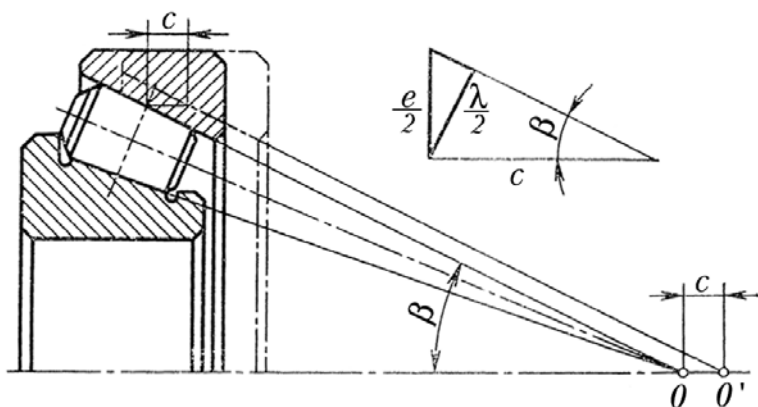


Рис. 4.2. Схема регулирования радиального зазора конического роликоподшипника.

Прокладки изготавливают из калиброванного металла. После постановки прокладки между корпусом и крышкой производится окончательная сборка узла подшипника.

**Промежуточная сборка** осуществляется для выполнения сов-

местной обработки. Например, сборка корпуса редуктора с крышкой для последующей совместной обработки отверстий под подшипники или сборка шатуна с крышкой для последующей совместной обработки отверстия под шатунные шейки коленчатого вала и т. д.

По методу образования соединения сборка подразделяется:

- на слесарную сборку, т. е. сборку изделия или его узлов при помощи слесарно-сборочных операций;
- монтаж, т. е. установку изделия на место его постоянной работы;
- электромонтаж, т. е. монтаж электрооборудования или его составных частей, имеющих токоведущие элементы;
- сварку, пайку, клепку и склеивание.

Следует отметить, что наиболее перспективным методом неразъемного соединения является склеивание. При склеивании не происходит деформации сопряженных деталей, не требуется нагревания. Соединения устойчивы против воздействия керосина, бензина, масла, воды, кислот и щелочей.

Сравнительные данные по прочности соединения на сдвиг приведены ниже:

- пресовая посадка втулки – 1570 Н;
- склеивание карбонильным клеем втулки с валом, соединенных по скользящей посадке – 4540 Н.

## **4.2. ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ФОРМЫ СБОРКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

По форме организации сборка может быть стационарной и подвижной.

В первом случае изделие собирается на стационарном стенде, к которому подаются все необходимые детали и узлы для сборки. Во втором случае изделие в процессе сборки перемещается от одного рабочего места к другому. При этом на каждом рабочем месте выполняется постоянно одна и та же операция одним рабочим или бригадой сборщиков. Выбор организационной формы сборки определяется типом производства. Стационарная – в единичном и мелкосерийном производствах, подвижная – в крупносерийном и массовом производствах.

Стационарная сборка может выполняться концентрированным и дифференцированным методами. В первом случае вся сборка машины из отдельных деталей и узлов производится от начала до конца

одной бригадой. Процесс сборки не расчленяется на отдельные операции, на которых возможна специализация работ. Метод сборки требует высокой квалификации всех сборщиков. Метод имеет низкую производительность, применяется в единичном производстве.

В серийном и массовом производствах применяется дифференцированный метод сборки, который характерен тем, что сборочный процесс разбивается на ряд отдельных операций, каждая из которых выполняется отдельной специализированной группой рабочих.

При выпуске изделий большими партиями применяют поточный метод стационарной или подвижной сборки. Стационарная поточная сборка применяется для сборки громоздких изделий, перемещение которых затруднено. Изделие устанавливается на специальный стенд, и к нему поочередно подходят бригады рабочих, которые выполняют строго определенную операцию. После завершения операции бригада слесарей-сборщиков переходит к следующему стенду и там выполняет ту же самую операцию.

При подвижной поточной сборке изделие находится на конвейере и передвигается непрерывно с некоторыми остановками через определенные промежутки времени.

На рис. 4.3 показаны схемы ленточных конвейеров с различными вариантами расположения верстаков на участках сборки.

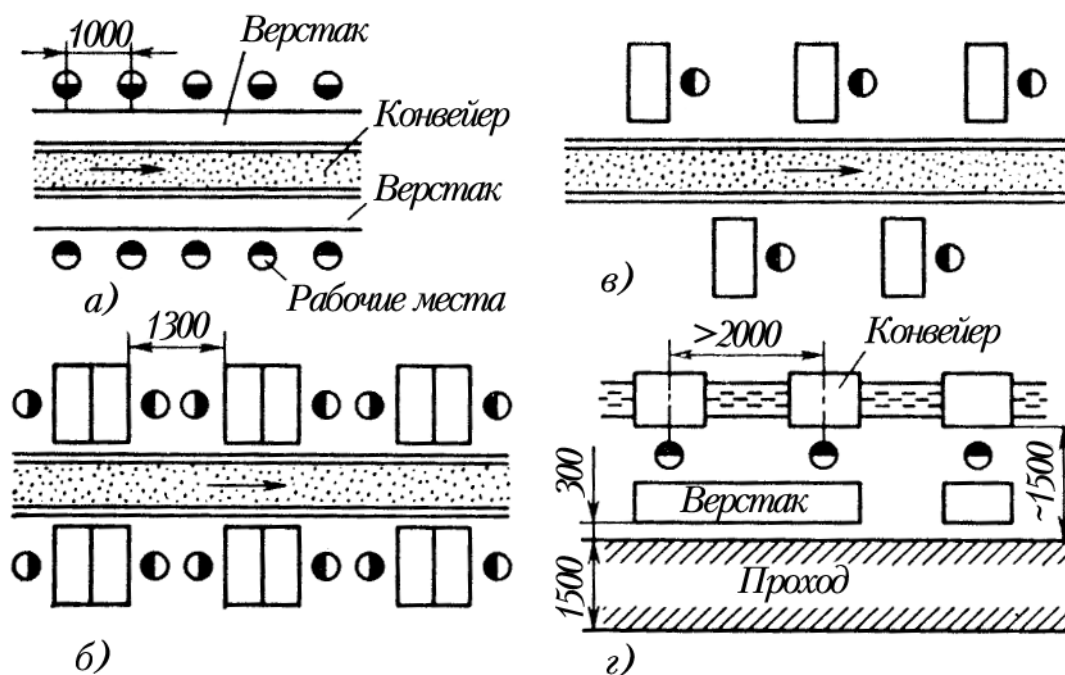


Рис. 4.3. Схема расположения верстаков на участках сборки: а – узкий длинный верстак шириной 0,4 – 0,6 м; б, в – индивидуальные рабочие столы размером 0,6 – 1 м; г – приводной конвейер с тележками.



Конвейеры представляют собой плоскую тканепрорезиненную ленту шириной 200 – 800 мм. Рабочая часть ленты скользит по гладкому деревянному или металлическому столу. Скорость движения ленты 0,02 – 0,05 м/с.

Процесс сборки разбивается на такое количество операций, чтобы длительность каждой из них была равной или кратной такту выпуска изделия на данной поточной линии. Поточная сборка может быть организована со свободным или принудительным перемещением объекта. В первом случае рабочий передает собираемое изделие на соседнюю операцию по мере выполнения собственной работы, а во втором – при работе с принудительно регулируемым ритмом. Момент передачи выполненной работы на следующую операцию определяется сигналом (световым или звуковым) или скоростью непрерывно или периодически движущегося конвейера.

Межоперационное перемещение собираемого изделия при поточной сборке осуществляется: вручную или с помощью тележек, наклонного лотка или рольганга, с помощью распределительного конвейера. Поточная сборка сокращает длительность производственного цикла, уменьшает межоперационные заделы деталей и уменьшает трудоемкость сборки на 35 – 50%.

Главным условием организации поточной сборки является обеспечение взаимозаменяемости собираемых узлов и отдельных деталей. Пригоночные работы должны выполняться за пределами потока, т. е. на операциях предварительной сборки. При этом детали и узлы должны подаваться на поточную сборку в окончательно скомплектованном и проконтролированном виде.

Ответственным и сложным вопросом организации поточной сборки является проблема операционного контроля качества сборки и устранения обнаруженных при контроле дефектов без нарушения установленного ритма сборки.

Конструкция собираемого на потоке изделия должна быть отработана на технологичность. Поточная сборка является рентабельной при достаточно большом объеме выпуска собираемых изделий.

Пригоночные операции при сборке изделий часто выносятся из общего потока на специальное рабочее место. В этом случае рольганг оборудуют отводными участками. Изделие передают на эти участки при помощи поворотных или подъемных секций. Общий вид рольганга и план участка сборки на рольганге представлен на рис. 4.4.

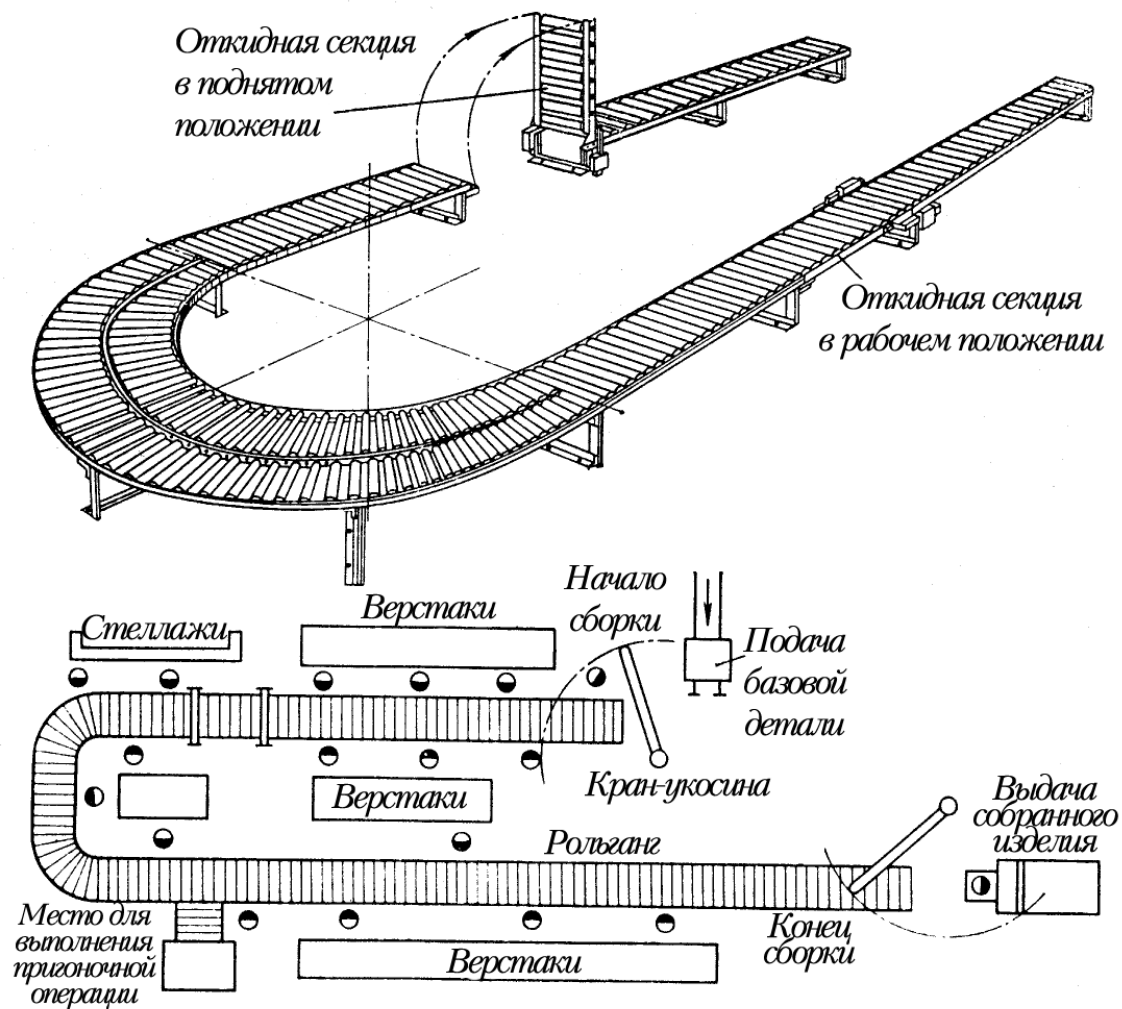


Рис. 4.4. Общий вид рольганга и план участка сборки на рольганге.

Горизонтальный рольганг устанавливается в сборочном цехе на высоте  $H=0,6 \div 0,8$  м от пола с уклоном  $2 - 4^\circ$  в сторону движения груза. Радиус закругления подковообразного рольганга не менее  $2,5 \pm 3,5 B$ , где  $B$  – ширина рольганга (200 – 1200 мм). В месте прохода рольганг имеет откидную секцию.

### 4.3. МЕТОДЫ СБОРКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

В процессе сборки обеспечивается необходимая точность сопряжений элементов и точность взаимного расположения различных поверхностей деталей. Эта точность, определяющая качество получаемых соединений, достигается различными методами сборки.

В настоящее время на машиностроительных заводах широкое применение получили следующие методы сборки: сборка по методу полной или неполной взаимозаменяемости, групповой метод или ме-

тод селективной сборки, метод компенсаторов и метод пригонки.

**Метод полной взаимозаменяемости.** Метод заключается в том, что все детали или узлы при их сборке в машину не требуют какой-либо пригонки по месту и замена любой детали не изменяет характер работы машины. Используют этот метод в малозвенных размерных цепях, например, в цепи: диаметр отверстия – зазор – диаметр вала или ширина шпоночного паза – зазор – ширина шпонки.

В ряде случаев метод полной взаимозаменяемости применяется для сборки многозвенных размерных цепей, например, при монтаже на вал ряда шестерен и промежуточных втулок или колец с обеспечением гарантированного зазора между торцом корпуса и одной из шестерен (рис. 4.5).

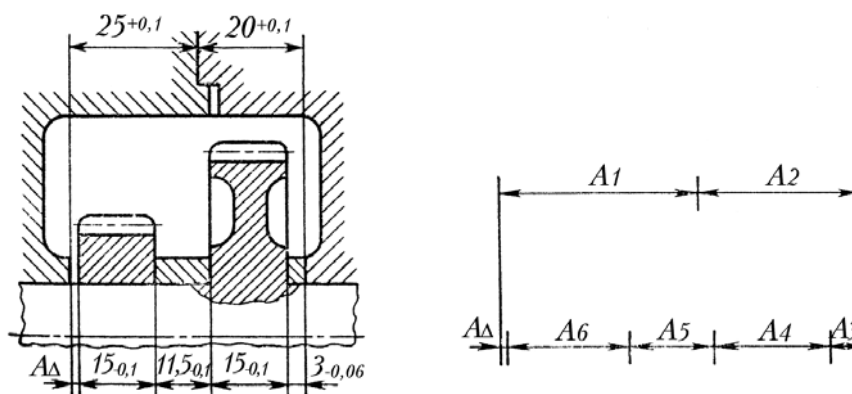


Рис. 4.5 Внешний вид редуктора и размерная цепь.

В этом случае допуск замыкающего звена  $T\Delta$  должен быть равен сумме допусков составляющих звеньев  $A_i$ :

$$T\Delta = \sum_{i=1}^{n-1} TA_i \cdot \quad (4.1)$$

Применение метода полной взаимозаменяемости в многозвенных размерных цепях связано с высокой стоимостью изготовления деталей, так как детали, поступающие на сборку, должны изготавливаться с высокой точностью. Для расчета поля допуска замыкающего звена применяют два метода расчета:

1. На максимум и минимум.
2. На основе теории вероятности.

Проведем анализ точности сборки по методу полной взаимозаменяемости на конкретном примере (рис. 4.5).

Уравнение размерной цепи имеет вид

$$A_1 + A_2 - A_3 - A_4 - A_5 - A_6 - A_\Delta = 0$$

откуда

$$A_{\Delta} = A_1 + A_2 - A_3 - A_4 - A_5 - A_6.$$

Предельные значения замыкающего звена определяются из выражений

$$A_{\Delta max} = A_{1 max} + A_{2 max} - A_{3 min} - A_{4 min} - A_{5 min} - A_{6 min},$$

$$A_{\Delta min} = A_{1 min} + A_{2 min} - A_{3 max} - A_{4 max} - A_{5 max} - A_{6 max}.$$

Разность предельных значений

$$A_{\Delta max} - A_{\Delta min} = (A_{1 max} - A_{1 min}) + (A_{2 max} - A_{2 min}) + (A_{3 max} - A_{3 min}) + (A_{4 max} - A_{4 min}) + (A_{5 max} - A_{5 min}) + (A_{6 max} - A_{6 min}),$$

откуда

$$T_{\Delta} = TA_1 + TA_2 + TA_3 + TA_4 + TA_5 + TA_6. \quad (4.2)$$

Из выражения (4.2) следует, что при сборке деталей по методу полной взаимозаменяемости допуск замыкающего звена равен сумме допусков всех составляющих звеньев.

$$T_{\Delta} = 0,1 + 0,1 + 0,1 + 0,1 + 0,1 + 0,06 = 0,56 \text{ мм.}$$

Однако вероятность появления предельных размеров деталей, входящих в качестве звеньев в размерную цепь, ничтожно мала и результаты расчетов оказываются сильно завышенными по сравнению с действительными значениями, которые получаются при сборке изделий. Дело в том, что процесс комплектования деталей для сборки по природе своей вероятностный и геометрические размеры элементов, входящие в размерную цепь, имеют случайный характер.

В отличие от расчета на максимум и минимум при вероятностном методе следует оперировать не с номинальными значениями размеров, а со средними значениями размеров и рассеянием их отклонений. Следовательно, имеется достаточно оснований считать, что в сборочной размерной цепи распределение размеров составляющих звеньев подчиняется закону нормального распределения.

Имея в виду, что при сборке рассеяние размера замыкающего звена  $A_{\Delta}$  подчиняется закону Гаусса, можно считать, что не менее чем у 99,73% сборочных единиц будут находиться в пределах, ограниченных допуском  $T_{\Delta}$ , равным  $\pm 3\sigma_{\Delta}$ . Следовательно, процент риска или равновероятностного выхода замыкающего звена за границы поля допуска  $T_{\Delta}$  составит не более 0,27%.

Поэтому вероятностным методом рассчитываются те размерные цепи, в которых экономически целесообразно (по условиям производства) назначать более широкие допуски на составляющие звенья. Но при этом в технических требованиях на сборку должны быть ука-

заны обоснованный процент риска и технологические методы, исключаящие выпуск изделия с отклонениями замыкающего звена от заданного значения. На основании теоремы о суммировании случайных величин координата середины поля допуска замыкающего звена  $\Delta_{0\Delta}$  находится путем алгебраического суммирования координат середин полей рассеивания  $\Delta_{0i}$

$$\Delta_{0\Delta} = \sum_{i=1}^{n-1} \xi_i \Delta_{0i}, \quad (4.3)$$

где  $\Delta_{0i} = A_{i-p} - A_i$ ;  $A_{i-p} = \frac{1}{2}(A_{i\max} + A_{i\min})$ .

Коэффициент  $\xi$  называется передаточным отношением для увеличивающих звеньев (+1), для уменьшающих (-1).

Величина допуска замыкающего звена в соответствии с теоремой о суммировании случайных величин определяется путем квадратичного суммирования. Когда законы рассеяния близки закону Гаусса

$$T'_\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \xi_i^2 (TA_i)^2}. \quad (4.4)$$

Штрихами помечаются расчетные, ожидаемые значения допусков (в отличии от заданных). В общем случае, когда законы рассеяния отличаются от закона Гаусса и поля рассеяния не совпадают с полями допусков составляющих звеньев, допуск замыкающего звена определяется по формуле

$$T'_\Delta = t \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 (TA_i)^2}, \quad (4.5)$$

где  $t$  – коэффициент, характеризующий процент выхода расчетных отклонений за пределы допуска.

Для рассеяния по закону Гаусса и равновероятностного выхода за обе границы поля допуска, он будет иметь следующие значения:

Процент риска	32	10	4,5	1,00	0,27	0,1	0,01
Коэффициент $t$	1,00	1,65	2,00	2,57	3,00	2,29	3,89.

Коэффициент относительного рассеяния  $\lambda_i$  характеризует закон рассеяния случайной величины. Он принимается равным:

$\lambda_i = 1/9$  – если закон рассеяния близок к закону Гаусса;

$\lambda_i = 1/6$  – если закон рассеяния близок к закону треугольника;

$\lambda_i = 1/3$  – если закон рассеяния неизвестен.

При симметричном распределении отклонений допуск замыкающего звена (рис. 4.5) будет

$$T'_\Delta = t \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 (TA_i)^2} =$$
$$= 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} [(0,1)^2 + (0,1)^2 + (0,1)^2 + (0,1)^2 + (0,1)^2 + (0,06)^2]} = 0,23.$$

Номинальное значение зазора (рис.4.5)

$$A_\Delta = A_1 + A_2 - (A_3 + A_4 + A_5 + A_6) = 0,5 \text{ мм.}$$

Таким образом, предельные значения зазора  $A_\Delta$  при расчете по первому методу расчета составляют

$$A_{\Delta max} = 25,1 + 20,1 - (14,9 + 11,4 + 14,9 + 2,94) = 1,06 \text{ мм,}$$

$$A_{\Delta min} = 25 + 20 - (15 + 11,5 + 15 + 3) = 0,5 \text{ мм.}$$

Предельные значения зазора  $A_\Delta$  при расчете по второму методу составляют

$$A_{0 max} = 0,5 + 0,115 = 0,615 \text{ мм,}$$

$$A_{0 min} = 0,5 - 0,115 = 0,385 \text{ мм.}$$

Следует заметить, что значения зазора, полученные по первому методу расчета, практически никогда не будут встречаться при сборке редуктора.

Метод полной взаимозаменяемости имеет ряд достоинств:

1. Метод имеет малую трудоемкость и требует привлечения рабочих низкой квалификации.
2. Позволяет осуществлять механизацию и автоматизацию сборочных операций, расширяет возможность кооперирования между заводами.
3. Облегчает проведение ремонтных работ, так как не требует пригонки по месту.

Полная взаимозаменяемость деталей собираемых машин является одним из наиболее благоприятных условий для осуществления автоматизации сборочных процессов.

**Метод неполной взаимозаменяемости.** Данный метод применяется в тех случаях, когда отсутствуют условия для осуществления полной взаимозаменяемости, т. е. когда допуск замыкающего звена меньше суммы допусков составляющих звеньев

$$T_{\Delta} < \sum_{i=1}^{n-1} A_i .$$

Метод неполной взаимозаменяемости заключается в том, что допуски на детали (составляющие звенья размерной цепи) расширяют до экономически приемлемых значений для данного производства. Вследствие этого некоторый процент изделий, собранных (как и в условиях полной взаимозаменяемости) без выбора, будет иметь значения допуска замыкающего звена, превышающие заданные. Тем не менее этот метод сборки может оказаться практически целесообразным, если процент полученных некондиционных изделий (процент риска) будет сравнительно невелик и экономический эффект позволит окупить затраты на переборку и исправление некондиционных изделий.

Сущность метода можно проиллюстрировать на следующем примере. В многозвенном механизме требуется обеспечить допуск замыкающего звена  $T_{\Delta} = \pm 0,03$  мм (рис. 4.6. кривая 1).

В данных производственных условиях невозможно обработать детали с допусками  $T A_i$ , обеспечивающие допуск замыкающего звена  $T_{\Delta} = \pm 0,03$  мм. Поэтому принято решение увеличить допуски на размеры деталей до экономически приемлемых предельных значений. При этих условиях допуск замыкающего звена  $T_{\Delta}'$  будет равен  $\pm 0,05$ .

На рис.4.6 заштрихованные зоны, выходящие за пределы допуска  $T_{\Delta}$ , характеризуют процент риска (процент некондиционных сборочных единиц).

В табл. 4.1 приведены значения коэффициента взаимозаменяемости  $\eta = T_{\Delta} / T_{\Delta}'$  и проценты брака (риска), где  $T_{\Delta}$  – заданный допуск замыкающего звена;  $T_{\Delta}'$  – принятый допуск замыкающего звена, полученный после увеличения допусков на составляющие размеры

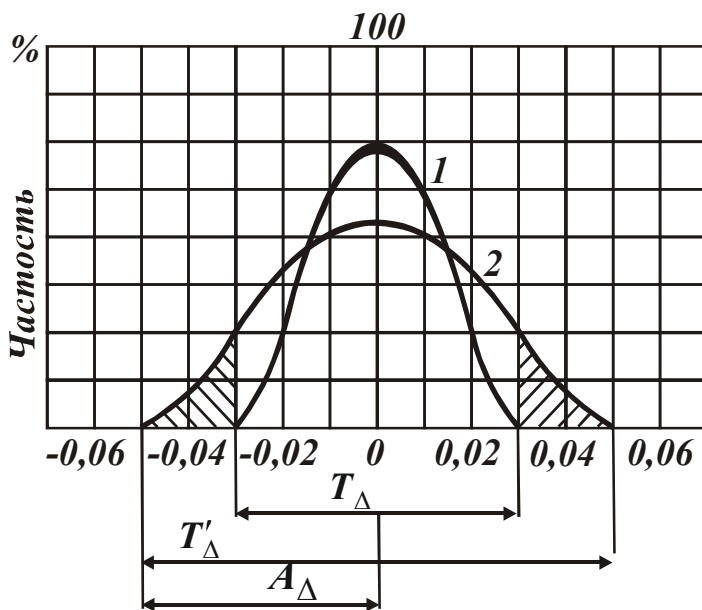


Рис. 4.6. Кривые нормального распределения размеров замыкающего звена.

деталей  $TA'_i$ .

Таблица 4.1

Коэффициент $\eta$	1	0,9	0,86	0,78	0,68	0,63	0,58	0,53	0,33
Процент риска	0,27	0,6	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	33,0

Для нашего примера, где  $\eta=0,6$ , процент риска составит около 7%. Таким образом, обусловленное экономическими и техническими соображениями увеличение допусков на детали привело к увеличению допуска (поля рассеяния) замыкающего звена на 40% против заданного техническими условиями. В результате у 7% изделий допуск замыкающего звена  $TA'$  выйдет за пределы допустимого допуска замыкающего звена  $\pm 0,03$  мм.

**Групповой метод.** Групповой метод может быть попарный и групповой. Он применяется при условии, когда сумма допусков составляющих звеньев больше допуска замыкающего звена

$$T\Delta > \sum_{i=1}^{n-1} A_i.$$

Получение бракованных изделий исключается здесь благодаря проведению сборки не из любых, случайно выбранных деталей, а специально подобранных.

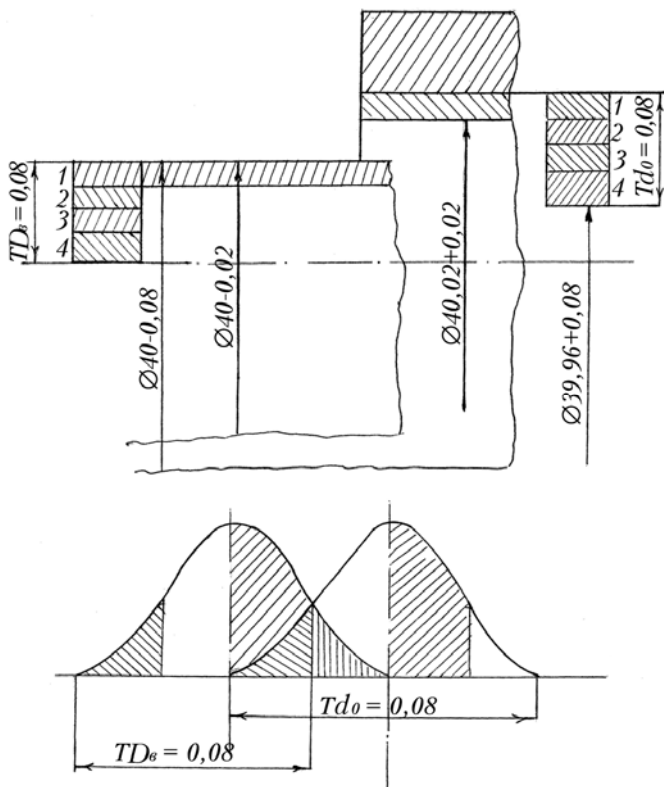


Рис. 4.7. Схема селективной сборки соединений вала и втулки (а) при одинаковых законах рассеивания размеров вала и втулки.

При попарном методе сборщик непосредственно на рабочем месте путем обмера подбирает сопрягаемые детали друг к другу, добиваясь получения заданного значения замыкающего звена. Более широкое применение, в особенности при значительных масштабах производства, находит метод групповой взаимозаменяемости, который заключается в том, что сопрягаемые детали предварительно рассортировывают на группы в более узких пре-



делах допуска, а затем сборочные единицы собираются из деталей соответствующих групп, чем и обеспечивается высокая точность сопряжения. Число групп  $m$  выбирают таким образом, чтобы при сопряжении деталей каждой группы был обеспечен требуемый допуск посадки  $T\Delta$  (зазора, натяга), т. е. чтобы выдерживалось соотношение

$$TD_{\epsilon_m} + Td_{o_m} = T\Delta,$$

где  $TD_{\epsilon_m}$  и  $Td_{o_m}$  – соответственно допуски на размеры сопрягаемых диаметров вала и отверстия в пределах группы (рис. 4.7).

Но так как

$$TD_{\epsilon_m} = \frac{TD_{\epsilon}}{m} \text{ и } Td_{o_m} = \frac{Td_o}{m},$$

где  $TD_{\epsilon}$  и  $Td_o$  – соответственно экономически приемлемые допуски на изготовление вала и отверстия, то соотношение запишется:

$$\frac{TD_{\epsilon} + Td_o}{m} = T\Delta \text{ откуда } m = \frac{TD_{\epsilon} + Td_o}{T\Delta}.$$

Если при расчетах получается дробное число, то его следует округлить до ближайшего целого числа. Эффективность данного метода снижается при различии законов рассеяния обеих сопрягаемых деталей. Из рис. 4.8 видно, что число охватываемых деталей в группах  $N_1, N_2, N_3, N_4$  не соответствуют числам охватываемых деталей  $N'_1, N'_2, N'_3, N'_4$ .

В результате большая часть деталей будет не использована.

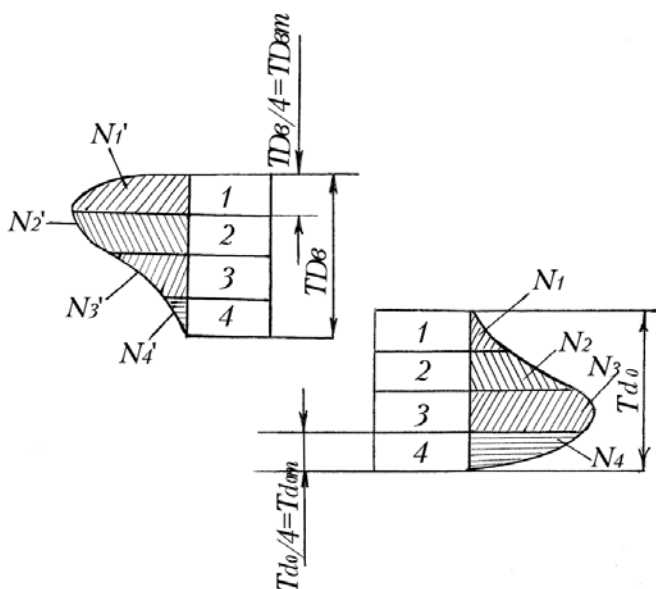


Рис. 4.8. Схема группового подбора деталей, имеющих различные законы рассеяния размеров.

Например, в группе 1 число охватываемых деталей  $N'_1$  пропорционально площади. Число сопряженных охватываемых деталей  $N_1$  первой группы также пропорционально площади. Из сопоставления площадей видно, что число охватываемых деталей  $N'_1$  примерно в 4 раза больше числа охватываемых деталей  $N_1$ . Следовательно, большая часть охватываемых деталей первой группы не будет востребована.

Несмотря на указанный недостаток, сборка по методу подбора остается одним из наиболее распространенных методов, особенно при сборке малозвенных узлов высокой точности. Детали сортируются автоматами или вручную с применением калибров или универсальных измерительных инструментов. Калибры для рассортировки деталей на две группы показаны на рис. 4.9. Характерным примером служит подбор деталей при сборке резьбовых соединений с гарантированным натягом.

Например, стальные шпильки с резьбой М8, предназначенные для ввертывания в алюминиевый корпус, имеют схему рассортировки, приведенную на рис.4.10.

Этот принцип с успехом используется в машиностроении для подбора деталей по массе и статическому моменту для обеспечения уравновешенности деталей, вращающихся с большими окружными скоростями, например, диск турбины газотурбинных двигателей.

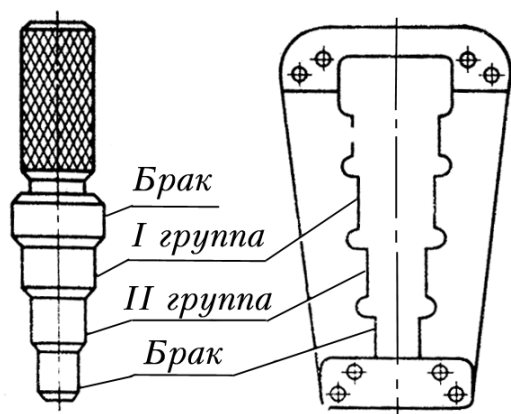


Рис. 4.9. Калибры для рассортировки деталей на две группы.

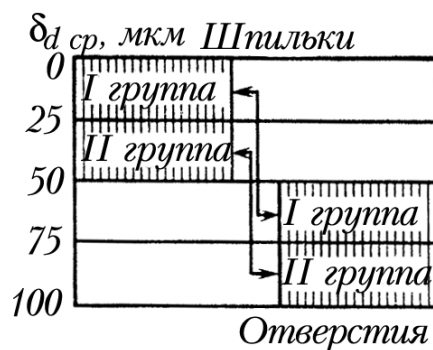


Рис. 4.10. Схема рассортировки шпилек и резьбовых гнезд по среднему диаметру резьбы.

Лопатки газовой турбины изготавливаются с допуском по массе 10 – 12 г. При сборке ротора турбины лопатки в комплекте подбираются с допуском 2 – 3 г. Более того, для лопаток, устанавливаемых диаметрально противоположно, допуск берется еще жестче – порядка 0,2 – 0,75.

**Метод компенсации или регулировки.** Метод регулировки заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена достигается путем изменения величины заранее выбранного компенсирующего звена.

На рис.4.11 показана схема достижения точности замыкающего звена с использованием подвижного компенсатора. Роль подвижного

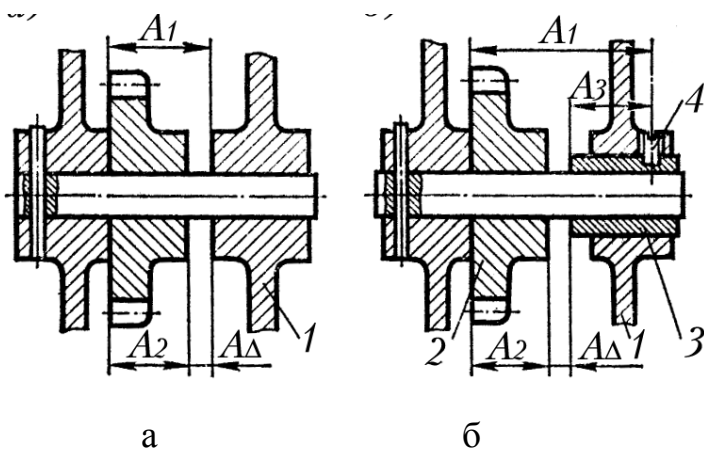


Рис. 4.11. Схема для достижения точности замыкающего звена методом регулировки с использованием подвижного компенсатора.

$$A_{\Delta} = A_1 - A_2 - A_3$$

На рис.4.11,а показано достижение требуемой точности между торцом корпуса и торцом ступицы зубчатого колеса. Требуемую точность замыкающего звена можно обеспечить за счет изменения размера одной из деталей (рис. 4.12). Величина компенсатора  $A_{5k}$  должна перекрыть разницу между суммой принятых допусков на составляющие звенья и допуском заданного замыкающего звена  $A_{\Delta}$

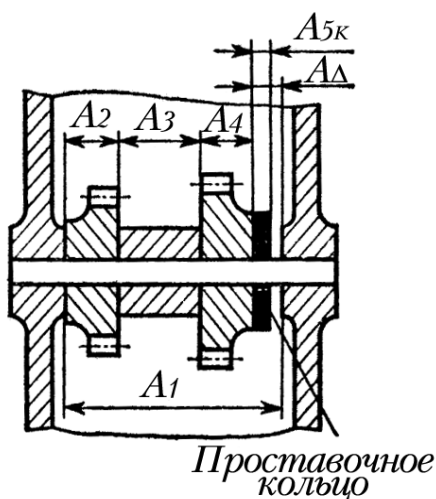


Рис. 4.12 Схема достижения точности методом регулировки с использованием неподвижного компенсатора.

компенсатора выполняет втулка 3, которую после сборки всех деталей перемещают в продольном направлении до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность зазора  $A_{\Delta}$ . Положение втулки фиксируется при помощи стопорного винта 4. Величину замыкающего звена можно определить из равенства (рис. 4.11, б)

$$A_k = \sum_{i=1}^{n-1} TA_i - TA_{\Delta},$$

где  $TA_i$  – величина расширенных допусков;  $n$  – общее количество звеньев размерной цепи, включая и замыкающее звено;  $TA_{\Delta}$  – допуск зазора.

Данное уравнение определяет границу наименьшего поля, в пределах которого должна быть обеспечена возможность изменения компенсационного размера.

Рассмотрим пример. Обозначим числовыми значениями составляющие размерной цепи с допусками

$$A_1 = 100^{+0,23}; \quad A_2 = 35_{-0,17}; \quad A_3 = 42_{-0,17}; \\ A_4 = 20_{-0,12}; \quad A_{\Delta} = 0,3_{-0,2}; \quad A_k = 3_{-0,06}.$$

Тогда наибольшая величина компенсации составит

$$\delta_k = (0,23 + 0,17 + 0,17 + 0,12 + 0,06) - 0,2 = 0,55 \text{ мм.}$$

При неподвижных компенсаторах расчеты необходимого количества размеров определяются по формуле

$$n = \frac{\delta_k}{TA_{\Delta}} + 1 = \frac{0,55}{0,2} + 1 \approx 4.$$

Тогда размеры компенсаторов, необходимые для обеспечения установленного зазора  $A_{\Delta}$  определяются следующими величинами

$$A_{5k_1} = 3,14_{-0,06}; \quad A_{5k_2} = 3,28_{-0,06};$$

$$A_{5k_3} = 3,42_{-0,06}; \quad A_{5k_4} = 3,56_{-0,06}.$$

**Метод сборки с индивидуальной пригонкой деталей по месту.** Сборка с пригонкой деталей по месту заключается в том, что установленный предел точности замыкающего звена в размерной цепи достигается изменением величины одного из заранее намеченных звеньев путем снятия дополнительного слоя материала. По существу, сборка с индивидуальной подгонкой детали по месту является методом неполной взаимозаменяемости с пригонкой деталей в тех случаях, когда размер замыкающего звена лежит за пределами допускаемых отклонений. Чтобы произвести пригонку за счет выбранного звена, необходимо: обеспечить на компенсирующем звене слой припуска на пригонку, достаточный для компенсации величины превышения допустимой погрешности замыкающего звена; выдержать при обработке деталей, входящих в размерную цепь, установленные экономически приемлемые величины допусков.

К недостаткам метода сборки с пригонкой по месту относятся: потребность в рабочих высокой квалификации; большая трудоемкость; трудности нормирования пригоночных работ; процесс подгонки требует дополнительной очистки и промывки собранных узлов и механизмов. Одной из разновидностей метода компенсации погрешностей является сборка соединений с применением пластмассовых компенсаторов.

Сущность процесса состоит в следующем: при сборке машины в зазоры, образовавшиеся или специально созданные между сопрягаемыми деталями, после их взаимной выверки нагнетается пластмасса в вязко-текучем состоянии. Последняя, выбирая зазоры, компенсирует все погрешности механической обработки и сборки и после затвердевания превращается в компенсатор всех погрешностей. Следует заме-

тить, что точность замыкающего звена здесь зависит от точности выверки.

Метод сборки с пластмассовыми компенсаторами является экономичным, так как позволяет сокращать объем трудоемких ручных пригоночных работ. Точность компенсации определяется зависимостью:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_y + \Delta_c + \Delta_{\alpha} + \Delta_{\sigma},$$

где  $\Delta_y$  – погрешность, связанная с усадкой материала компенсатора;  $\Delta_c$  – погрешность, связанная с изменением размера компенсатора под действием активных сред (влаги, смазочных материалов, солнечной радиации и т.д.);  $\Delta_{\alpha}$  – погрешности, вызванные отличием коэффициентов термического расширения материала пластмассы и сопрягаемых деталей;  $\Delta_{\sigma}$  – погрешность, связанная с деформацией прослойки под действием сил.

В целом, как показывает заводской опыт, суммарная погрешность  $\Delta_{\Sigma}$  не превышает 1,5 – 3% от величины номинального размера компенсатора. При изменении величины зазора под компенсатор 2 – 5 мм суммарная погрешность находится в пределах 0,03 – 0,12 мм.

С применением пластмассовых компенсаторов увеличивается поверхность соприкосновения, так как все макро- и микронеровности деталей соприкасаются с пластмассой. В результате увеличивается жесткость стыка. С наличием пластмассовой прослойки снижаются вибрации и уровень шума.

К пластмассам предъявляются следующие требования:

1. Они должны иметь высокую жидкотекучесть.
2. Минимальное время полимеризации.
3. Малую усадку и сохранять стабильность свойств в процессе эксплуатации машины.
4. Обладать достаточной прочностью и жесткостью.
5. Иметь низкую стоимость и допускать безопасное использование по токсичности в условиях сборочных цехов.

Этим требованиям отвечают пластмассы холодного отверждения на основе эпоксидных, полиэфирных и акриловых смол. Наиболее технологичной является пластмасса АСТ-Т (ТУ 79-1648-90).

Основные технические свойства пластмассы АСТ-Т:

- температура полимеризации 20 ÷ 25°C;
- время полимеризации 20 ÷ 30 мин;

- коэффициент термического расширения на 1 град  $(5 \div 8) \cdot 10^5$  см;
- усадка в %  $.0,3 \div 0,6\%$ ;
- предел текучести при сжатии  $750 - 800$  кг/см<sup>2</sup>.

Технологический процесс:

1. Подготовка сопрягаемых поверхностей (промывка, обезжиривание).
2. Установка и выверка деталей и узлов.
3. По контуру и вокруг отверстий прокладывают резиновые шнуры, препятствующие вытеканию пластмассы.
4. Заполнение зазора пластмассой.
5. Обеспечение условий полимеризации пластмассы.
6. Закрепление деталей и узлов после отверждения пластмассы.
7. Контроль качества.

#### **4.4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ**

Технологический процесс сборки представляет собой часть производственного процесса, непосредственно связанную с последовательным соединением, взаимной ориентацией и креплением деталей и узлов машины, удовлетворяющей предъявляемым требованиям.

В состав технологического процесса сборки включаются подготовительные, пригоночные, сборочные, регулировочные и контрольные операции, например, проверка точности взаимного расположения собираемых узлов и деталей и внесение, если это необходимо, соответствующих исправлений путем регулировки, пригонки или подбора; фиксирование положения деталей и узлов для обеспечения целевого назначения при работе машины.

Технологический процесс сборки включает также операции, связанные с проверкой правильности действия отдельных механизмов и узлов и в целом всей машины (по точности, плавности движения, бесшумности, надежности функционирования смазочной системы и т. д.). Сюда же относятся все необходимые операции по очистке, промывке, окраске и отделке изделия или составляющих его сборочных единиц и деталей. В технологическом процессе сборки единицей производственного планирования является сборочная операция.

Сборочная операция представляет собой законченную часть технологического процесса сборки, выполняемую непрерывно одним

или группой (бригадой) рабочих на одном рабочем месте.

Сборочная операция включает ряд технологических переходов.

Переход сборочного процесса – это законченная часть операции сборки, выполняемая над определенным участком сборочного соединения (узла) при использовании одних и тех же инструментов и приспособлений. Одной из важных задач разработки технологического процесса сборки является выбор степени его дифференциации.

Концентрированный процесс сборки применяется для опытного, единичного и частично мелкосерийного производства. В этом случае узловые операции и общая сборка выполняются на одном рабочем месте одним рабочим или бригадой сборщиков.

К недостаткам концентрированной сборки следует отнести: длительность календарного цикла операции; трудности механизации и тем более автоматизации нерасчлененных операций и нецелесообразность привлечения узкоспециализированных высококвалифицированных сборщиков-универсалов.

Дифференцированный технологический процесс сборки применяется для серийного и массового производств. Дифференциация позволяет расчленить технологический процесс сборки на отдельные самостоятельные операции, продолжительность которых равна или кратна установленному такту сборки. Такая форма организации процесса сборки создает условия для механизации и автоматизации ручных процессов и организации поточной и автоматической сборки.

Расчленение процесса сборки и рациональное распределение операций по рабочим местам сокращает трудоемкость сборки на 15–20%. Степень дифференциации зависит не только от типа производства, но и от конструкции самого изделия, его габаритных размеров, числа деталей.

Однако излишняя степень дифференциации процесса сборки вызывает увеличение времени на установку и снятие собираемых элементов, а также повышает утомляемость рабочих при выполнении мелких однообразных операций. Следовательно, при проектировании технологического процесса сборки должна быть найдена оптимальная степень дифференциации.

Технологический процесс сборки состоит из следующих этапов:

1. В зависимости от программы устанавливается такт и ритм выпуска изделий.
2. Производится технологический анализ сборочных и рабочих чертежей деталей с позиции отработки технологической конструкции.

3. Производится размерный анализ конструкций собираемых изделий и устанавливаются рациональные методы обеспечения требуемой точности сборки.
4. Устанавливается оптимальная степень дифференциации проектируемого процесса сборки.
5. Разрабатываются схемы общей и узловой сборок изделия.
6. Определяются наиболее производительные способы соединения деталей и узлов, проверка положения и фиксация составляющих сборочных единиц изделия. Разрабатывается содержание технологических операций сборки и назначаются методы контроля и испытания изделий.
7. Разрабатывается технологическая оснастка (приспособления, режущий и монтажный инструменты и оборудование).
8. Производится техническое нормирование сборочных работ и рассчитываются экономические показатели процесса сборки.
9. Оформляется технологическая документация процесса сборки.

Для разработки технологического процесса сборки необходимо иметь следующие исходные данные:

- 1) программу выпуска изделий;
- 2) сборочные чертежи изделий и узлов, каталоги и спецификации входящих деталей;
- 3) технические условия сборки и испытания изделия;
- 4) рабочие чертежи деталей;
- 5) объем кооперации;
- 6) справочники по технологической оснастке.

После анализа технических условий на изготовление и сборку машины приступают к разбивке изделия на сборочные единицы. Сборочная единица не должна состоять из чрезмерно большого числа деталей и сопряжений, но в то же время излишнее дробление машины на сборочные единицы также не рационально.

Трудоемкость сборочных единиц должна быть приблизительно одинакова. Последовательность сборки представляется в виде технологической схемы сборки, которая является условным изображением порядка комплектования изделий и узлов при сборке. Схема сборки дает наглядное представление о технологическом процессе. На этой схеме каждый элемент представляется в виде прямоугольника, в котором указывается наименование сборочного элемента, его шифр и количество.

На схеме процесс сборки представляется в виде прямой линии, соединяющей прямоугольники, изображающие в начале процесса ба-



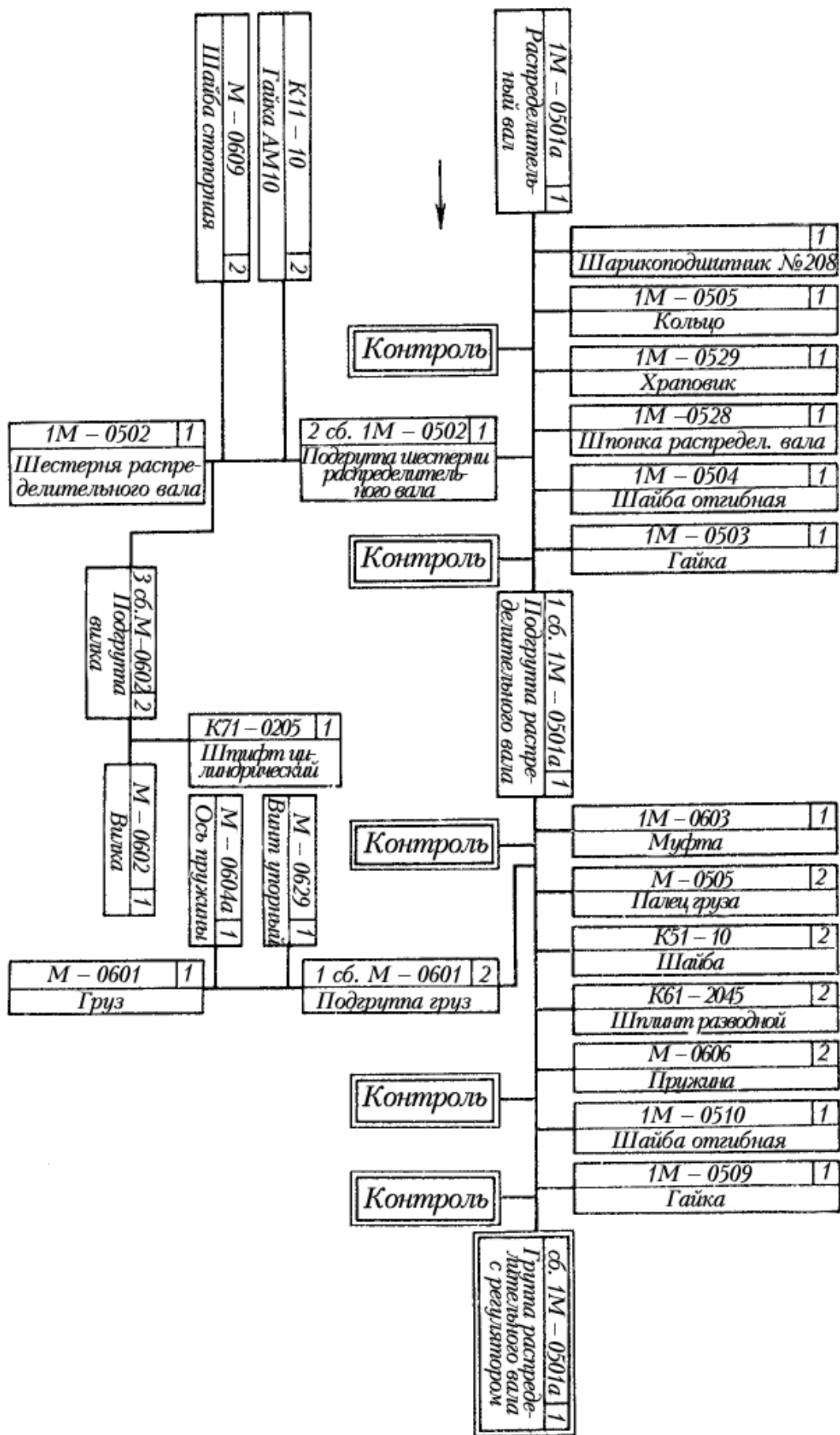


Рис. 4.13. Технологическая схема сборки регулятора.

зовую деталь, в конце процесса сборки – готовое изделие (или сборочную единицу). Выше горизонтальной линии показываются в порядке последовательности сборки прямоугольники, условно изображающие детали, а ниже – прямоугольники, условно изображающие сборочные единицы. Для каждой сборочной единицы первого и более высоких порядков могут быть построены аналогичные схемы.

На рис.4.13 показана технологическая схема сборки, а на рис.4.14 – технологические схемы сборки изделия (а) и сборочных единиц первого (б, в) и второго (г) порядков.

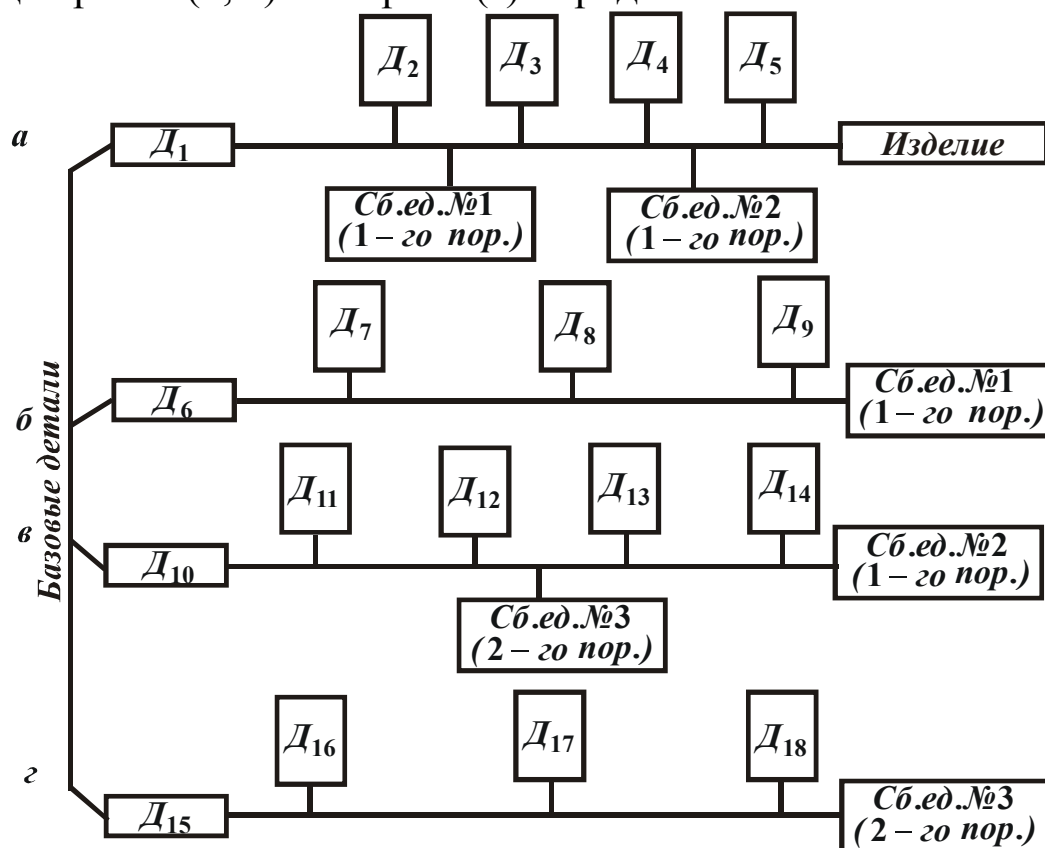


Рис. 4.14. Технологические схемы сборки изделия (а) и сборочных единиц первого (б, в) и второго (г) порядков.

После разработки схем сборки устанавливается состав необходимых сборочных, регулировочных, пригоночных, подготовительных и контрольных работ и определяется содержание технологических операций и переходов.

В условиях единичного производства ограничиваются разработкой маршрутных технологических карт и схемами сборки. Сборка выполняется высококвалифицированными рабочими, которые сами выбирают приемы сборочных работ, пользуясь чертежом изделия.

В тяжелом машиностроении в единичном производстве основным технологическим документом служит общая схема сборки и

схема узловых сборок, в которых указывается: трудоемкость работы, тип оснастки, цех и т. д.

Для выполнения отдельных операций (например, запрессовка, испытания и т. д.) составляются типовые инструкции.

В серийном производстве составляются маршрутно-операционные и операционные технологические карты и при необходимости выпускаются технологические инструкции, комплектовочные карты, ведомость оснастки и другие документы.

В крупносерийном и массовом производствах процесс сборки расчленяется на узловую. Доля пригоночных работ сокращается за счет широкого применения регулировки размеров с помощью различных компенсаторов и применения селективной сборки и методов неполной взаимозаменяемости.

При формировании технологической операции в ее состав включаются однородные работы, что способствует специализации сборщиков и повышению производительности труда. Механизация слесарно-сборочных работ является важнейшей проблемой проектирования технологических процессов сборки.

В различных отраслях машиностроения доля сборочных работ составляет от 20 до 45% от общей трудоемкости изготовления изделия. При этом доля ручных работ колеблется от 50 до 85%. Например, в тяжелом машиностроении доля ручных работ составляет 80 – 85%, в станкостроении – 75 – 78%, в автомобилестроении – 45 – 50%, в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении – 50 – 60% и в электромашиностроении – 70 – 75%.

В связи с этим одним из основных направлений совершенствования технологии сборки является разработка новых способов механизации и автоматизации сборочных операций путем применения роботов, разнообразных сборочных приспособлений и стандов, а также механизированных сборочных инструментов.

## 4.5. СБОРКА ТИПОВЫХ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ

### 4.5.1. СБОРКА НЕПОДВИЖНЫХ РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

**Резьбовые соединения.** Резьбовые соединения являются наиболее распространенным видом соединений частей изделий. В современном машиностроении насчитывается до нескольких тысяч резьбо-

вых соединений, среди которых имеются ответственные болты и шпильки, определяющие надежность работы машины в целом.

Независимо от вида посадок, неподвижные резьбовые соединения должны отвечать следующим основным требованиям:

1. Стыки деталей, скрепляемых при помощи резьбового соединения, должны сохранять плотность под действием рабочих нагрузок.
2. Элементы резьбового соединения при наличии переменных нагрузок должны обладать достаточной выносливостью.
3. Стыки деталей должны быть герметичны.
4. Элементы резьбового соединения не должны произвольно ослабевать.

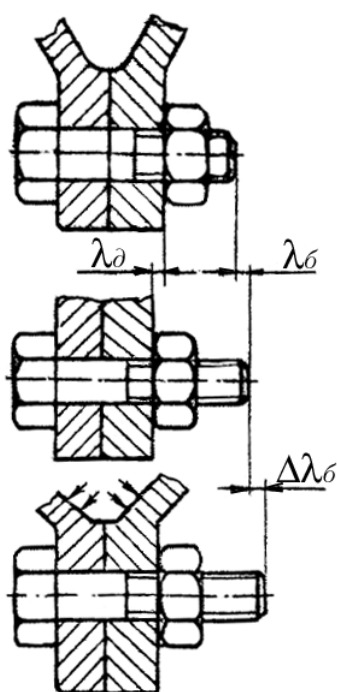


Рис. 4.15. Резьбовое соединение в стадиях последовательного нагружения.

Выполнение этих требований достигается путем проведения конструктивных и технологических мероприятий. Важнейшим технологическим мероприятием является оптимальная затяжка резьбового соединения при сборке.

**Выбор оптимального усилия затяжки.** Рассмотрим резьбовое соединение в стадиях последовательного нагружения (рис. 4.15). При затягивании гайки создается сила затяжки  $F_3$ . Под действием этой силы болт деформируется на величину  $\lambda_b$ , а сопрягаемые детали сжимаются на величину  $\lambda_d$ . Напряжение при затяжке не превышает предела пропорциональности, поэтому зависимость усилие – деформация представляется в виде прямых линий (рис. 4.16). Углы наклона прямых линий характеризуют жесткость деталей резьбового соединения

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_3}{\lambda_b} = K_b; \operatorname{tg} \beta = \frac{F_3}{\lambda_d} = K_d,$$

где  $K_b$  и  $K_d$  – жесткость болта и детали соответственно.

Если на систему, находящуюся в упруго-напряженном состоянии, будет действовать дополнительная нагрузка  $F$ , (например, сила давления газов в резервуаре), раскрывающая стык, тогда болт получит дополнительное удлинение на величину  $\Delta \lambda_b$ , а стык разожмется

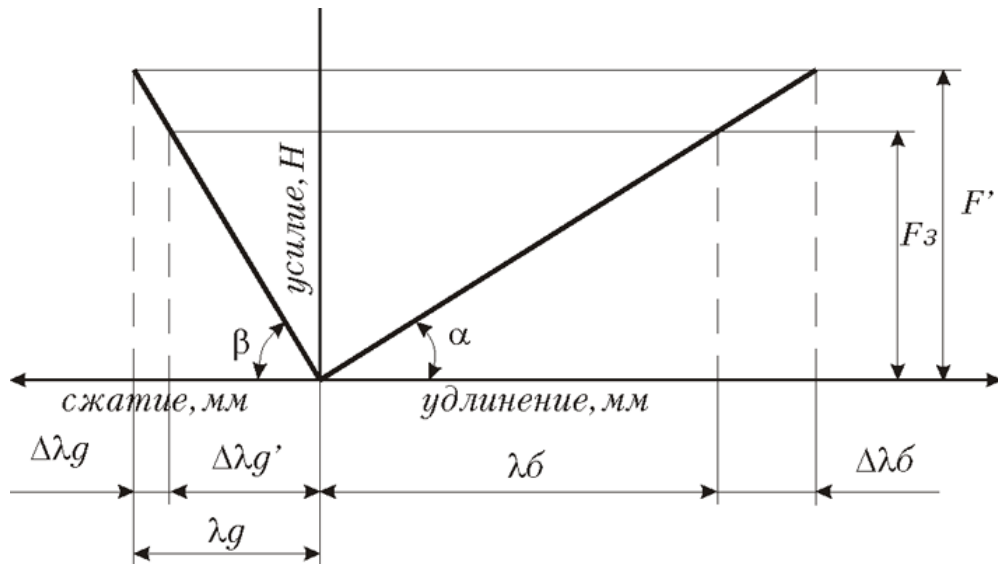


Рис. 4.16. Диаграмма деформаций болта и корпуса детали под нагрузкой.

на ту же величину и деформация детали будет равна  $\lambda'_d$ . Если на систему, находящуюся в упруго-напряженном состоянии, будет действовать дополнительная нагрузка  $F$ , (например, сила давления газов в резервуаре), раскрывающая стык, тогда болт получит дополнительное удлинение на величину  $\Delta\lambda_b$ , а стык разожмется на ту же величину и деформация детали будет равна  $\lambda'_d$ . В этом случае сила, нагружающая болт, увеличится и будет равна  $F'$ , а сила, сжимающая детали уменьшится и будет равна  $F_0$ . Соотношение сил и деформаций показано на рис. 4.17. Из рисунка следует, что деформация

$$\lambda_d = \lambda'_d + \Delta\lambda_b \quad \text{или}$$

$$\frac{F_3}{K_d} = \frac{F_0}{K_d} + \frac{F' - F_0}{K_b}. \quad (4.6)$$

Подставляя в выражение (4.6) вместо  $F'$  сумму  $(F + F_0)$  получим

$$F_3 = F_0 + F \cdot \frac{K_d}{K_d + K_b}. \quad (4.7)$$

Остаточное усилие принимают обычно равным  $(0,3 - 0,8)F$  для постоянных статических нагрузок и  $(1,2 - 2,4)F$  для переменных нагрузок. Разрушение болтов происходит в основном от усталостных явлений под действием знакопеременных нагрузок. Чем больше амплитуда ко-

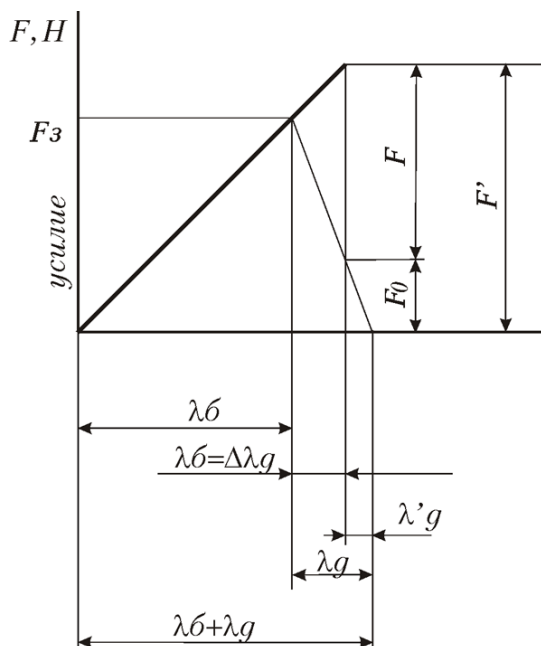


Рис. 4.17. Совмещенная диаграмма деформаций болта и со-прягаемых деталей.

лебания напряжений, тем больше переменная составляющая  $F_H$ , действующая на болт (рис.4.18). Поэтому надо стремиться уменьшить амплитуду составляющей силы  $F_H = F + F_0 - F_3$ .

Подставляя значение  $F_3$  из формулы (4.7), получим

$$F_H = F \cdot \frac{K_b}{K_b + K_d}. \quad (4.8)$$

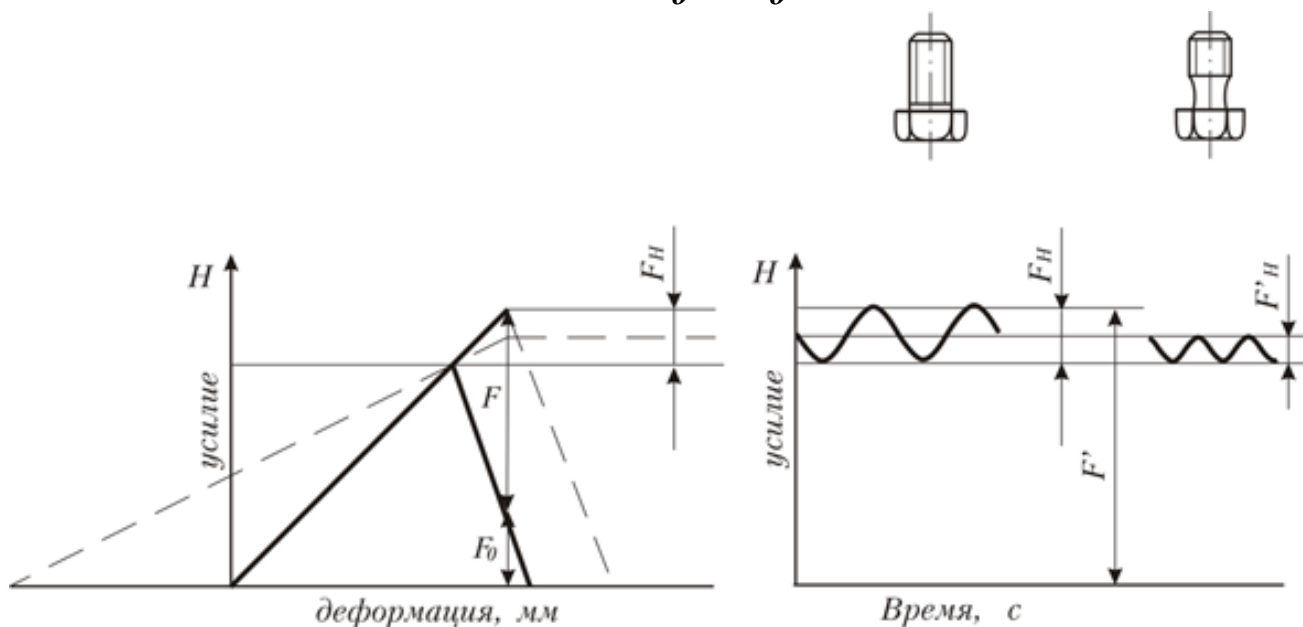


Рис. 4.18. Влияние податливости болта на величину амплитуды пульсирующей нагрузки.

Из формулы (4.8) видно, что с уменьшением жесткости болта  $K_b$  и увеличением жесткости детали  $K_d$  составляющая  $F_H$  будет уменьшаться. При конструировании резьбовых соединений, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, стремятся обеспечить условие «жесткие детали – податливые болты». Податливость болта достигается за счет занижения диаметра у головки. Заниженный диаметр шейки на болтах является своеобразным демпфером, поглощающим амплитуду силы  $F_H$ .

Для повышения выносливости резьбовых соединений желательно напряжение при затяжке довести до уровня, близкого к  $0,9\sigma_{0,2}$ . Однако несовершенство методов контроля затяжки не позволяет выдерживать наивыгоднейшие напряжения в узких пределах допуска. Поэтому во избежание пластических деформаций напряжения затяжки болтов принимают равным  $\sigma_3 = (0,5 \div 0,7) \cdot \sigma_{0,2}$ . Для обеспечения оптимального усилия затяжки необходимо производить контроль.

В машиностроении применяют следующие виды контроля усилия затяжки: по крутящему моменту; по углу поворота гайки; по

удлинению болта (шпильки); по деформации тарированной шайбы.

Контроль усилия затяжки по крутящему моменту осуществляется с помощью специальных динамометрических ключей. Метод затяжки по углу поворота гайки производится в следующей последовательности: гайка заворачивается от руки до упора, а затем ключом поворачивается на угол

$$\alpha = \frac{F_3}{S} \cdot (K_\delta + K_\delta) \cdot 360 = \frac{F_3}{S} \cdot \left( \frac{l_\delta}{F'_\delta E_\delta} + \frac{l_\delta}{F'_\delta E_\delta} \right) \cdot 360, \quad (4.9)$$

где  $S$  – шаг резьбы, мм;  $l_\delta, l_\delta$  – длина болта и толщина фланца детали, мм;  $F'_\delta, F'_\delta$  – площади сечения болта и сопряженных деталей, мм<sup>2</sup>;  $E_\delta, E_\delta$  – модули упругости болта и детали, МПа.

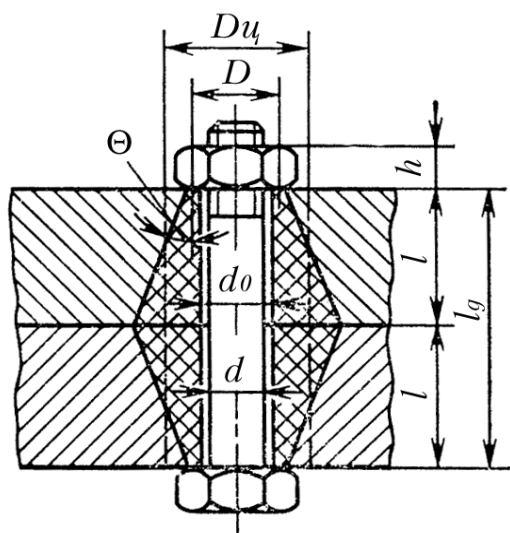


Рис. 4.19. Схема определения расчетной площади стыка.

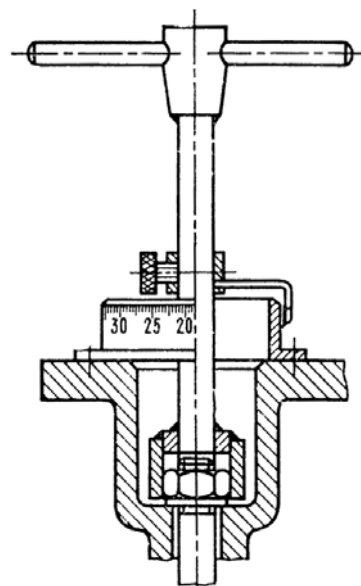


Рис. 4.20. Ключ для затяжки по углу поворота гайки.

Расчетная длина болта принимается равной толщине детали (рис.4.19), а для коротких болтов  $l_\delta < 5d$  с учетом длины свинчивания  $l_\delta = l_\delta + (0,3...0,5) \cdot h$ , где  $h$  – высота гайки. Площадь детали рассчитывается с учетом конуса давления. Площадь заменяется полым цилиндром с диаметром  $D_u = D + l \cdot \text{tg} \theta$

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot (D_u^2 - d_o^2). \quad (4.10)$$

Ключ для затяжки гайки по углу поворота представлен на рис.4.20.

Метод контроля усилия затяжки по «удлинению болта» основан на измерении удлинения болта под действием усилия затяжки. Кон-

троль удлинения осуществляется микрометром (рис.4.21). Связь между усилием затяжки и удлинением болта, имеющего одинаковое сечение, выражается зависимостью

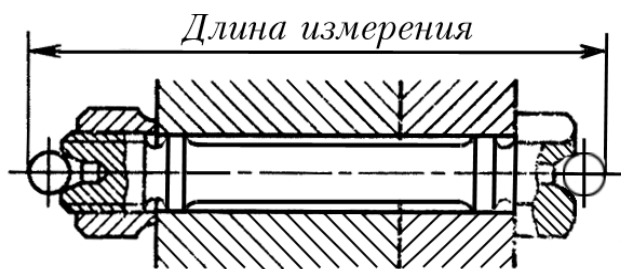


Рис. 4.21. Схема контроля удлинения болта.

$$\lambda_{\text{б}} = F_3 \cdot \frac{l_{\text{б}}}{E_{\text{б}} \cdot F'_{\text{б}}} \quad (4.11)$$

Для болтов переменного сечения  $F_{\text{б}}$  учитывается податливостью болта на отдельных  $i$  участках  $\frac{l_{\text{б}i}}{E_{\text{б}} \cdot F'_{\text{б}i}}$ , и для  $n$  участков общее удлинение определяется из выражения

$$\lambda_{\text{б}} = F_3 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{l_{\text{б}i}}{E_{\text{б}} \cdot F'_{\text{б}i}} \quad (4.12)$$

Метод является наиболее точным, его рекомендуется использовать при затяжке наиболее ответственных резьбовых соединений. Однако из-за трудностей контроля удлинения в собранной машине или из-за отсутствия надежных измерительных средств, область применения метода ограничена.

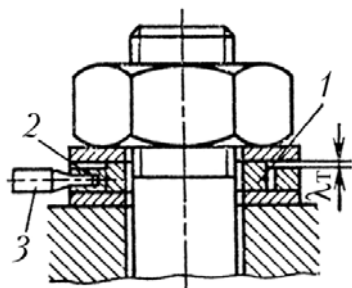


Рис. 4.22. Контроль затяжки с помощью тарированной шайбы.

Контроль усилия затяжки можно производить по величине деформации тарированной шайбы.

Тарированная шайба 1 (рис.4.22) помещается между двумя обычными шайбами. На тарированную шайбу с зазором одевается мерная шайба 2, толщина которой меньше тарированной на величину  $\lambda_m$

$$\lambda_m = F_3 \cdot \frac{h_{\text{ш}}}{E_{\text{ш}} \cdot F'_{\text{ш}}} \quad (4.13)$$

где  $h_{\text{ш}}$  – высота шайбы;  $F_{\text{ш}} = \pi \cdot \frac{(D_{\text{ш}} - d_o)^2}{4}$ .

Деформация тарированной шайбы на величину  $\lambda_m$  регистрируется в ходе затяжки штифтом 3, соединенным со вспомогательной шайбой. Процесс затяжки заканчивается после прекращения возможности поворота вспомогательной шайбы.

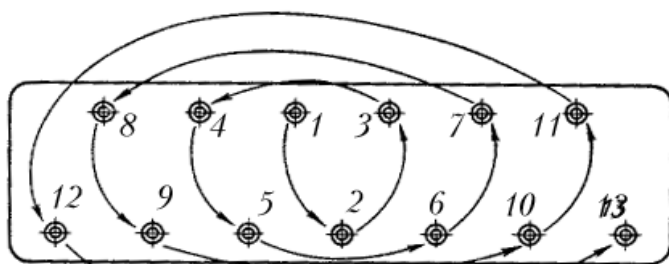


Под воздействием знакопеременных нагрузок в процессе эксплуатации машин затяжка резьбовых соединений может ослабевать. На ослабление напряженного состояния в резьбовом соединении влияют: остаточные пластические деформации болта и скрепленных деталей в результате кратковременных перегрузок, самопроизвольное отвинчивание гаек, релаксация напряжений в болтах в условиях повышенных температур и др. Во избежание ослабления затяжки необходимо стабилизировать напряжение затяжки.

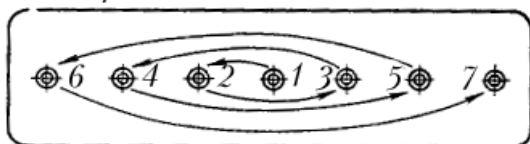
**Стабилизация затяжки.** Для стабилизации напряжения затяжки применяют следующие мероприятия:

- производится предварительное обжатие деталей под нагрузкой, соответствующей заданному значению  $F_z$  и тщательная пригонка стыковых поверхностей;

- при затяжке групповых резьбовых соединений, наряду с соблюдением требований к одиночным соединениям, рассмотренным выше, соблюдается определенная последовательность затяжки (рис. 4.23);



*I вариант*



*II вариант*

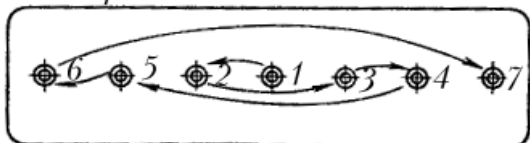


Рис. 4.23. Схема затяжки групповых резьбовых соединений.

- стопорение резьбовых соединений за счет создания дополнительных сил трения путем осевого или радиального давления (стопорение контргайкой, винтом, самостопорящими гайками);

- взаимная фиксация гайки относительно болта, одной из скрепляемых деталей или фиксация нескольких гаек (винтов) (стопорение шплин-

том, пружинными шайбами, путем накернивания и др.).

**Стопорение контргайкой.** Обычную контргайку из листового материала (рис. 4.24, а) навинчивают на болт и затягивают контргайку до плотного соприкосновения ее с торцом основной гайки.

**Стопорение винтом.** С помощью винта 1 (рис. 4.24, б) достигается местное увеличение шага резьбы и повышается трение в резьбе. Такой же эффект достигается благодаря применению контргаек с завальцованными пластмассовыми упругими вставками (рис. 4.24, в). С

помощью винта 4 (рис. 4.24, г) создаются дополнительные силы трения в резьбе. Во избежание порчи основной резьбы под винт помещают свинцовый или алюминиевый шарик 3.

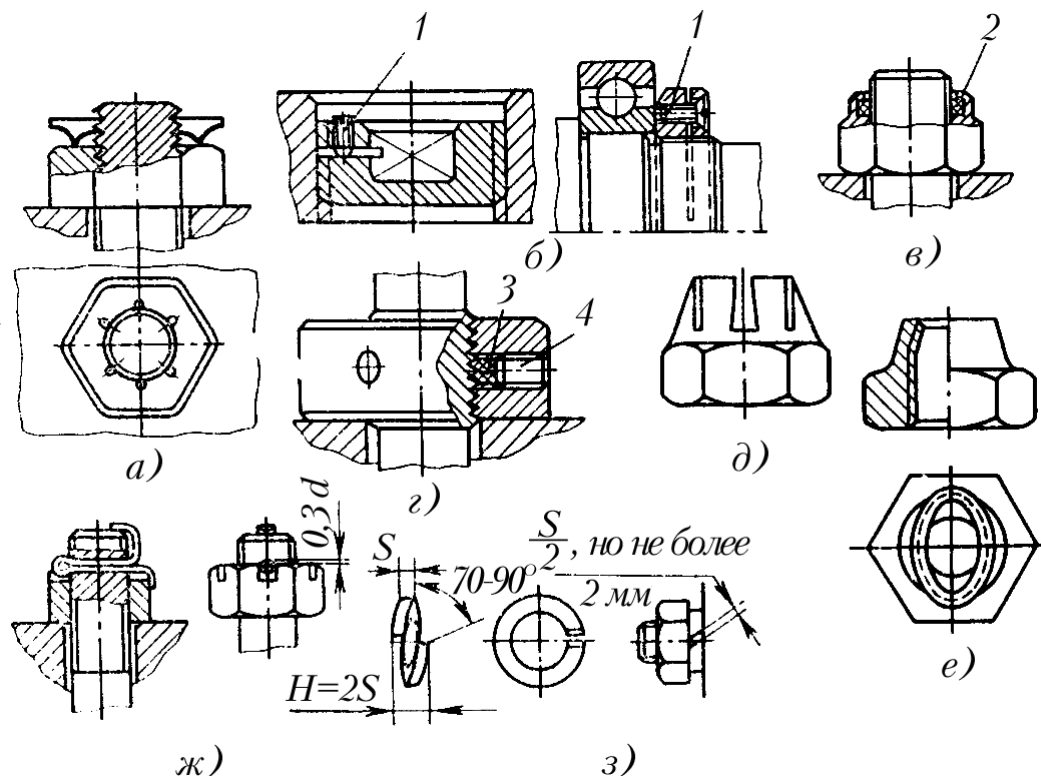


Рис. 4.24. Стопорение резьбовых соединений: (1 и 4 – стопорные винты, 2 – пластмассовая упругая вставка, 3 –алюминиевый шарик).

**Стопорение специальными гайками.** Стопорение специальными гайками основано на создании дополнительных сил трения от радиального натяга в резьбе гаек за счет упругости верхней ее части благодаря разрезам (рис. 4.24, д) или обжатия лепестков на эллипс (рис. 4.24, е). Стопорение гаек относительно болтов осуществляется также с помощью шплинтов (рис.4.24, ж), пружинных шайб (рис.4.24, з) и деформируемых шайб (рис.4.25).

Шайба изготавливается из мягкой листовой стали толщиной 1 – 1,25 мм. После затяжки гайки выступы шайбы отгибаются: один усик на грань гайки, второй – на кромку корпуса. Перечисленные способы стопорения обеспечивают фиксацию только гаек. Однако в ряде случаев требуется производить стопорение болтов.

На рис. 4.26 показаны способы стопорения болтов. Отверстия в головках просверливаются заранее, до постановки болтов. Проволока в отверстия вводится крест-накрест таким образом, чтобы натяжение от затягивания проволоки создавало момент, действующий в направлении затяжки.

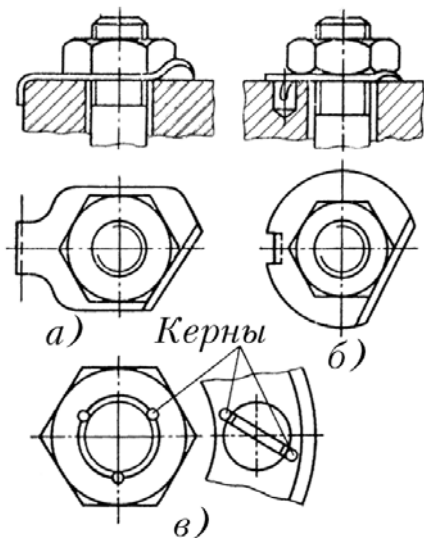


Рис. 4.25. Стопорение гайки шайбой с наружными выступами (а) и (б) и с помощью кернера.

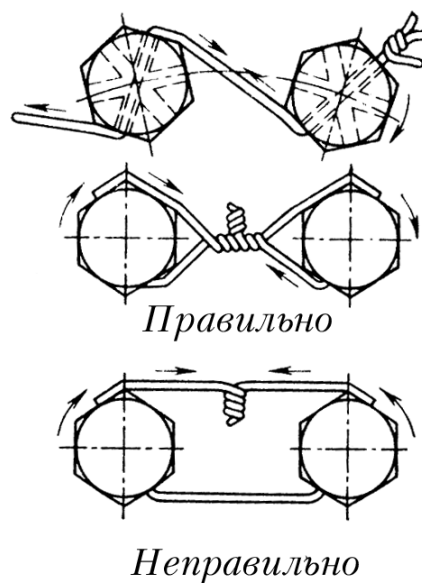


Рис. 4.26. Стопорение болтов проволокой.

Для предохранения мелких винтовых соединений от самоотвинчивания применяют клеящие лаки на пластмассовой основе.

**Продольно-прессовые соединения.** Соединения такого рода (рис. 4.27) сравнительно широко распространены в конструкциях машин.

Процесс сборки состоит в том, что к одной из двух деталей прикладывается осевая сила (рис. 4.28). Сила запрессовки изменяется от нуля до некоторого максимального значения.

Охватываемая деталь (вал) имеет наружный диаметр больше, чем диаметр отверстия, поэтому процесс соединения происходит в условиях деформирования металла. Фактический натяг определяется по номинальным размерам охватываемой и охватывающей деталей без учета шероховатости поверхности.

При запрессовке, микронеровности, сминаясь под действием давлений, уменьшают фактическую величину натяга. Поэтому для определения натяга с учетом микрогеометрии необходимо знать  $Rz_в$  и  $Rz_о$  высоты микронеровностей сопрягаемых поверхностей обеих деталей. Если номинальный натяг в сопряжении, как разность диаметров охватываемой и охватывающей деталей будет  $\Delta d$ , то расчетный натяг определится

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

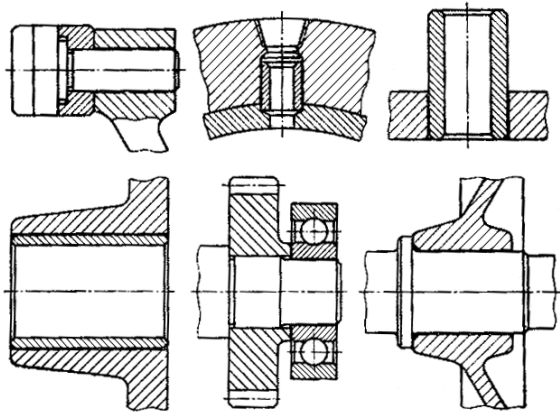


Рис. 4.27. Продольно-прессовые соединения деталей машин.

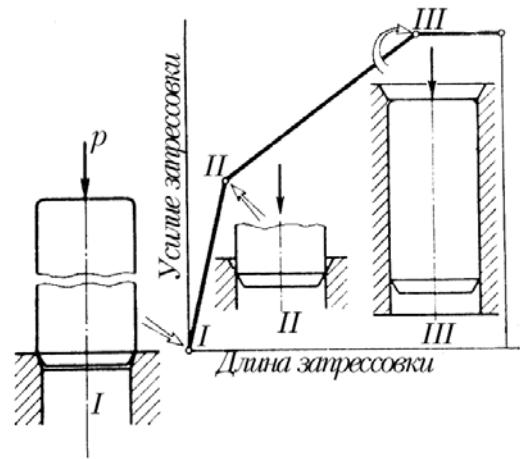


Рис. 4.28. Теоретическая диаграмма запрессовки: I – ориентация детали, I–II – наживление, II – III – запрессовка.

При разработке технологии сборки соединений с гарантированным натягом технолог подбирает оборудование, обеспечивающее требуемое усилие запрессовки. Наибольшая сила запрессовки  $P$  определяется по формуле

$$P = f_{зан} \pi \cdot \rho \cdot d \cdot L,$$

где  $f_{зан}$  – коэффициент трения при запрессовке;  $\rho$  – удельное давление на поверхность контакта, кГс/мм<sup>2</sup>;  $d$  – диаметр охватываемой детали, мм;  $L$  – длина запрессовки, мм.

Удельное давление  $\rho$  на поверхности контакта определяется по формуле

$$\rho = \frac{1}{d} \cdot \frac{\delta \cdot 10^{-3}}{\left( \frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right)},$$

где  $\delta$  – расчетный натяг, мкм;  $E_1$  и  $E_2$  – модули упругости материала, охватываемой и охватывающей деталей;

$$C_1 = \frac{d^2 + d_o^2}{d^2 - d_o^2} - \mu_1, \quad C_2 = \frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2.$$

Значения  $C_1$  и  $C_2$  находятся с учетом величины коэффициентов Пуассона  $\mu_1$  и  $\mu_2$  охватывающей 2 и охватываемой 1 деталей (рис. 4.29).

При запрессовке применяют различные смазки (машинное, сурепное или авиационное масла, ртутная смазка и др.), предохраняющие по-

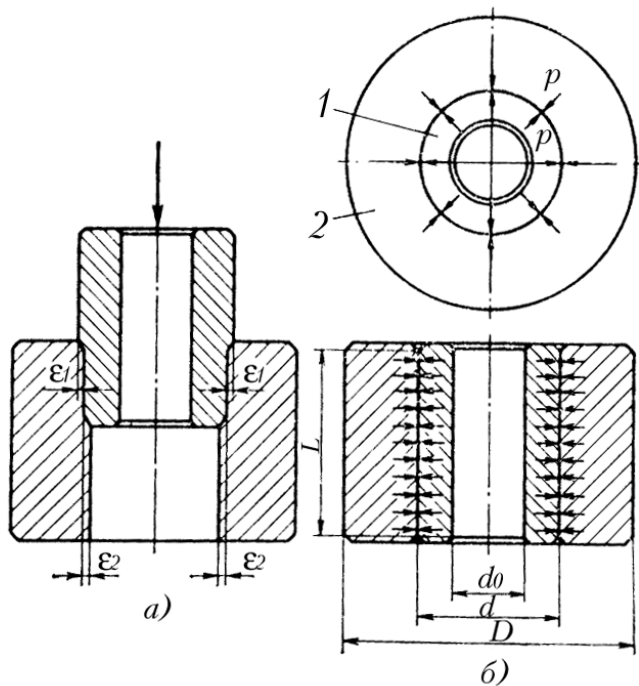


Рис. 4.29. Схема запрессовки (а) и схема прессового соединения – натяг охватываемой детали 1; – натяг охватывающей детали 2.

около 0,1 – 0,05.

При сборке тяжело нагруженных деталей, требующих высокой прочности соединения, применяют сборку с нагревом охватывающей детали или сборку с охлаждением охватываемой детали.

Прочность тепловых посадок при передаче крутящего момента в 2 – 3 раза больше прочности обычных прессовых соединений. Объясняется это тем, что при тепловых насадках микронеровности сопрягаемых поверхностей не сминаются, как при холодной запрессовке, а как бы сцепляются друг с другом.

Температура, до которой следует нагревать охватывающую деталь, определяется по формуле

$$t_H > \frac{d - d_1}{K_\alpha \cdot d_1},$$

где  $t_H$  – температура нагрева;  $\Delta = d - d_1$  – величина натяга ( $d$  – диаметр вала,  $d_1$  – диаметр отверстия);  $K_\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала охватывающей детали.

Результаты исследования М.П. Новикова позволили установить зависимость натяга  $\Delta$  от диаметра отверстия  $d_1$ :

верхность от задиоров, уменьшающие коэффициент трения и снижающие потребную силу запрессовки. Например, при запрессовке стального вала диаметром 60 мм во втулку с натягом 0,02 мм: коэффициент трения без смазки равен 0,39, сила запрессовки 10000 кгс, соответственно при смазке авиационным маслом – 0,331 и  $\rho = 8800$  кгс, при ртутной смазке – 0,184 и  $\rho = 4900$  кгс. Применяются

дисульфидомолибденовые смазки  $MoS_2$  в виде порошка, карандашей или пасты. Коэффициент трения с применением этой смазки составляет

$$\Delta = 0,015 + 0,001 \cdot d_1.$$

Принимая изменение натяга  $\Delta$  по указанной закономерности, минимальная температура нагрева охватывающей детали будет равна

$$t_H = \frac{0,015}{K_\alpha d_1} + \frac{0,001}{K_\alpha} = \frac{1}{K_\alpha} \cdot \left( \frac{0,015}{d_1} + 0,001 \right).$$

Для стальных деталей эта зависимость может быть упрощена

$$t_H = \left( \frac{1350}{d_1} + 90 \right).$$

Подсчитанная по формулам температура нагрева должна быть увеличена на 15 – 30% , чтобы компенсировать частичное охлаждение детали в процессе ее установки перед запрессовкой. Однако максимальная температура нагрева не должна превышать 350 – 370°C.

Температура охлаждения  $t_o$  охватываемой детали определяется по формуле

$$t_o = \frac{\Delta + \delta}{K_\alpha \cdot d},$$

где  $\Delta$  – натяг;  $\delta$  – минимальный зазор.

#### 4.5.2. СБОРКА УЗЛОВ С ПОДШИПНИКАМИ КАЧЕНИЯ

Подшипники качения монтируют по двум неподвижным насадкам – внутреннего кольца с валом и наружного с корпусом.

Напрессовка подшипника на вал или установка его с натягом в отверстие корпуса вызывает деформацию колец.

Если оба кольца подшипника смонтировать с натягом, то вследствие расширения внутреннего и сжатия наружного колец, шарики или ролики могут быть защемлены. Для подшипников среднего размера зазор между шариками и кольцами колеблется в пределах 5– 25 мкм. Кольца подшипника работают в разных условиях. Наружное кольцо находится под действием постоянной радиальной нагрузки, поэтому небольшой участок беговой дорожки кольца интенсивно изнашивается. Для уменьшения этого износа желательно, чтобы при сборке наружного кольца с корпусом была выбрана насадка, позволяющая этому кольцу незначительно поворачиваться.

Подшипники монтируют в корпус обычно после установки их на вал. Кольца подшипников имеют малую жесткость, поэтому при

сборке очень важно не допустить перекоса. При установке подшипников на вал и корпус торцы колец используются как базы. Для надежного сопряжения подшипника с валом и корпусом посадочные места должны быть обработаны с шероховатостью поверхности  $R_a = 1,25 \div 0,32$  мкм. Овальность и конусность допускаются не более 0,5 допуска на диаметр для подшипников нормальной точности и 0,25 – для подшипников повышенной точности классов А и С.

Сборку подшипников качения осуществляют следующим образом. Подшипник тщательно промывают в 6%-ном растворе масла с бензином или в антикоррозионных водных растворах. После промывки наружное кольцо должно равномерно, без малейших заеданий, вращаться. Затем промытый подшипник нагревают до температуры 60 – 100°С в масляной ванне в течение 15 – 20 мин и после этого напрессовывают на вал до упора в торец. Сторона подшипника с заводским клеймом должна быть снаружи. После запрессовки подшипника на вал следует убедиться в том, что шарики его не защемлены. Наружное кольцо должно вращаться равномерно, без заедания. Проверяется также плотность соприкосновения торца кольца с буртиком (рис. 4.30).

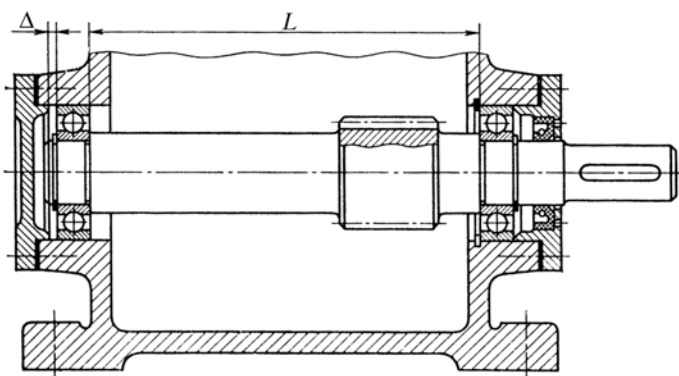


Рис. 4.30. Посадка подшипника на вал до упора в торец.

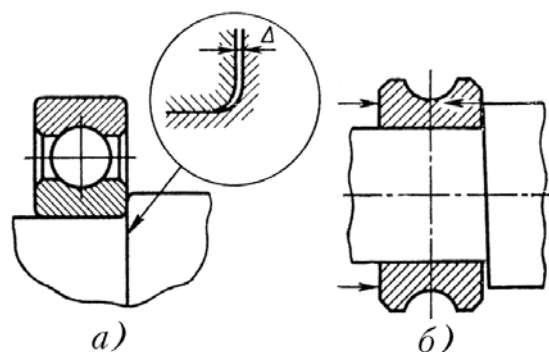


Рис. 4.31. Зазор, обеспечивающий возможность осевых перемещений деталей при нагреве в процессе работы.

При установке в узле нескольких подшипников на валу, один из них фиксируется от осевых смещений на валу и в корпусе. Остальные подшипники фиксируются только на валу или только в корпусе. Это необходимо для компенсации возможных неточностей сборки и изготовления, а также во избежание заклинивания шариков при температурных деформациях деталей. Для компенсации температурных деформаций между крышкой и наружным кольцом подшипника предусматривается зазор  $\Delta$  (рис. 4.31). При  $L=1000$  мм зазор  $\Delta \geq 1$  мм.

В спаренных подшипниках качения создается предварительный натяг при давлении на наружную опору

$$A_{0min} = 0,04zd_{ш}^2,$$

где  $z$  – число шариков в подшипнике;  $d_{ш}$  – диаметр шариков, мм.

Требуемый натяг при давлении  $A_{0min}$  осуществляется с помощью распорных втулок 1 и 2 разных длин (рис. 4.32). Определение разности длин втулок, обеспечивающих требуемый натяг в спаренных подшипниках, производят с помощью специальных приспособлений (рис. 4.33).

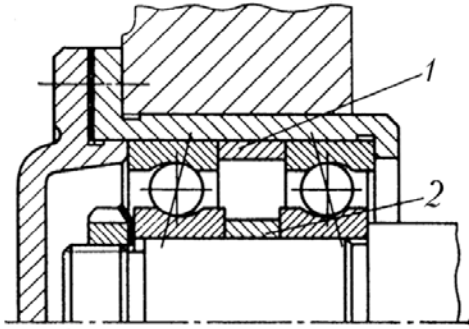


Рис. 4.32. Схема узла с двумя спаренными подшипниками

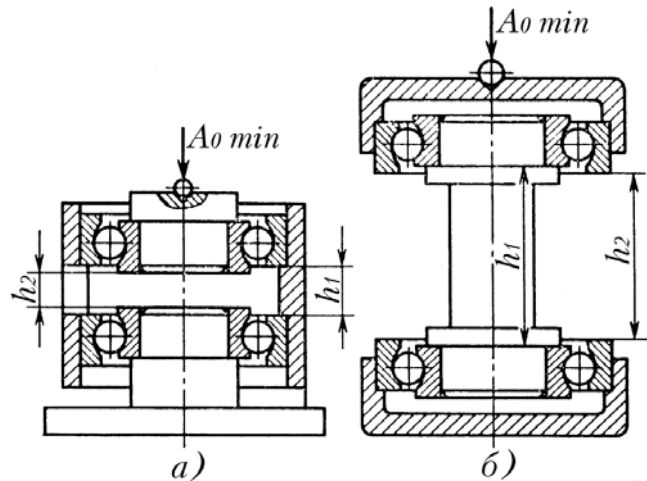


Рис. 4.33. Схема определения длин распорных втулок

Пара сопряженных подшипников устанавливается на оправку и производится нагружение на наружные или внутренние кольца, в зависимости от конструкции узла, силой  $A_{0min}$ . Производится измерение расстояний между торцами колец и определяется разность длин втулок.



## **ЧАСТЬ 2**

# **КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

---

### **ГЛАВА 1**

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

### **1.1. ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

На современном этапе происходит интенсивное развитие машиностроительного производства. Оно характеризуется следующими основными особенностями:

- 1) непрерывным расширением номенклатуры производимых машин, увеличением типоразмеров производимых машин, расширением диапазона размеров изделий;
- 2) унификацией и стандартизацией машин и их элементов;
- 3) увеличением программы выпуска изделий на отдельных предприятиях вследствие специализации и кооперирования производства, а также унификации и стандартизации изделий;
- 4) повышением частоты смен производимых изделий более совершенными (в условиях технического прогресса продолжительность срока выпуска изделий в результате их быстрого морального старения сокращается в 1,5-2 раза);
- 5) как следствие (4), сокращение сроков и средств на подготовку производства новых объектов;
- 6) повышением точности деталей и качества их поверхности;
- 7) расширением использования новых материалов;
- 8) широким применением термического, химико-термического и других методов упрочняющей технологии, значительно повышающих долговечность и безотказность работы машин;
- 9) снижением трудоемкости, себестоимости, энергоемкости и материалоемкости изготовления изделий (для типовых сопоставимых

конструкций);

- 10) перераспределение баланса удельной трудоемкости изготовления изделий по технологическим процессам; повышением точности и трудоемкости изготовления заготовок, снижением трудоемкости механической обработки, узловой и общей сборки; увеличением трудоемкости отделочной обработки в результате повышения точности изготовления деталей;
- 11) повышением уровня автоматизации на всех технологических процессах машиностроительного производства, начиная от процессов получения заготовок до общей сборки изделий;
- 12) последовательным переходом к гибким быстроперенастраиваемым технологическим системам и участкам, управляемым от ЭВМ;
- 13) расширением области научных исследований не только для решения текущих, но и перспективных технологических задач, использованием результатов этих исследований как основы для проектирования высокопроизводительных процессов механической обработки и сборки, дальнейшего развития типовых и групповых технологических процессов;
- 14) расширением области и развития систем автоматизации проектирования технологических процессов (САПР ТП) как основы для снижения трудоемкости проектных работ, повышения их качества путем оптимизации проектных решений и высвобождения технологов из рутинной работы.

Цель проектирования технологических процессов (ТП) – дать подробное описание процессов изготовления изделия с необходимыми технико-экономическими расчетами и обоснованиями принятого варианта. Эта основная задача технолога дополняется последующей задачей внедрения спроектированного ТП на предприятии. От качества технологических разработок в значительной степени зависят технико-экономические показатели предприятия.

По объекту и условиям разработки ТП подразделяются на единичные, типовые и групповые. Единичные ТП разрабатывают на изделия одного наименования, типоразмера и исполнения независимо от типа производства, типовые – на группу изделий с общими конструктивными признаками, групповые – на конструктивно и технологически сходные изделия.

Задача проектирования ТП характерна многовариантностью возможных решений. Даже для сравнительно простых изделий может

быть разработано несколько различных вариантов ТП, полностью обеспечивающих требования рабочего чертежа и технических условий (ТУ).

Методом последующего сопоставления эффективности и рентабельности этих вариантов окончательно отбирают один или небольшое число равноценных вариантов.

Из нескольких возможных вариантов ТП изготовления одного и того же изделия, равноценных с позиции технического принципа проектирования, т.е. обеспечения требований рабочего чертежа и ТУ, сначала отбирают варианты, производительность которых не ниже заданной. Затем из этих вариантов выбирают вариант наиболее рентабельный, обеспечивающий минимальную себестоимость изготовления изделия.

Проектирование ТП отличается сложностью и трудоемкостью. Его выполняют за несколько последовательных стадий. Вначале делают предварительные наброски при решении частных и общих вопросов проектирования; на последующих стадиях эти наброски уточняют и конкретизируют на основе детальных технологических расчетов. В результате последовательного уточнения получают законченные разработки ТП. К правильному и приемлемому решению обычно удается приблизиться после сравнения нескольких технологических вариантов. Сопоставление вариантов целесообразно производить и на промежуточных стадиях проектирования.

Степень углубленности и структура технологических разработок зависит от типа производства. В поточно-массовом производстве ТП разрабатывают подробно для всех деталей изделия. Разрабатывается маршрутная технология и в дополнение к ней операционная. В единичном производстве ограничиваются сокращенной разработкой ТП, учитывая, что подробная разработка в данных условиях экономически не оправдывается. Для сложных и дорогостоящих изделий, особенно в тяжелом машиностроении, и при обработке на станках с ЧПУ, ТП разрабатываются подробно. В серийном производстве при широкой номенклатуре выпускаемых изделий проектируют групповые ТП. На оригинальные изделия разрабатывают единичные ТП.

Знание основных закономерностей построения ТП и использование математических методов позволяют находить оптимальные решения с помощью автоматизированного проектирования.

Основные трудности оптимизации решения сложных технологических задач – наличие большого числа влияющих факторов и от-

сутствие закономерностей протекания ТП.

Совершенствование современного машиностроительного производства тесно связано с развитием технологии как науки. Достижения технологии эффективно используются в различных отраслях машиностроения от процессов получения заготовок до сборки и испытания готовых машин. Сама технология все в большей степени становится производительной силой. Передовая технология, создаваемая на базе научных исследований, – основное условие научно-технической революции и ключ к технологическому прогрессу.

Тематика научных исследований включает следующее: разработку научных основ технологии машиностроения; разработку теории и методик построения высокопроизводительных операций и процессов обработки и сборки; повышение точности обработки и сборки; разработку и внедрение методов малоотходной, малоэнергоемкой и упрочняющей технологии; повышение уровня технологичности конструкций машин; автоматизация и механизация механо-сборочного производства; расширение области применения станков с ЧПУ; совершенствование технологической оснастки; применение методов автоматизации проектирования ТП обработки и сборки; разработку САПР ТП.

Для решения перечисленных основных задач технологического направления необходимо проведение научных исследований в области конструирования, расчета, производства технологического оборудования и режущего инструмента.

## **1.2. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

### **1.2.1. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Технологическое проектирование объединяет две функции ТПП: разработку ТП и проектирование СТО.

При разработке ТП к наиболее часто решаемым задачам относятся:

- 1) проектирование единичных ТП изготовления деталей и их сборки на основе процессов-аналогов;
- 2) разработку единичных ТП изготовления деталей и их сборки – индивидуальное проектирование;

3) создание управляющих программ для оборудования с ЧПУ.

Каждая из указанных задач является самостоятельной, вместе с тем разработку управляющих программ можно рассматривать как этап проектирования операционной технологии.

ТП разрабатывают на основе предварительно составленного межцехового технологического маршрута (расцеховки). Расцеховка определяет поэтапное движение деталей, сборочных единиц и самого изделия в процессе их изготовления. Процессами-аналогами принято называть типовые и групповые ТП.

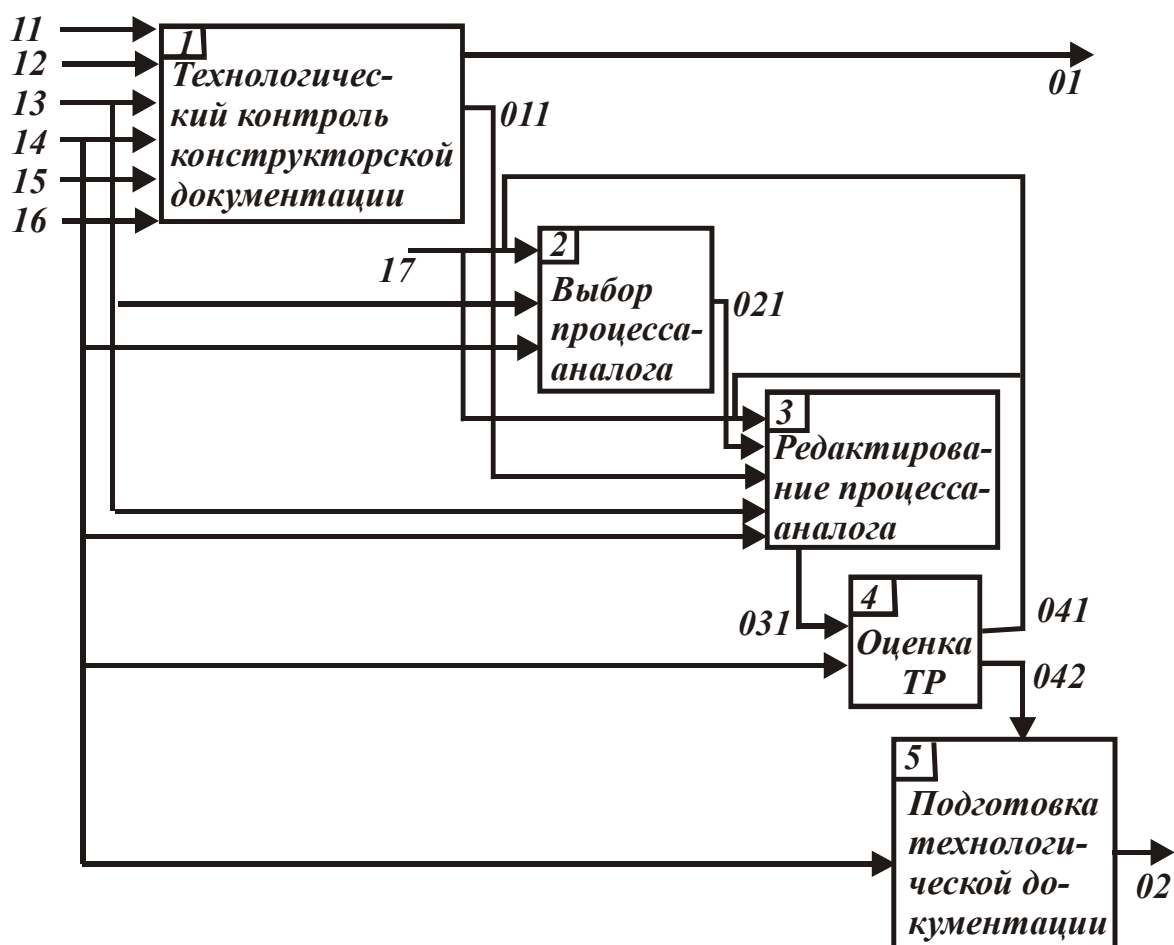


Рис. 1.1. Структурная диаграмма разработки единичного ТП, изготовления деталей на основе процесса-аналога:

I1, I2 – конструкторская документация на изделие и директивную заготовку соответственно; I3 – программа выпуска изделия; I4 – информационное обеспечение; I5 – чертежи изделий, отработанных на технологичность; I6 – чертеж заготовки (разработанный); I7 – изменения ТП изготовления деталей; O1 – изменения конструкций деталей; O11 – конструкторская документация, прошедшая технологический контроль; O21 – параметры процесса-аналога; O31 – параметры маршрутной и операционной технологий; O41 – изменения ТП; O42 – параметры маршрутной и операционной технологий; O2 – ТП изготовления детали.

Единый ТП можно проектировать на основе процесс-аналогов. В этом случае его структура и содержание технологических операций в значительной мере определяются структурой процесса-аналога.

Разработку единых ТП изготовления деталей на основе процесс-аналогов выполняют в соответствии со структурной диаграммой, приведенной на рис. 1.1.

Важнейшим этапом решения является выбор процесса-аналога, при котором последовательно решаются две частные задачи: классификация детали и выбор процесса-аналога по ее классификационному коду. Для решения первой задачи информационное обеспечение должно включать развитый конструкторско-технологический классификатор. Цель классификации – определение принадлежности детали к некоторой группе (классу) деталей, обладающих общностью конструктивно-технологических признаков.

В промышленности находит применение технологический классификатор деталей (ТКД) машиностроения и приборостроения, являющийся продолжением и дополнением классификатора КСКЛ (классы 71–76), разработанного в качестве информационной части ГОСТ 2.201 - 80.

Классификатор ЕСКД включает 100 классов, из которых 51 составляют пока резерв для размещения новых видов изделий. Классы 71 – 76 охватывают детали всех отраслей промышленности основного и вспомогательного производств:

класс 71 – тела вращения типа колес, дисков, шкивов, блоков, стержней, втулок, стаканов, колонок, валов, осей, штоков, шпинделей и др.;

класс 72 – тела вращения с элементами зубчатого зацепления: трубы, шланги, проволочки, разрезные секторы, сегменты, изогнутые из листов, полос и лент; аэрогидродинамические корпусные, опорные и емкостные вкладыши подшипников;

класс: 73 – корпусные, опорные, емкостные детали, не являющиеся телами вращения;

класс 74 – плоскостные, рычажные, тяговые, аэрогидродинамические, изогнутые из листов, полос и лент профильные детали, не являющиеся телами вращения, трубы;

класс 75 – кулачковые, карданные, с элементами зацепления, санитарно-технические, разветвленные, пружинные, оптические, крепежные детали, ручки;

класс 76 – детали технологической оснастки, инструмента.

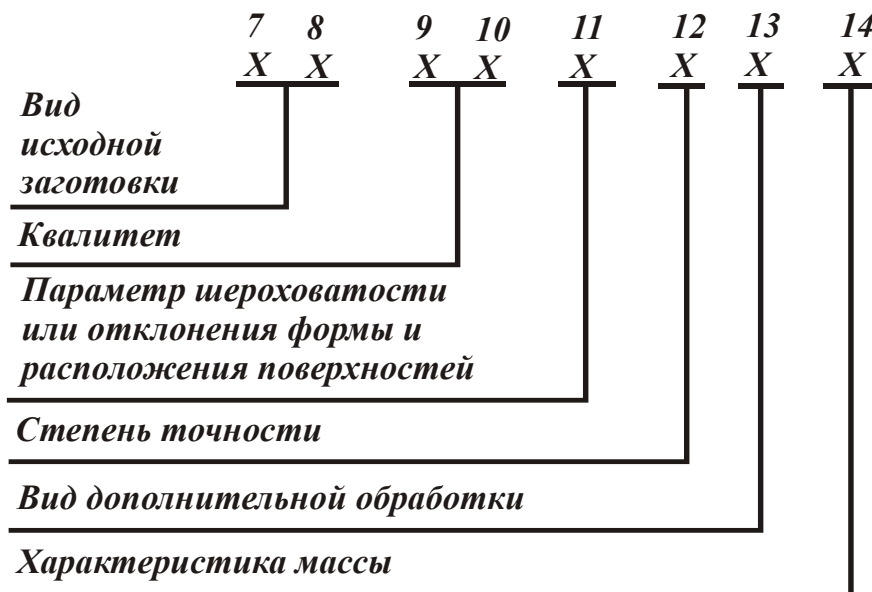
ТКЛ можно использовать для решения следующих задач:

- 1) анализа номенклатуры деталей по их конструктивно- технологическим признакам;
- 2) группирования деталей по конструктивно-технологическому подобию для разработки процессов-аналогов;
- 3) унификации и стандартизации деталей и ТП их изготовления;
- 4) тематического поиска и использования ранее разработанных процессов-аналогов.

ТКД представляет собой систематизированный в виде классификационных таблиц свод наименований общих признаков деталей, составляющих их частных признаков и кодовых обозначений. Структура полного конструкторско-технологического кода детали состоит из обозначения детали по ГОСТ 2.201-80 и технологического кода длиной в четырнадцать знаков. Технологический код состоит из двух частей: постоянной части из шести знаков (рис. 1.2,а) и переменной части из восьми знаков (рис. 1.2,б).



а



б

Рис. 1.2. Структура постоянной (а) и переменной (б) части технологического кода деталей, обрабатываемых резанием.

Структура переменной части технологического кода зависит от технологического метода изготовления деталей:

- 1) детали, изготавливаемые литьем;
- 2) детали, изготавливаемые ковкой и объемной штамповкой;
- 3) детали, изготавливаемые листовой штамповкой;
- 4) детали, обрабатываемые резанием;
- 5) детали, термически обрабатываемые;
- 6) детали, изготавливаемые формообразованием из полимерных материалов и резины;
- 7) детали с покрытием;
- 8) детали, обрабатываемые электро-физико-химически;
- 9) детали, изготавливаемые методами порошковой металлургии.

Соответственно ТКД содержит 9 разделов.

Использование таблиц ТКД позволяет однозначно представить конструкторско-технологические признаки детали в виде кода описанной структуры.

В принципе, возможно использование и иных классификаторов, при построении которых учитывается, например, специфика деталей, изготавливаемых на предприятии. При разработке классификаторов следует помнить, что малое число признаков (3–5) делает классификационную систему слишком грубой и не позволяет с достаточной точностью отнести деталь к той или иной группе (классу). Большое (20 и более) число признаков делает классификатор неудобным в работе, что приводит к возникновению ошибок.

Сформированный код изделия является основой для выбора процесса-аналога. Сведения о процессах-аналогах входят в состав информационного обеспечения. Проводят сравнение кодов изделия, на которое разрабатывают ТП, и изделий-представителей, данные о ТП изготовления которых имеются в информационном обеспечении. В случае нахождения процесса-аналога его параметры (рис. 1.2 стрелка 021) принимают за основу создаваемого единичного процесса.

Собственно разработка единичного процесса сводится к редактированию процесса-аналога в соответствии с конструктивно-технологическими особенностями детали, для которой этот процесс и разрабатывают. При этом может измениться как структура процесса-аналога (в следствии включения в него или, наоборот, удаления некоторых операций), так и содержание самих технологических операций. Возможно проведение необходимых технологических расчетов по



определению режимов обработки, нормированию операций и т.д.

Технологические решения (ТР), принятые в процессе проектирования и представленные параметрами маршрутной и операционной технологии, оценивают. При оценке используют различные количественные (технико-экономические) и качественные критерии. Если параметры спроектированной маршрутной и (или) операционной технологии не отвечают поставленным критериям, то принимают решение об изменении ТП. В зависимости от степени несоответствия параметра ТП поставленным критериям необходимые изменения вносят либо на этапе редактирования, либо на этапе выбора процесса-аналога. В последнем случае возможна корректировка конструкторско-технологического кода детали и поиск нового процесса-аналога с выполнением всех последующих этапов разработки.

Параметры разработанного ТП представляют в технологической документации в формах, установленных стандартами ЕСТД.

Единичные ТП изготовления деталей при индивидуальном проектировании разрабатывают в соответствии со структурной диаграммой, показанной на рис. 1.3.

Результаты разработки маршрутной и операционной технологий оценивают. В случае, если параметры спроектированной маршрутной и (или) операционной технологии не отвечают поставленным технико-экономическим критериям, принимают решение об изменении ТП. Возможен возврат на этапы разработки операционной и (или) маршрутной технологии с повторением всех последующих действий. Изменения вносят итерационно до тех пор, пока параметры проектируемого процесса не будут удовлетворять поставленным критериям.

Кроме инвариантных функциям ТПП информационного обеспечения для разработки единичных ТП изготовления деталей и сборки используют руководящую и справочную информацию.

Первая включает данные, изложенные в отраслевых стандартах, устанавливающих требования к ТП и методам управления ими, а также в стандартах на оборудование и оснастку; в документации на действующие единичные, типовые и групповые процессы; в классификаторах технико-экономической информации; в технологических нормативах (режимов обработки, припусков, норм расхода материалов и др.); в производственных инструкциях и документации по технике безопасности и промышленной санитарии.

Вторая содержит данные, представленные в технологической документации опытного производства; в описаниях прогрессивных

методов изготовления и ремонта; каталогах, паспортах, справочниках, альбомах компоновок прогрессивных СТО; в схемах планировки производственных участков, а также в методических материалах по управлению ТП.

Основные этапы разработки единичных ТП сборки при индивидуальном проектировании представлены на структурной диаграмме (рис. 1.3).

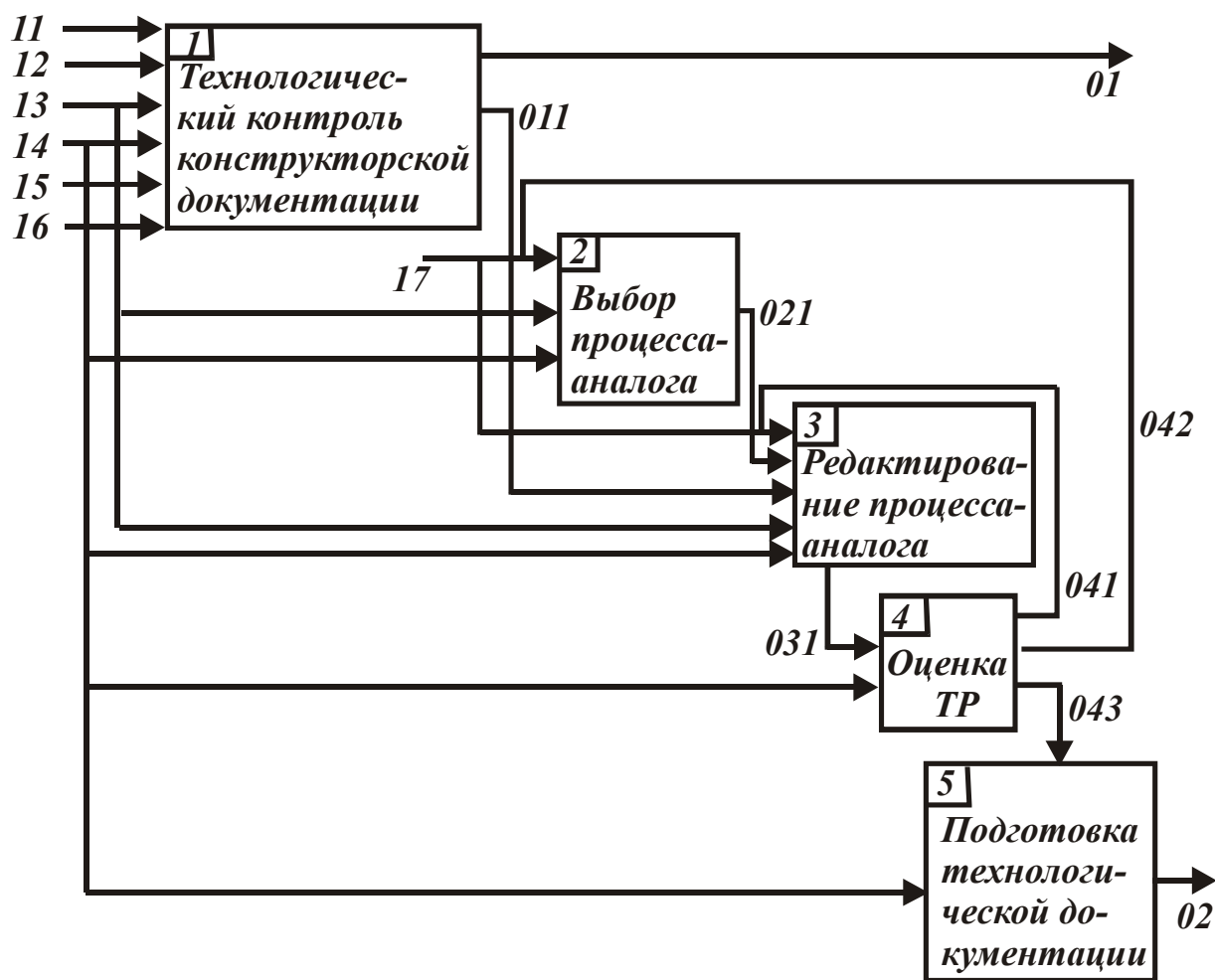


Рис. 1.3. Структурная диаграмма разработки единичного ТП изготовления деталей и сборки при индивидуальном проектировании:

I1 – конструкторская документация на изделие; I2 – конструкторская документация на директивную заготовку; I3 – программа выпуска изделий; I4 – информационное обеспечение; I5 – чертежи изделий, отработанных на технологичность; I6 – чертеж заготовки (разработанный); I7 – изменения ТП изготовления деталей; O1 – изменения конструкций деталей; O11 – конструкторская документация, прошедшая технологический контроль; O21 – параметры маршрутной технологии; O31 – параметры маршрутной и операционной технологий; O41 – изменения маршрутного ТП; O42 – изменения операционной технологии; O43 – параметры маршрутной и операционной технологий; O2 – ТП изготовления детали.

К основным задачам, решаемым при выполнении функции проектирования СТО относят:

- 1) разработку технического задания на проектирование СТО;
- 2) проектирование специальных приспособлений;
- 3) проектирование переналаживаемых приспособлений;
- 4) выбор универсальных СТО;
- 5) проектирование и выбор СТО процессов контроля;
- 6) проектирование и выбор вспомогательной технологической оснастки и инструмента.

При разработке технического задания на проектирование СТО в качестве исходных данных используют конструкторскую и технологическую документацию как вводимую в систему ТПП, так и формируемую в ходе выполнения предшествующих функций ТПП.

К СТО относят технологическое оборудование, оснастку, средства механизации и автоматизации производственных процессов.

Реализация функции проектирования СТО осуществляется в виде подфункций собственно проектирования и выбора.

При ТПП, как правило, проектируют нестандартную специальную технологическую оснастку, средства механизации и автоматизации производственных процессов. Любое СТО может быть выбрано из одноименного множества. Обычно это касается технологического оборудования, а также технологической оснастки и средств механизации и автоматизации стандартных конструкций.

Выходная документация при проектировании станочного специального приспособления включает конструкторскую документацию на специальное станочное приспособление в соответствии со стандартами ЕСКД (сборочный чертеж, спецификация, чертежи деталей) и заказ на изготовление приспособления, оформленный в соответствии с КСТД.

Выбор СТО выполняют в случае, если существует возможность поиска требуемого средства во множестве имеющихся или стандартных средств. Последовательность выбора СТО следующая:

- 1) определяют точное наименование требуемого СТО, для оборудования – группу и тип;
- 2) формируют основные требования (ключ поиска) к искомому СТО;
- 3) выполняют поиск в соответствии с требованиями (ключом поиска);
- 4) оформляют заказ на приобретение найденного СТО.

Исходные данные для поиска содержатся в техническом задании на СТО.

Поиск конструкции технологической оснастки осуществляют с учетом стандартных и типовых решений на основе габаритных размеров и вида заготовки, характеристик материала заготовки, точности параметров и конструктивных характеристик поверхностей изделия, схем установки заготовок, характеристик оборудования, объема выпуска (типа производства).

Информационное обеспечение выбора СТО включает нормативно-техническую (стандарты на оснастку, оборудование и т.д.) и техническую документацию (альбомы, каталоги типовых конструкций оснастки и оборудования, инструктивно-методические материалы по проведению выбора СТО).

Выбор предшествует проектированию СТО, которое проводят в случае, если он не дал желаемых результатов.

Если искомое СТО найдено, то оформляют заказ на его приобретение (покупку или получение со склада).

### **1.2.2. КРИТЕРИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ**

Для определения состояния, сравнения или классификации объектов необходимо оценить их по какому-либо признаку. Признак, на основании которого проводится оценка, называется критерием. Кроме понятия "критерий" в технической и научной литературе с той или иной смысловой близостью используются термины: параметр, фактор, характеристика, целевая функция и др.

В качестве критерия может быть выбран практически любой признак объекта – масса, стоимость, надежность, эффективность, комфортабельность, удобство в работе и т.д.

Критерий позволяет отличать разные объекты, разные состояния одного и того же объекта или характеризовать объект безотносительно других объектов. Каждый объект может быть охарактеризован и (или) сравнен с другими по нескольким критериям.

Значение, которое критерий принимает для данного объекта, называют оценкой. Оценка по критерию может представлять собой размерную величину, безразмерную величину или словесное выражение.

Критерий, оценка по которому принимает численное размерное

значение, называют численным размерным. Это, например, стоимость (оценка в рублях), масса (оценка в килограммах), трудоемкость (оценка в нормо-часах) и др.

Критерий, оценка по которому принимает численное безразмерное значение, называют численным безразмерным. Таковыми являются, например, надежность, коэффициент использования материала, коэффициент загрузки оборудования и др. Результат оценки по таким критериям представляет собой, как правило, вещественное положительное число.

Критерий, оценка по которому не имеет численного значения, называют не численным или лингвистическим. К таким критериям относятся, например, ремонтпригодность, комфортабельность, удобство в работе и др. Оценки по лингвистическим критериям могут быть бинарными, типа "возможно – невозможно", "удобно – неудобно" и т.п., или многовариантными, типа "очень плохо", "плохо", "средне", "хорошо", "очень хорошо", "отлично" и т.п. Использование лингвистических оценок существенно затрудняет создание и эксплуатацию систем автоматизированного проектирования и принятия решений. Поэтому их, как правило, стараются с помощью системы шкал привести к численному безразмерному виду. Например, для оценки какой-либо конструкции по критерию "удобство сборки" можно установить шкалу от 0 до 10, при этом оценка "0" соответствует абсолютной неудобности (невозможности) сборки, а оценка "10" – абсолютной удобности. Таким образом, удобство сборки будет оцениваться численным значением от 0 до 10, а сам критерий можно считать численным безразмерным.

При необходимости к лингвистическому виду можно привести и численный критерий. Такую процедуру используют иногда при сравнении двух объектов. Например, критерий "трудоемкость" обычно оценивают в нормо-часах, но при сравнении двух операций или ТП иногда используют оценки "больше" или "меньше", т.е. критерий "трудоемкость" рассматривают как лингвистический.

Критерии бывают объективные и субъективные.

Оценка по объективному критерию определяется характеристиками самого объекта и не зависит от человека (эксперта). Объективными являются все численные размерные критерии (масса, трудоемкость, стоимость и т.д.) и некоторые численные безразмерные критерии (надежность, коэффициент использования материала, коэффициент загрузки оборудования и т.д.). В любом случае при оценке того

или иного объекта рекомендуется пользоваться объективными критериями.

Когда объективного критерия оценки объекта не существует или оценивается признак, не имеющий объективной оценки, следует пользоваться субъективными критериями. Оценка по субъективному критерию определяется мнением человека (эксперта) или группы людей (экспертов). Субъективными являются все лингвистические критерии (удобство в работе, ремонтпригодность, внешний вид и т.д.) и численные безразмерные критерии.

Для снижения влияния личностного фактора при оценке по субъективному критерию применяют различные методы. Одним из простейших является привлечение к оценке не одного, а группы экспертов. Если все эксперты имеют примерно одинаковую квалификацию и значимость их мнений примерно равна, то суммарная (итоговая) оценка определяется как среднее арифметическое оценок экспертов

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{n}, \quad (1.1)$$

где  $a_i$  – оценка  $i$ -го эксперта;  $n$  – количество экспертов.

Например, для оценки ремонтпригодности конструкции привлечены пять экспертов. Они дали следующие оценки в баллах по 5-балльной шкале: 4, 3, 4, 5, 5. Тогда, в соответствии с выражением (1.1), итоговая оценка составит 4,2. Если же мнение одних экспертов существенно важнее мнения других, то устанавливают "вес" каждого эксперта согласно его значимости, например: чем больше значимость – тем больше "вес". Итоговую оценку в этом случае определяют следующим образом

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n a_i k_i}{\sum_{i=1}^n k_i}, \quad (1.2)$$

где  $k_i$  – "вес"  $i$ -го эксперта.

Рассмотрим предыдущий пример. Из пяти экспертов первые двое являются инженерами-технологами ремонтного цеха, третий – мастером механического цеха, а четвертый и пятый – инженерами-конструкторами. В соответствии с их квалификацией "вес" каждого эксперта будет соответственно 3,0; 3,0; 1,5; 1,0 и 1,0. Тогда согласно

выражению (1.2), итоговая оценка составит 3,9.

Для исключения предвзятости и необъективности некоторых экспертов разработаны специальные методы. Например, при подсчете итоговой оценки отбрасывают наибольшую и наименьшую из выставленных экспертами.

В зависимости от того, в каком виде получена и с какой целью будет использована оценка, критерий может называться абсолютным или относительным. Как правило, абсолютный критерий является численным, а относительный – лингвистическим.

Абсолютный критерий используют для оценки какого-либо признака объекта безотносительно других объектов. В процессе проектирования или принятия решений может быть поставлена задача минимизации или максимизации значения абсолютного критерия. Такого рода критериями являются, например, "стоимость", "трудоемкость", "надежность" и др.

Относительный критерий используют для сравнения нескольких объектов, нескольких состояний одного объекта или сравнения объекта с каким-либо установленным нормативом. Полученные значения критерия (как правило, численные) сравнивают между собой, а итоговую оценку дают в лингвистическом виде. Например, при сравнении двух технологических операций по критерию "трудоемкость", сначала для каждой из них получают численную оценку. На основании сравнения численных оценок каждая технологическая операция получает лингвистическую оценку "лучше" или "хуже". Или, например, при оценке технологичности конструкции по критерию "коэффициент стандартизации" получают численную безразмерную оценку, которую затем сравнивают с базовым (установленным) для данной отрасли коэффициентом стандартизации, получая при этом лингвистическую оценку "удовлетворяет" или "не удовлетворяет".

Оценка объекта может быть дана с использованием прямых или косвенных критериев.

Прямой критерий непосредственно связан с оцениваемым признаком объекта, а его значение показывает значение этого признака. Например, оценка двигателя внутреннего сгорания по критерию "мощность" показывает именно мощность этого двигателя. Косвенный критерий связан с оцениваемым признаком опосредовано, и его значение прямо ничего не говорит о значении признака. Например, критерий "объем цилиндра" и его значение позволяют примерно судить о мощности двигателя, но не дают точного ее значения.

Косвенный критерий применяют в том случае, когда в силу каких-либо причин не удастся использовать прямые критерии. Например, в процессе проектирования трудно с достаточной точностью определить мощность будущего двигателя, в то время как установить объем цилиндров не составляет труда. Косвенный критерий обычно используют в качестве относительного при сравнении аналогичных объектов или сравнении одного и того же объекта.

Критерий может характеризовать какой-либо один признак объекта. Такой критерий называют частным или локальным. Локальными критериями являются, например, максимальная частота вращения шпинделя – для металлорежущего станка, грузоподъемность – для автомобиля, коэффициент использования материала – для заготовки и т.д. Сравнение объектов по локальному критерию позволяет установить отличие одного объекта от другого, но только по одному конкретному признаку, не позволяя оценить объекты в целом. Например, при сравнении двух ТП изготовления какой-либо детали по критерию "трудоемкость" установлено, что трудоемкость первого ТП равна 3 нормо-ч, а второго - 2,5 нормо-ч. Однако на основании только этих оценок нельзя выбрать предпочтительный ТП. Суммарные затраты при реализации второго процесса могут быть, например, существенно большими из-за применения дорогостоящего и энергоемкого оборудования и вследствие других причин.

Для оценки объекта в целом (сразу по нескольким основным признакам) применяют обобщенный критерий, в качестве которого используют такие критерии, как эффективность, производительность, прибыль, себестоимость и т.п. Их называют также комплексными, так как они включают в себя несколько локальных критериев, характеризующих отдельные признаки объекта. Так, при оценке объекта (например, машины) по критерию "себестоимость" необходимо учитывать оценки по следующим критериям: стоимость материалов, стоимость комплектующих, затраты живого труда, затраты на амортизацию оборудования, затраты энергии и т.д.

Использование обобщенных критериев позволяет наиболее полно охарактеризовать объект (объекты), выбрать наиболее оптимальное решение.

В обобщенный критерий могут входить локальные критерии, имеющие различную размерность оценок. При этом итоговую оценку по обобщенному критерию нельзя получить простым суммированием оценок по локальным критериям. В этом случае применяют вектор-



ное сложение, а сам обобщенный критерий называют векторным критерием

$$\bar{\Phi} = \sum_{i=1}^n \bar{\Phi}_i,$$

где  $n$  – количество локальных критериев;  $\bar{\Phi}_i$  – локальный критерий.

Для получения оценки по векторному обобщенному критерию необходимо сначала установить идеальные (оптимальные) значения каждого локального критерия и определить его значимость. Значимость (важность) критерия устанавливают, как правило, субъективно – присвоением ему определенной "веса", причем сумма "весов" локальных критериев должна быть равна единице. Значение оценки по обобщенному критерию определяют в этом случае по формуле

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{A_i}{A_i^*},$$

где  $n$  – число локальных критериев;  $\alpha_i$  – "вес"  $i$ -го локального критерия;  $A_i$  – оценка по  $i$ -му локальному критерию;  $A_i^*$  – идеальное (оптимальное) значение  $i$ -го локального критерия.

Если же в обобщенный критерий входят локальные критерии, имеющие одинаковую размерность оценок, итоговую оценку по нему можно получить простым суммированием значений локальных критериев. Такой обобщенный критерий называют скалярным, а оценку по нему проводят простым арифметическим суммированием оценок локальных критериев.

В ряде случаев необходимо определить значение какого-либо критерия для системы объектов. Например, необходимо оценить по критерию "затраты" (или по критерию "надежность") машину, состоящую из нескольких сборочных единиц и деталей или ТП, включающей несколько операций.

Критерий оценки системы объектов будет называться аддитивным, если его значение получено суммированием оценок отдельных объектов

$$A = \sum_{i=1}^n A_i,$$

где  $n$  – количество объектов;  $A_i$  – оценки  $i$ -го объекта.

Такого рода критериями являются практически все критерии, отражающие стоимостные показатели систем объектов (себестои-

мость, цена, трудоемкость, энергоемкость и др.). При этом надо отметить, что для систем материальных объектов необходимо также учитывать оценку действий по объединению объектов в систему. Например, для ТП, состоящего из трех операции, трудоемкостью 0,5, 0,8 и 0,3 нормо-ч. соответственно, оценка по критерию "трудоемкость" составляет  $0,5 + 0,8 + 0,3 = 1,6$  нормо-ч. Для машины, состоящей из трех агрегатов, трудоемкость изготовления которых 50; 80 и 30 нормо-ч соответственно, в оценку по критерию "трудоемкость" войдет также трудоемкость сборки машины из агрегатов (например, 10 нормо-ч). Значения критерия "трудоемкость" для машины в этом случае составит  $(50+80+30)+10 = 170$  нормо-ч.

Критерий оценки системы объектов будет называться мультиплексным, если его значение получается произведением оценок отдельных объектов

$$A = \prod_{i=1}^n A_i .$$

Мультиплексными являются критерии, отражающие надежность системы объектов. Например, для машины, состоящей из трех агрегатов с надежностью 0,9; 0,95 и 0,8 соответственно, оценка по критерию "надежность" составит  $0,9 \times 0,95 \times 0,8 = 0,684$ . Аналогично для ТП, состоящего из трех операций, вероятность достижения требуемой точности для которых равна 0,9; 0,95 и 0,8 соответственно, оценка по критерию "вероятность достижения требуемой точности" составит  $0,9 \times 0,95 \times 0,8 = 0,684$ .

Для характеристик объекта может быть использовано большое число различных критериев. Выбор критерия для оценки и (или) сравнения объектов определяется характером задач, стоящих перед разработчиком (лицом, принимающим решения).

Обычно в нормальных условиях в качестве основных используют стоимостные (финансовые) критерии, главным из которых является прибыль, которая может быть получена при реализации принимаемого решения. Поскольку оценка по критерию "прибыль" связана с рядом внешних факторов (конъюнктура рынка, конкуренция и т.д.), не всегда представляется возможным определить ее точное значение, особенно на ранних стадиях проектирования объекта. В этом случае в качестве основного критерия оценки объекта принимают себестоимость. Также можно использовать такие критерии, как срок окупаемости затрат, приведенные затраты и т.п.

Однако не всегда стоимостные критерии оценки являются основными. В экстремальных условиях применяют и другие критерии. Например, при спасательных работах критерием принятия решения является время его реализации. При создании уникальных образцов техники, например, автоматических космических аппаратов, главным критерием является надежность.

### **1.2.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРИНЯТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ**

Современное машиностроительное производство характеризуется постоянным ростом требований к качеству продукции и усложнением задач его обеспечения; постоянной сменой объектов производства и необходимостью сокращения сроков ТПП. Производственные задачи усложняются, требования к качеству их решений возрастают, сроки решения сокращаются, возникает необходимость принятия эффективных решений в минимальные сроки.

Удовлетворение указанных требований может быть достигнуто только при автоматизации принятия ТР на основе применения вычислительной техники.

Сложность автоматизации принятия ТР зависит от его вида. Принятие аналитических и прогностических ТР может быть достаточно просто сведено к комплексу взаимосвязанных формальных процедур и алгоритмизировано. Алгоритм — хорошо определенная процедура, гарантирующая решение задачи. О возможности автоматизации принятия аналитических и прогностических ТР свидетельствует наличие значительного числа программных продуктов, предназначенных для обеспечения указанных ТР.

Особо рассматривается автоматизация принятия ТР при анализе и оценке технологичности конструкций. Эти решения являются специфическим видом ТР, принятие которых основано на использовании правил оценки и обеспечения технологичности конструкций. Возможность и эффективность автоматизации рассматриваемых ТР определяется степенью разработанности состава и форм взаимодействия указанных правил.

Принятие проектных ТР основано на применении процедур синтеза. Недостаточная разработанность этих процедур затрудняет их автоматизацию и приводит к появлению неформализуемых этапов

принятия проектных ТР, выполняемых только специалистами и рассматриваемых как акты творчества.

Управляющие ТР обладают многими признаками проектных ТР. Отличительной особенностью управляющих ТР является то, что их принимают, как правило, в реальном времени. Обеспечение быстрого действия отчасти достигается: путем применения специальных автоматических устройств управления ТП. Принятие более сложных управляющих ТР связано с выполнением процедур синтеза.

Таким образом, общей и основной проблемой автоматизации проектных и управляющих ТР является проблема автоматизации процедур синтеза. Наиболее сложная ее часть – автоматизация синтеза структур технологических объектов (структурного синтеза).

Известен ряд примеров систем, обеспечивающих принятие отдельных проектных ТР в автоматизированном режиме. В этих системах процедура синтеза заменена процедурой выбора некоторого типового решения, например, типового ТП. При необходимости технолог-разработчик может корректировать структуру и параметры типового объекта с целью удовлетворения требований технического задания. Такой подход нашел широкое применение в большинстве современных систем автоматизированного проектирования ТП (САПР ТП).

Анализ функций и задач ТПП позволил выделить круг задач принятия ТР, возникающих при разработке и управлении процессами изготовления деталей, автоматизация решения которых желательна в первую очередь (рис.1.4). Большую часть рассматриваемых решений составляют проектные ТР, что подчеркивает их доминирующую роль при ТПП. Принятие проектного или управляющего ТП, как правило, базируется на аналитическом или прогностическом ТР. Поэтому автоматизация принятия проектных и управляющих решений предполагает и автоматизацию принятия аналитических и прогностических решений.

Выбор и оптимизация вида и метода изготовления заготовки, а также выбор ТП ее изготовления представляют собой автоматизируемые задачи принятия ТР. Для формирования ТР в указанных задачах необходимо развитое информационное обеспечение: данные о конструктивно-технологических параметрах заготовок различных видов, изготавливаемых конкретными методами; данные о заготовительных свойствах материалов (библиотеки типовых ТП изготовления заготовок различными методами и т.п.).

Ценность автоматизированного принятия этих решений заклю-

чается в возможности принятия эффективных ТР в неочевидных случаях, требующих сопоставления большого числа данных. Оптимизация вида и метода изготовления заготовки может выполняться как отдельная, формализуемая задача.

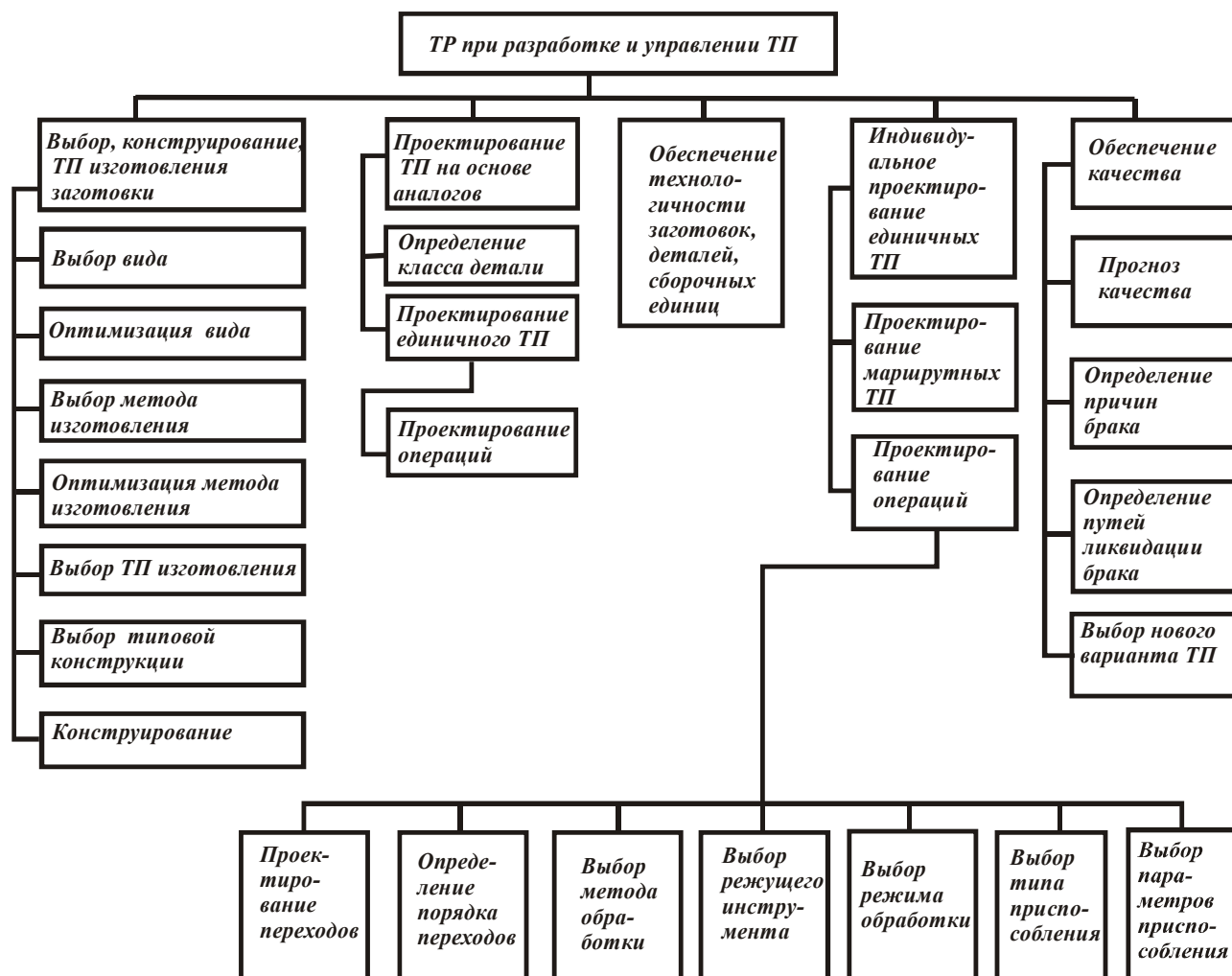


Рис.1.4. Основные ТР при разработке и управлении ТП изготовления деталей.

Выбор типовых конструкций заготовок и конструирование заготовок в автоматизированном режиме связаны с созданием графических баз данных и применением средств автоматизированного конструирования. Процесс конструирования заготовки должен управляться правилами конструирования, соответствующими методу изготовления заготовки. Эти правила должны составлять технологическую основу программного обеспечения процесса конструирования.

Автоматизация проектирования ТП изготовления деталей на основе процессов-аналогов (типовых решений) является в целом решенной задачей. Проектирование единичных ТП изготовления деталей путем редактирования процесса-аналога (типового ТП) является

основой работы большинства существующих САПР ТП.

Оценку технологичности конструкции заготовки, детали, сборочной единицы можно рассматривать как процесс принятия аналитического ТР. Автоматизация оценки технологичности конструкции и отработки последних на технологичность является сложной научно-технической проблемой.

Автоматизация индивидуального проектирования единичных ТП изготовления деталей зависит от решения задачи автоматизации синтеза структур ТП. Разработка операционной технологии возможна в автоматизированном, а в отдельных случаях даже в автоматическом режиме. Создание все более совершенных САПР ТП, обеспечивающих автоматическое проектирование ТП на основе процедур генеративного синтеза их структур, находится в центре новейших исследований и разработок САПР ТП.

Обеспечение качества изготовления продукции можно рассматривать как комплекс управляющих ТР, принимаемых в сфере ТПП. Автоматизация принятия указанных ТР требует обеспечения автоматического взаимодействия аналитических прогностических и проектных ТР, что представляет сложную научно-техническую проблему.

Разработка систем автоматизированного принятия ТР возможна на основе методологии инженерии знаний. Инженерия знаний ориентирована на создание компьютерных систем, целью которых является: извлечение знаний, которыми располагают специалисты, и наиболее эффективное их использование при автоматизированном формировании решений.

Методы инженерии знаний нашли свое воплощение в создании экспертных технологических систем.

Экспертная система представляет собой реализованный на ЭВМ программный комплекс – интеллектуальный автомат, обладающий способностью воспринимать, представлять, обрабатывать и объяснять профессиональные знания на основе формального логического вывода. Решения, формируемые с помощью этих систем, могут соответствовать уровню, достижение которого человеком требует продолжительного образования и значительного опыта.

Экспертные системы в технологической предметной области используются для решения следующих задач:

- 1) выбора вида и метода изготовления заготовки;
- 2) определения класса детали;
- 3) прогноза качества, формируемого в ходе ТП или отдельной тех-

- нологической операции;
- 4) определения причин брака, возникающего в ходе ТП (операции), и поиска путей его ликвидации;
- 5) поиска нового продолжения ТП при изменении производственной ситуации;
- 6) оценки технологичности конструкций.

Экспертную систему принято разделять на базу знаний и машину логического вывода (совокупность всех программ, обеспечивающих формирование логического вывода). Машину логического вывода экспертной системы разрабатывают специалисты в области программирования. Задачей технологов является разработка баз знаний.

База знаний – описание предметной области с использованием ее понятий и компонент знаний, осуществляемой специалистами в

предметной области (экспертами).

Существует символическое и декларативное представление знаний.

Базы знаний экспертных систем символического типа содержат: описания объектов, характеризующих предметную область системы; описания вопросов, задаваемых пользователю системой в ходе консультации (система может формулировать вопросы и самостоятельно); правила формирования логических выводов.

Технологическая предметная область в целом описывается с помощью значительного числа понятий.

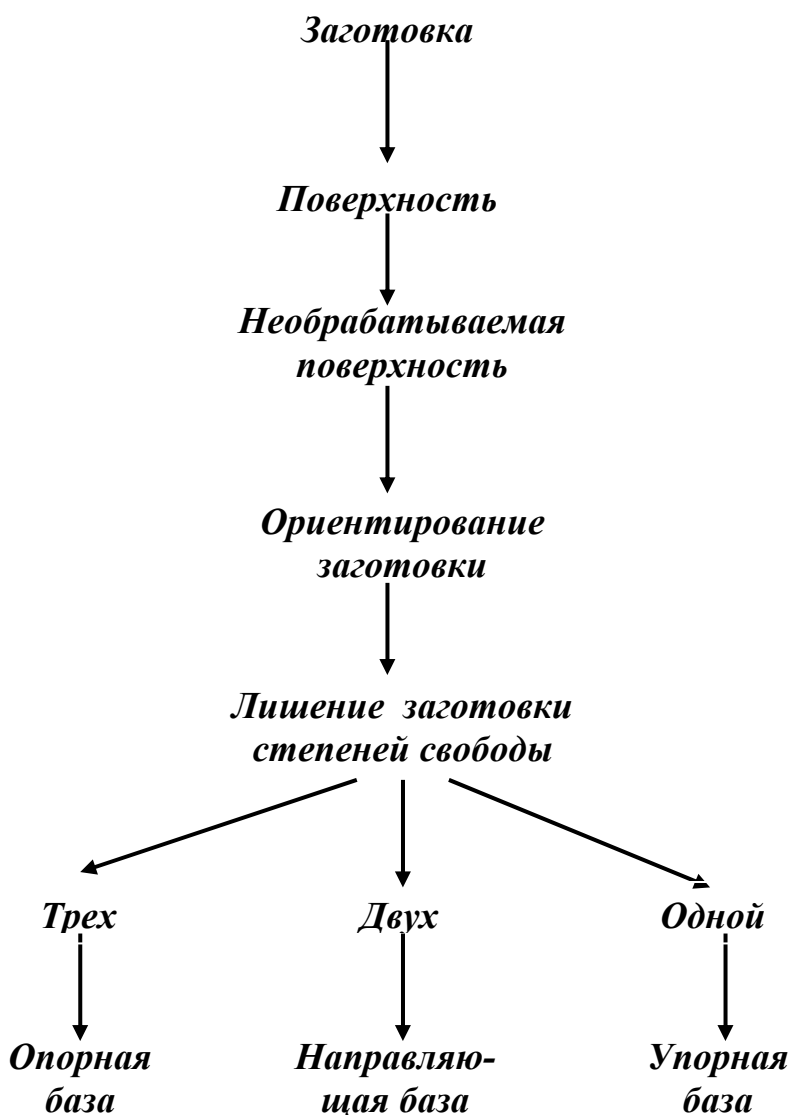


Рис. 1.5. Фрагмент семантической сети определения понятий "база".

Предметная область любой экспертной технологической системы представляет собой лишь часть технологической предметной области и должна определяться с помощью минимально необходимого числа понятий.

Определить минимально необходимое для описания предметной области число понятий можно путем графического представления связей между необходимыми понятиями. Такое представление кроме выявления необходимых понятий устанавливает в абстрактном виде смысловую связь между ними и поэтому называется семантической сетью.

На рис.1.5 приведен пример фрагмента семантической сети. Направление стрелок совпадает с направлением определения понятия. Для сети, приведенной на рисунке, справедлива такая связь понятий: опорная база является поверхностью заготовки, необрабатываемой в данной операции, обеспечивающей необходимую ориентацию заготовки и лишаящей заготовку трех степеней свободы.

Подобным образом могут быть интерпретированы любые фрагменты семантических сетей.

Каждое понятие записывается с помощью термина. Термин – совокупность символов, с помощью которых представляется понятие. Иногда понятие и термин используют как синонимы, хотя понятие – это отражение сущности объекта, а термин – его изображение. В экспертных системах термин – символьное изображение объекта.

Каждый объект имеет ограниченное множество возможных (разрешенных) значений. Например:

**СТАНОК = {ТОКАРНО-РЕВОЛЬВЕРНЫЙ; ТОКАРНО-ВИНТОРЕЗНЫЙ; ТОКАРНО-КАРУСЕЛЬНЫЙ}.**

**КЛАСС ДЕТАЛИ = {КОЛЬЦО, ВТУЛКА, ДИСК}.**

Множество разрешенных значений объектов ограничивает возможности экспертной системы. Если для системы, объекты которой определены в рассмотренном примере, указать, что "**КЛАСС ДЕТАЛИ = ВАЛ**", система не опознает такой объект, так как символьная конструкция "**ВАЛ**" не указана в множестве разрешенных значений "**КЛАСС ДЕТАЛИ**".

База знаний экспертной системы символьного типа включает совокупность продукционных правил, связывающих ее объекты.

Продукционное правило – способ представления знаний в виде причинно-следственных связей. Основной формой продукционного правила является:



**ЕСЛИ ( $\wedge\{УСЛОВИЕ\}$ ) ТО ( $\vee\{ДЕЙСТВИЕ\}$ ),**

где  $\wedge, \vee$  – символы логических "и", "или" (логических операций конъюнкции и дизъюнкции); фигурные скобки – символ множества.

"Условие" и "действие" состоят из фактов. Факт имеет следующий вид: "объект=значение". Например, "КЛАСС ДЕТАЛИ=ВАЛ". Если "условие" или "действие" содержат более одного факта, то между ними ставится связка – логическое "и" (конъюнкция). Приведем пример продукционного правила:

**ЕСЛИ (ДЕТАЛЬ = ВАЛ)**

**И (НАЛИЧИЕ ЦЕНТРОВЫХ ГНЕЗД = ДА)**

**И (ПРОИЗВОДСТВО = СЕРИЙНОЕ)**

**И (НАЛИЧИЕ ФРЕЗЕРНО-ЦЕНТРОВАЛЬНОГО СТАНКА=ДА)**

**ТО (НОМЕР ОПЕРАЦИИ = 1)**

**(СОДЕРЖАНИЕ = ФРЕЗЕРОВАНИЕ ТОРЦЕВ И ЗАЦЕНТРОВКА)**

**(ВОЗМОЖНАЯ БАЗА = НАРУЖНАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ПОВЕРХНОСТЬ).**

Продукционные правила связывают понятия (объекты) предметной области с учетом разрешенных значений, которые они могут принимать в ходе консультации. Нахождение этих эвристик, раскрывающих сущность связей понятий предметной области технологии, является основной задачей технолога-разработчика базы знаний экспертной системы.

Продукционные правила подразделяют на частные правила, определяющие конкретные действия, выполняемые для фиксированных условий (пример такого правила приведен выше) и метаправила – правила управления правилами. Метаправила фиксируют границы предметной области экспертной системы и сокращают время формирования вывода, вызывая в зависимости от условий необходимый блок продукционных правил. Последовательность метаправил можно рассматривать как сценарий консультации с экспертной системой.

Выполнение продукционного правила по сути представляет собой логическую операцию – импликацию: **A → B**. Если **A** истинно, то **B** истинно. Если **A** – ложь, то выражение становится неопределенным. Основным принцип формирования логического вывода при использовании продукционных правил – силлогизм. Так для ввода **A = ИСТИНА** правила вывода и вывод имеют вид

**ЕСЛИ A ТО B**  
**ЕСЛИ B ТО C**  
**C = ИСТИНА.**

**Пример.** Для ввода  
**ОБРАБАТЫВАЕМЫЙ МАТЕРИАЛ = ЖАРОПРОЧНЫЙ СПЛАВ**

правила и вывод будут следующими:

**ЕСЛИ (ОБРАБАТЫВАЕМЫЙ МАТЕРИАЛ = ЖАРОПРОЧНЫЙ СПЛАВ)  
ТО (ИЗНАШИВАНИЕ ИНСТРУМЕНТА = ИНТЕНСИВНОЕ)**

**ЕСЛИ (ИЗНАШИВАНИЕ ИНСТРУМЕНТА = ИНТЕНСИВНОЕ)  
ТО (КОНТРОЛЬ РАЗМЕРНОГО ИЗНОСА = ПОСТОЯННЫЙ)  
КОНТРОЛЬ РАЗМЕРНОГО ИЗНОСА = ПОСТОЯННЫЙ.**

Экспертная система в ходе консультации оперирует фактами и представляет результат консультации в виде фактов. Различают факты, вводимые пользователями в виде исходных данных при диалоге с системой (применяются только в условиях производственных правил), и факты, выводимые системой (могут располагаться как в части "условие", так и в части "действие" производственных правил).

Вывод консультации может быть альтернативным, т.е. содержать несколько фактов, относящихся к объекту консультации. В этом случае окончательное решение принимает пользователь. Для облегчения процесса принятия окончательного решения каждый альтернативный вывод может иметь соответствующий коэффициент доверия, определяемый системой. Например:

**РЕЗУЛЬТАТ КОНСУЛЬТАЦИИ**

**ПРИЧИНА БРАКА = ИЗНОС ИНСТРУМЕНТА, КД = 0,2**

**ПРИЧИНА БРАКА = ИЗНОС НАПРАВЛЯЮЩИХ СТАНКА, КД=0,4**

**ПРИЧИНА БРАКА = НЕРАВНОМЕРНАЯ ТВЕРДОСТЬ  
ЗАГОТОВКИ, КД = 0,4**

(где КД – коэффициент доверия к выводу). Коэффициент доверия всегда меньше или равен единице, но сумма коэффициентов доверия альтернативных выводов не всегда равна единице. Это объясняется тем, что альтернативы могут быть определены по независимым цепям логического вывода.

Базу знаний можно рассматривать как логико-эвристическую модель технологического объекта.

В ходе консультации последовательность правил, образующая цепь логического вывода, такая:

1. Среди множества правил базы знаний выбираются правила (правило), правая часть которых содержит ответ на запрос к экспертной системе.
2. Для этих правил определяются условия, соответствующие их левой части.

3. Выбираются правила, правая часть которых соответствует найденным условиям.

Процесс продолжается до тех пор, пока не будут найдены правила, значения объектов, в левой части которых соответствуют условиям запроса. После этого для полученных цепей правил совершается обратный ход – от условий запроса к ответу на запрос.

Чтобы цепь логического вывода не обрывалась, для любого факта, не являющегося объектом консультации и полученного из некоторого правила, должно быть найдено правило, в котором данный факт находится в условии. Место правила в базе знаний не имеет значения.

Консультация пользователя с экспертной системой завершается получением ответа на запрос, либо, если база знаний системы не обеспечивает принятия решения, выдачей на интерфейс пользователя соответствующего сообщения.

Экспертные системы являются эффективным средством преодоления не формализуемых этапов принятия решения, позволяют принимать ТР в условиях неопределенности.

Вместе с тем экспертные системы обладают рядом недостатков, основными из которых являются: сложность формирования баз знаний, содержащих количество правил, достаточное для формирования полноценных ТР (необходимое количество – несколько десятков тысяч или даже десятки тысяч правил); сложность приобретения новых знаний; дискретность и жесткость вывода, не позволяющая, если не найдено решение, точно соответствующее условиям, получать решения, "близкие" к искомым.

Информационные потребности машиностроительного производства непрерывно возрастают. При создании изделия, подготовке его производства и собственно производстве требуются:

- 1) известные (апробированные) решения или их фрагменты, например, текстовые описания процессов-аналогов и технологических документов (известные данные, хранящиеся в соответствующих базах данных, извлекаемые и используемые в сочетаниях, предусмотренных запросом пользователя);
- 2) неизвестные до сих пор (новые) решения различных видов, связанные с подготовкой производства, его мониторингом и управлением.

Обеспечение указанных информационных потребностей возможно путем применения систем автоматизированного выбора решений (САВР), принципиальная структура которых изображена на

рис.1.6. Рассмотрим функциональное назначение каждой из компонент системы.

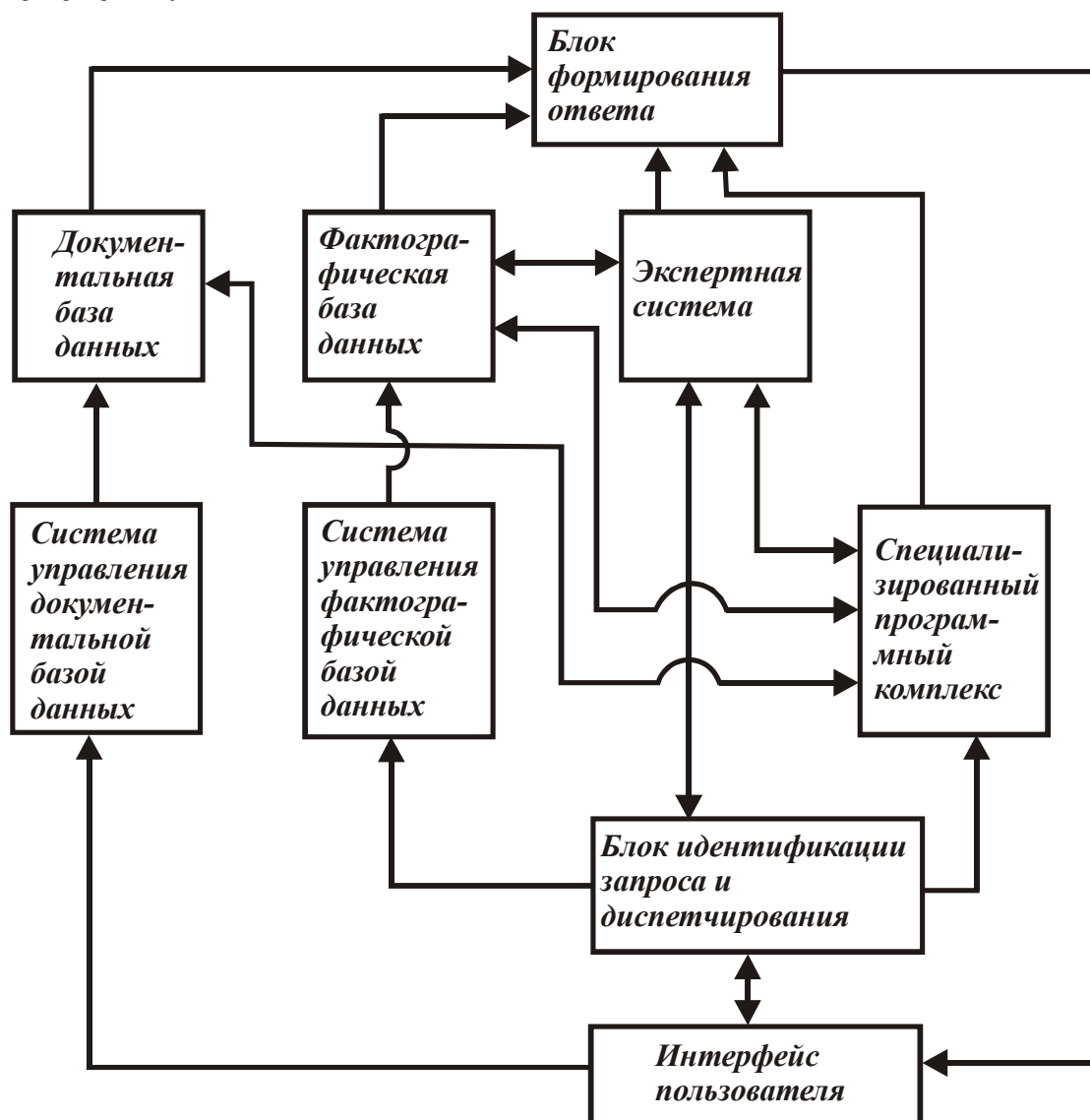


Рис.1.6. Структура САВР.

Интерфейс пользователя обеспечивает ввод запроса, работу с системой в режиме диалога, получение ответа в форме, наиболее приемлемой для пользователя САВР.

Блок идентификации запроса и диспетчирования на основании характера запроса определяет, какая из компонент САВР может обеспечить формирование ответа на запрос к системе. В случае, если необходимо получение известных решений, запрос может быть адресован к документальной или фактографической базам данных, имеющих собственные системы управления. Документальная база данных представляет собой совокупность текстовых документов, содержащих известные решения. Фактографическая база данных – совокупность данных, предназначенных для совместного использования,

например, каталог параметров режущих инструментов, таблицы режимов резания и т.д.

Экспертная компонента в составе САВР используется как средство решения трудноформализуемых задач, требующих приложения специализированного интеллекта.

Специализированный программный комплекс предназначен для выполнения специализированных расчетов и других действий, необходимых при принятии ТР. К специализированным расчетам относят, например, расчеты ожидаемых элементарных и суммарной погрешностей обработки, межоперационных припусков режимов обработки и т.д.

Блок формирования ответа осуществляет прием результатов решения и представление его в формах, приемлемых для пользователя.

Возможности САВР обеспечивают принятие основных видов ТР при разработке и управлении ТП (рис.1.6.).

При развитии информационном обеспечении САВР возможно формирование ТР высокого качества, не требующих дополнительной переработки специалистом и пригодных для непосредственной разработки на их основе необходимых конструкторско-технологических мероприятий.

Пользователь получает ответ на запрос либо на экране терминала ввода – вывода, либо путем вывода на печать. Если удовлетворение запроса невозможно, то выдается соответствующее сообщение.

Работа рассмотренных систем принятия ТР основана на использовании технологических знаний.

Основной формой современного представления и хранения технологических знаний является литературная (текстовая) форма, которая, будучи фактически единственной в течение всего предшествующего развития машиностроения, обладает рядом недостатков, важнейшими из которых являются:

- 1) рассредоточенность знаний как по источникам, так и во времени и вследствие этого их сравнительно малая доступность;
- 2) непроверенность знаний, возможность вытеснения более истинного знания менее истинным, но энергично пропагандируемым;
- 3) невозможность быстрого использования знаний без соответствующих преобразований специалистом.

Текстовую форму можно считать пассивной формой представления и хранения знаний.

Разработана концепция активного использования технологичес-

ких знаний, в основу которой положена идея активизации знаний, заключающаяся в выделении из текстовой технологической информации основных компонент знаний и хранений их в виде, обеспечивающем готовность к немедленному использованию. Исходные компоненты знаний могут быть применены непосредственно при изготовлении изделий, а также для получения на их основе нового, ранее не существовавшего знания.

Предметная область машиностроения включает и совокупность знаний, относящихся к различным технологическим переделам (видам производства) – заготовительному, изготовлению деталей, сборочному. Переделы можно разделять и по применяемым технологическим методам: механическая обработка, сборочное производство, технология нанесения покрытий, электрохимическая, электрофизическая и специальная обработки, прокатное производство, обработка давлением, литейное и металлургическое производства, сварочное производство, химико-термическая обработка.

Принятие ТР часто требует взаимодействия знаний, относящихся к различным переделам. Так, проектное ТР, связанное с синтезом структуры ТП изготовления деталей, может потребовать взаимодействия знаний о механической обработке, сборочном производстве (операции промежуточной сборки), химико-термической обработке (выбор вида и места химико-термической обработки) и т.д.

Возникает необходимость интеграции САВР, относящихся к различным технологическим переделам машиностроительного производства, в более сложные структуры принятия решений, работа которых также основана на концепции активного использования технологических знаний. Главным путем реализации указанной идеи в предметной области машиностроения является создание банка технологических знаний (БТЗ), охватывающего основные переделы машиностроительного производства.

Банк технологических знаний – реализованная на базе ЭВМ система, обеспечивающая контроль истинности, классификацию, накопление, хранение и выдачу знаний и ТР по запросу пользователя.

Принципиальным отличием БТЗ от существующих автоматизированных систем хранения и выдачи технологических данных, например, банков данных, является его способность предлагать пользователю новые, неизвестные до сих пор ТР, которые не хранятся в нем в виде, пригодном для моментального использования, но могут быть получены в результате взаимодействия имеющихся в банке зна-

ний. Указанные ТР формируются для конкретных условий, указанных пользователем. При необходимости пользователю могут быть предоставлены (переданы по каналам связи) специализированные программные компоненты, не входящие в базовое программное обеспечение БТЗ. В этом случае пользователь самостоятельно формирует ТР, используя указанные программные компоненты как инструментальное средство.

БТЗ может обеспечивать выдачу, например, следующей информации:

- 1) данных о любых современных материалах, используемых в машиностроении, и методах их обработки (с необходимой коммерческой информацией), о современном оборудовании и состоянии его рынка, об оптимальных для пользователя режимах обработки конкретного материала и необходимом инструменте;
- 2) описаний новейших ТП изготовления изделия, интересующих пользователя классов и типоразмеров, адаптированных к конкретным условиям, с необходимой документацией и коммерческой информацией об отечественных и зарубежных предприятиях, выпускающих аналогичную продукцию;
- 3) отдельных подсистем САПР (в загрузочных модулях), встраиваемых в аналогичные системы, эксплуатирующиеся на предприятии пользователя;
- 4) баз данных, используемых в САПР пользователя;
- 5) специализированных программных продуктов для выполнения необходимых технологических расчетов (в загрузочных модулях).

Разработанный БТЗ должен обеспечивать максимальный охват всех компонент знаний в заданной предметной области, выполнять оценку истинности знаний, поступающих на хранение, а также обеспечивать удовлетворение информационных потребностей пользователя как по форме, так и по содержанию.

БТЗ организуется в виде уровневой структуры (рис.1.7). Каждый из четырех уровней банка аккумулирует знания, определяющие соответственно физические явления и эффекты, лежащие в основе машиностроительных технологий; топологические методы машиностроительного производства; ТП изготовления машиностроительных изделий; производственные процессы при изготовлении машиностроительных изделий.

Знания, аккумулированные в уровнях БТЗ, объединены в блоки,

соответствующие основным переделам машиностроительного производства (рис.1.7); механическая обработка (МО); сборочное производство (С); технология нанесения покрытий (ТНП); электрохимическая, электрофизическая и специальная обработка (ЭХ, ЭФ, СО); прокатное производство (ПП); обработка давлением (ОД); литейное и металлургическое производства (Л); сварочное производство (СП); химико-термическая обработка (ХТО).

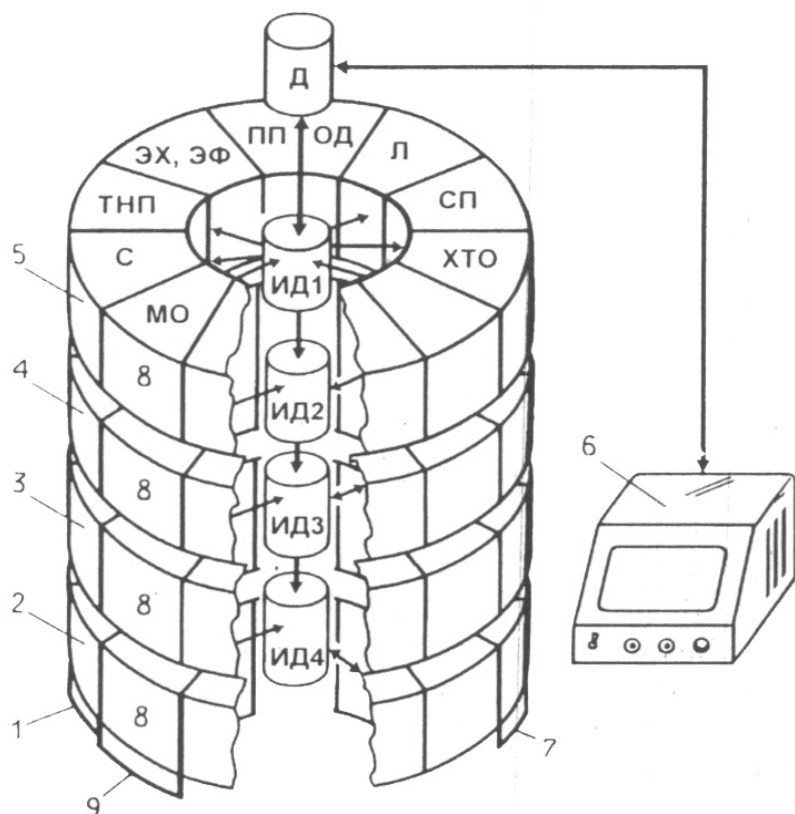


Рис. 1.7. Уровневая организация БТЗ: 1 – блок С; 2 – 5 – уровни “производственный процесс”, “технологический процесс”, “технологический метод”, “физические явления и эффекты” соответственно; 6 – терминалы ввода-вывода; 7 – блок ХТО; 8 – сегменты; 9 – блок МО.

Сегменты БТЗ в пределах одного уровня и между уровнями выполняют интерфейсно-диспетчерские модули (ИД1–ИД4). Такой принцип построения обеспечивает высокую гибкость банка при формировании решений по запросу пользователя.

Сегмент БТЗ структурно, и функционально идентичен уже рассмотренным САВР.

Организация знаний позволяет в рамках БТЗ обеспечить проверку их истинности, а также общей непротиворечивости получен-

Элемент БТЗ, находящийся на пересечении уровня и блока, представляет собой автономную подсистему – сегмент БТЗ, имеющую все основные элементы для обеспечения информационных потребностей пользователя.

Обращение пользователя к БТЗ и получение ответа на запрос осуществляется через терминалы ввода – вывода, а управление БТЗ как системой – диспетчерским программным модулем (Д).

Взаимосвязь



ных ТР, что также принципиально отличает БТЗ от других систем удовлетворения информационных потребностей.

Создание БТЗ связано с решением ряда сложных задач, основными из которых являются:

1. Разработка универсального понятийного аппарата для описания предметной области машиностроения.
2. Выбор рационального представления знаний, создание методов и средств формирования баз технологических знаний.
3. Разработка программного и информационного обеспечения БТЗ.

Несмотря на наличие значительного числа сложных, до конца не решенных задач, интенсивные научные исследования по созданию компонент БТЗ проводят как в нашей стране, так и за рубежом.

Полноценная реализация концепции активного использования технологических знаний резко увеличит эффективность использования знаний в современном производстве, позволит накапливать истинные знания, эффективно использовать апробированные ТР и синтезировать на их основе новые. Возможность принятия эффективных ТР в минимальные сроки резко увеличит эффективность производства.

#### **1.2.4. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И ПРИНЦИПЫ САПР ТП, ВИДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Под автоматизацией проектирования понимают систематическое использование ЭВМ в процессе проектирования при обоснованном распределении функций между человеком и ЭВМ и обоснованном выборе методов автоматизированного решения технологических задач.

Различают три вида проектирования: неавтоматизированное, автоматизированное и автоматическое. При неавтоматизированном проектировании все преобразования описаний объекта и (или) алгоритма его функционирования или алгоритма процесса, а также представление описаний на различных языках осуществляет человек. При автоматизированном проектировании все вышесказанное осуществляется в результате взаимодействия человека и ЭВМ, а при автоматическом проектировании – без участия человека.

При автоматизированном проектировании проектировщик должен решать творческие задачи, а ЭВМ – задачи, функции которых

связаны в основном с выполнением нетворческих или умственно-формальных процессов при проектировании. Дальнейшее развитие теории проектирования и вычислительной техники позволяет постепенно передавать ЭВМ решение и творческих задач. Производительность труда технолога-проектировщика повышается:

- 1) совершенствованием системы проектирования, включая систематизацию самого процесса проектирования и улучшение труда проектировщиков;
- 2) комплексной автоматизацией нетворческих функций проектировщика в процессе проектирования;
- 3) разработкой имитационных моделей для автоматического воспроизведения деятельности человека, его способности принимать решения в условиях полной или частичной неопределенности создавшихся ситуаций.

По степени углубленности разработок различают несколько уровней проектирования: разработку принципиальной схемы ТП, проектирование технологического маршрута обработки, проектирование технологических операций, разработку управляющих программ для оборудования с числовым программным управлением.

Технологический процесс механосборочного производства и его элементы являются дискретными, поэтому задача синтеза заключается в определении их структуры. Если среди вариантов структуры ищут наилучший в некотором смысле, то такую задачу синтеза называют структурной оптимизацией.

Расчет оптимальных параметров ТП или операции (перехода) при заданной структуре с позиции некоторого критерия называют параметрической оптимизацией. Возможности постановки и решения задач структурной оптимизации ограничены, поэтому под оптимизацией часто понимают только параметрическую оптимизацию. Следовательно, параметрическая оптимизация – это определение таких значений параметров  $x$ , при которых некоторая функция  $F(x)$ , называемая целевой или функцией эффективности, принимает экстремальное значение.

На каждом уровне процесс технологического проектирования (проектирование ТП и его оснащение) представляется как решение совокупности задач (рис.1.8).

При решении технологической задачи взаимодействие технолога-проектировщика с ЭВМ представляет процесс обмена информацией в определенном режиме. Различают два основных режима: пакет-

ный (автоматический) и диалоговый (оперативный).

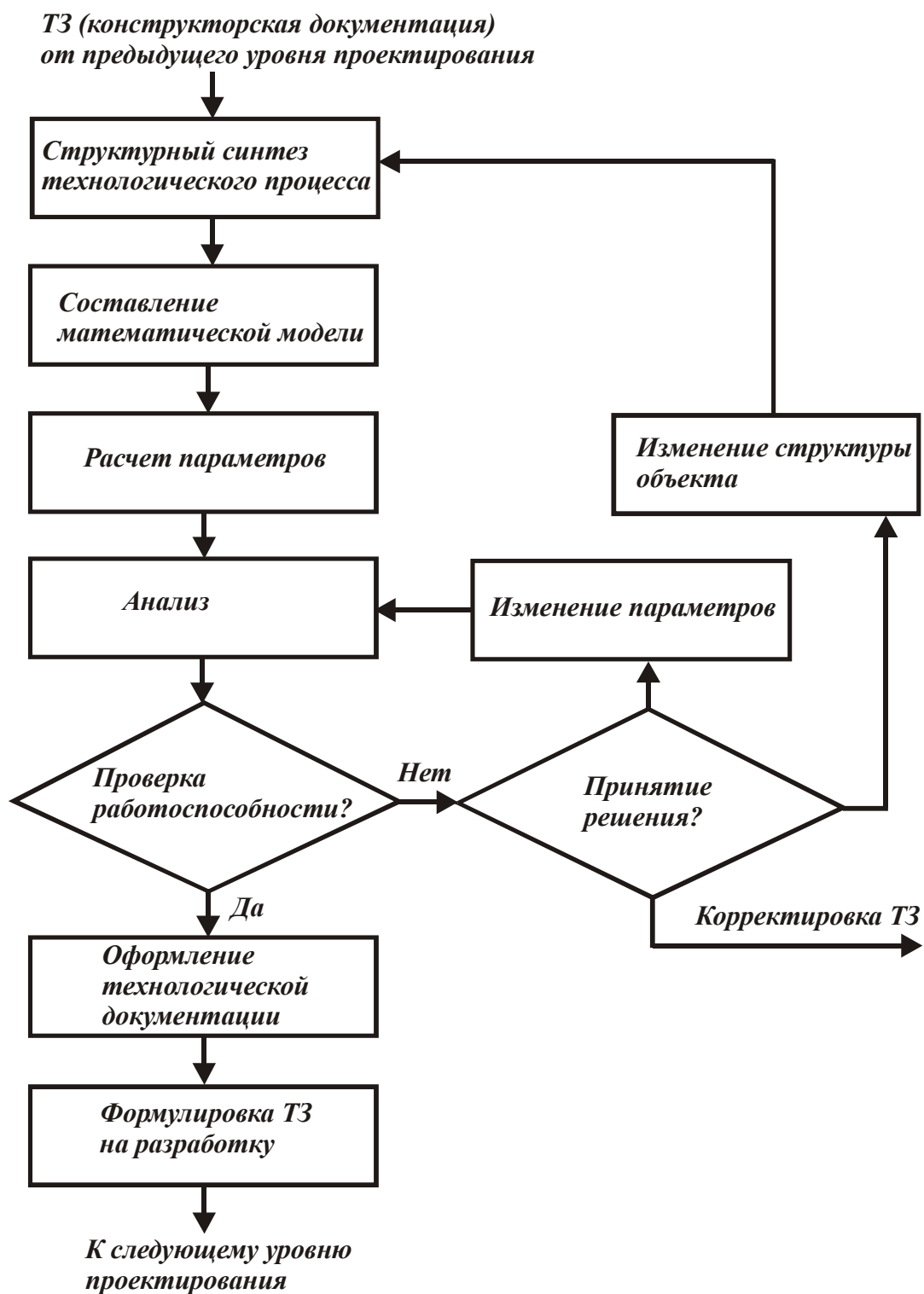


Рис.1.8. Схема процесса проектирования на  $i$ -м уровне.

В пакетном режиме технолог-пользователь и программист, как правило, не имеют прямой связи с ЭВМ. Тексты программ, результаты их проверки и решения технологической задачи передаются машине через оператора. Пакет прикладных программ представляет

комплекс программ, работающих под управлением программы-монитора, и предназначен для решения определенного класса близких друг другу технологических задач, например, проектирование технологического маршрута обработки деталей определенного класса (группы), сборки узлов и сборочных операций заданного типа.

В оперативном режиме технолог-проектировщик-пользователь непосредственно связан с ЭВМ посредством пользовательского интерфейса, обеспечивающего достаточно быстрое получение информации через интервал времени, не нарушающий естественного хода его мысли.

Диалоговый режим эффективен при решении творческих задач, когда требуется эвристический подход (распознавание геометрических образов деталей, размерных и топологических связей между элементарными геометрическими образами с целью оптимального выбора схем базирования, проектирование маршрута обработки, сборки и др.). Эти и многие другие задачи можно автоматизировать лишь путем синтеза творческих процессов человека и «способностей» машинных программ. Вместе с тем в диалоговом режиме значительно увеличиваются затраты на проектирование. Можно создавать пакеты программ, позволяющих накапливать опыт проектирования и формировать алгоритмы классификации, генерирования понятий, поведения. Поэтому возникла и решается задача создания автоматизированных систем проектирования ТП в режиме диалога с последующим переходом к пакетному (автоматическому) режиму более высокого уровня путем использования программ обучения.

К числу наиболее сложных и наукоемких систем в современной технике относят САПР, разработка которой включает следующие основные задачи: анализ процессов технологического проектирования (разработка ТП и средств оснащения); алгоритмизация проектных задач на базе методов оптимизации, ММ, дискретной математики, искусственного интеллекта; разработка программных комплексов для решения задач проектирования производственных и технологических систем; создание проектов САПР, включая выбор и адаптацию программных и технических средств, разработку операционных сред САПР. Все это является комплексом задач, решаемых разработчиком САПР при участии специалиста в предметной области (технолога-машиностроителя).

При создании САПР, в том числе проектирование ТП, учитывают ряд положений:

- САПР строится как открытая и развивающаяся система, в которой проектирование ведется с помощью ЭВМ. САПР разрабатывают продолжительное время, поэтому экономически целесообразно вводить ее в эксплуатацию по частям по мере готовности. Созданный базовый вариант системы может расширяться. Кроме того, возможно появление новых, более совершенных ММ, программ, изменяются также и объекты проектирования;
- САПР создается как иерархическая система, реализующая комплексный подход к автоматизации на всех уровнях проектирования. Так, в САПР ТП обычно включают подсистемы структурного, функционально-логического и элементного проектирования (разработки принципиальной схемы ТП, проектирования маршрута, проектирования операций, разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ). Иерархическое построение САПР относится также к специальному программному обеспечению и к техническим средствам (центральный вычислительный комплекс и автоматизированные рабочие места);
- САПР представляет совокупность информационно-согласованных подсистем. Обслуживание всех или большинства последовательно решаемых задач ведется информационно-согласованными программами. Плохая информационная согласованность приводит к тому, что САПР превращается в совокупность автономных программ;
- САПР должна быть инвариантной системой, т. е. универсальной или типовой; ее структурными частями являются подсистемы. Подсистема – выделяемая часть системы, с помощью которой можно получить законченные результаты проектирования. Каждая подсистема содержит элементы обеспечения.

Предусматриваются следующие виды обеспечения автоматизированного (автоматического) проектирования:

- методическое – совокупность документов, устанавливающих состав, правила отбора и эксплуатации средств обеспечения проектирования, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования;
- информационное – совокупность сведений, необходимых для выполнения проектирования, представленных в заданной форме;
- математическое – совокупность математических методов, математических моделей и алгоритмов, необходимых для проектирования, представленных в заданной форме;

- лингвистическое – совокупность языков проектирования, включая термины и определения, правила формализации естественного языка и методы сжатия и развертывания текстов, необходимых для проектирования, представленных в заданной форме;
- программное (ПО) – совокупность машинных программ, необходимых для проектирования, представленных в заданной форме; программное обеспечение делят на две части:
  - 1) общее ПО (операционная система), необходимое для функционирования ЭВМ;
  - 2) специальное ПО, включающее все программы решения конкретных проектных задач;
- техническое обеспечение – совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств, предназначенных для проектирования. К техническому обеспечению предъявляются следующие требования: достаточность вычислительных ресурсов (производительность и емкость памяти) для решения всех основных проектных задач; приближенность к рабочим местам проектировщиков, создание дружественного интерфейса пользователь – ЭВМ; обеспечение коллективного выполнения проектирования. Главное направление ускорения вычислений в современных ЭВМ – распараллеливание вычислений. Высокопроизводительные вычисления требуются, в частности, для обработки графической информации в интерактивном (в реальном масштабе времени) режиме при разработке конструкторско-технологической документации;
- организационное обеспечение – совокупность документов, устанавливающих состав проектной организации и ее подразделений, связи между ними, их функции, а также форму представления результата проектирования и порядок рассмотрения проектных документов, необходимых для выполнения проектирования.

Основные виды перечисленных обеспечений требуют разработки баз данных и, как следствие их дальнейшего развития и интеллектуализации, – разработку баз знаний.

База данных (БД) – структурированная совокупность данных. Наименьшая единица описания данных называется элементом описания. Совокупность элементов описания, объединенных отношением принадлежности к одному описываемому объекту, называется запи-

стью. Если элементы описания соответствуют отдельным свойствам объекта, то запись описывает объект в целом. Например, код типа операции, логическая функция, коэффициент разветвления в совокупности составляют запись и описывают свойства конкретного объекта – технологической операции.

Система управления базами данных (СУБД) состоит из языковых и программных средств, предназначенных для создания и использования БД прикладными программами, а также непосредственно пользователями-непрограммистами.

Банк данных (БНД) – совокупность БД и системы управления БД (например, нормативно-технологическая информация).

Переход от данных к знаниям – логическое следствие развития и усложнения информационных структур, обрабатываемых на ЭВМ (например, методики выбора маршрутов обработки, параметров технологических операций и т. д.). Основными отличиями знаний и данных являются:

- интерпретируемость – означает, что данные, помещенные в ЭВМ, могут содержательно интерпретироваться лишь соответствующими программами. В отрыве от программы, данные не несут никакой содержательной информации. Знания отличаются тем, что возможность содержательной интерпретации присутствует в них всегда;
- наличие классифицирующих отношений. Заключается в следующем – несмотря на разнообразие форм хранения данных, возможности компактного описания всех связей между различными типами данных ограничены;
- ситуативные связи. Определяют ситуативную совместимость отдельных событий или фактов, хранимых или вводимых в память, и позволяют строить процедуры анализа знаний.

При автоматизированном проектировании оптимальных ТП механосборочного производства необходимо учитывать:

- системность автоматизированного проектирования на основе характера и взаимосвязи факторов, влияющих на построение ТП, определяющих обеспечение заданного качества изготавливаемых изделий и экономичную эффективность разрабатываемой технологии;
- оптимизацию проектируемого ТП, предусматривающего комплексную взаимосвязь его структуры, параметров качества изготавливаемого изделия, режимов обработки;
- рациональное сочетание типовых и индивидуальных технологических решений на всех уровнях проектирования.

Повышение уровня типизации, унификации и стандартизации при разработке ТП во многом определяет эффективность автоматизированного проектирования.

Автоматизированная система технологической подготовки производства (АСТПП) включает проектирование ТП как заготовительного производства, так и обработки резанием и сборки, проектирование технологической оснастки, специального инструмента и нестандартного оборудования.

Под рабочим процессом в информационной системе понимают преобразование входных данных в выходные. В данной системе это означает преобразование информации о детали, представленной в виде информационной модели в технологическую документацию. Обычно этот процесс включает: разработку принципиальной схемы ТП, проектирование технологического маршрута обработки детали; проектирование технологических операций с выбором оборудования, приспособлений и инструмента, а также с назначением режимов резания и норм времени; разработку управляющих программ для станков с ЧПУ; расчет технико-экономических показателей ТП, разработку необходимой технологической документации.

Непосредственное участие проектировщика позволяет принимать решения о формальном распределении функций между ЭВМ и человеком. Важным и необходимым элементом рабочего процесса является информационное обеспечение – характеристика обрабатываемых материалов, каталоги станочного оборудования, режущего и измерительного инструмента и т. д.

В настоящее время функционирует множество систем проектирования ТП: информационно-поисковые системы, основанные на адресации деталей к унифицированным ТП (типовым и групповым ТП), которая позволяет формировать БД по технологическому оснащению, типовым деталям и т. п.; большая группа систем основана на синтезе структуры ТП из обобщенной структуры (рис.1.9). Обобщенная структура  $M_y^*$ , состоящая из типовых индивидуальных маршрутов

$M_i$ , представляется как  $M_y^* = \bigcup_{i=1}^n M_i$  и  $M_i \subset M_y^*$ . Необходимым

условием включения индивидуального маршрута  $M_i$  в обобщенную структуру является наличие непустой области пересечения  $M_y^*$  и  $M_i$ . Учитываются условия назначения операций (переходов) в маршруты.



Модель эксперта включает алгоритмы выделения ТП (маршрута или операции) из обобщенной структуры для конкретных условий по определенным правилам (машина вывода).

В тех случаях, когда номенклатура изготавливаемых деталей неустоявшаяся (например, в экспериментальном машиностроении), в

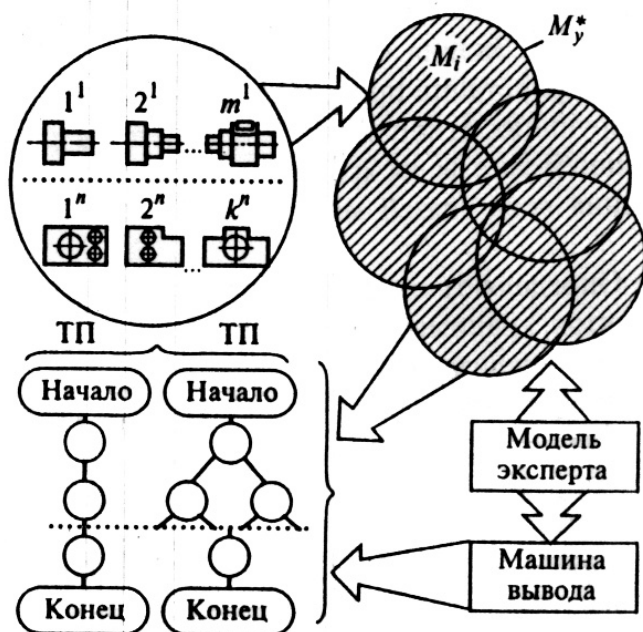


Рис.1.9. Схема синтеза структуры ТП из обобщенной структуры.

основе автоматизированной подсистемы проектирования **ТП** лежит принцип группирования по базовым (типовым) конструктивам **БК<sub>i</sub>** изготавливаемого комплекта деталей и конструктивным обогащениям (отдельные конструктивные элементы), рис.1.10. Таким образом, ТП для изготовления комплекта деталей можно представить как совокупность операций обработки базовых конструктивов **ТП<sub>БК</sub>** и переходов **p<sub>k</sub>** на обработку элементов конструктивного обога-

щения  $M = \{ТП_{БК_i} P_i\}$ .

Такой подход позволяет перейти к блочно-модульному принципу проектирования ТП и подготовки управляющих программ (УП) для станков с ЧПУ. Модель эксперта включает правила, учитывающие соотношение конструктивных признаков базового типового образа (конструктива) и конструктивных элементов обогащения, что определяет проектирование типового или единичного ТП. Синтез ТП происходит при выделении его из обобщенной структуры или проектируется единичный ТП. Машина вывода в обоих случаях позволяет иметь альтернативные варианты, позволяющие учитывать изменяющиеся производственные условия (рис.1.10).

Достоинство разработки ТП с помощью базовых конструктивов и конструктивного обогащения состоит, прежде всего, в том, что она позволяет существенно упростить единичный, сквозной цикл проектирования – изготовление детали. Для таких средств проектирования существуют библиотеки операционных карт и определенные наборы

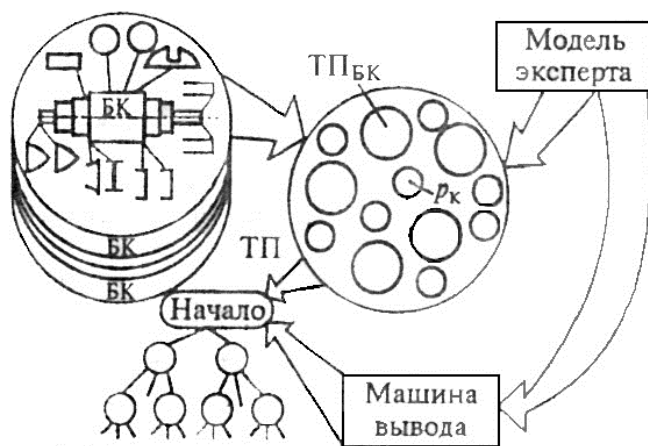


Рис. 1.10. Схема структурного синтеза ТП на основе базового конструктива с элементами конструктивного обогащения.

режущего инструмента, материала. Это обеспечивает оперативную связь при интерактивном взаимодействии конструктора и технолога на базе вычислительной системы. Такой подход позволяет обеспечить максимальное значение целевой функции.

Выделение конкретной структуры из обобщенной происходит по нисходящим, восходящим и комбинированным направлениям. Предложенные автоматизированные системы САПР ТП являются многоуровневыми от разработки принципиальной схемы ТП до подготовки УП для изготовления деталей на станках с ЧПУ. В частности, такие системы основываются: на многошаговом синтезе; использовании таблиц применяемости; на поэтапном преобразовании описания изделия в описание ТП изготовления этого изделия; на иерархической системе математического моделирования на различных уровнях абстрагирования (САПР сборки).

Основными уровнями технологического проектирования процессов сборки в системе являются: выбор схемы базирования; определение конструктивной схемы сборочного приспособления; определение последовательности установки сборочных единиц; проектирование ТП сборки.

### 1.2.5. СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТП

В основе решения задач структурного синтеза различной сложности лежит перебор вариантов счетного множества. При переборе каждая проба включает: создание (поиск) очередного варианта, при-

групповых карт наладки оборудования. Последнее обеспечивает групповые способы производства спроектированных деталей.

При формировании типовых образов и фрагментов обогащений, прежде всего, учитывались данные, приходящие с технологического уровня, конкретизирующие информацию об элементах деталей на основе общности рабочего места, оснастки,

нятие решения о замене ранее выбранного варианта новым и продолжение или прекращение поиска новых вариантов.

Задачи структурного синтеза при автоматизированном технологическом проектировании зависят от уровня сложности. В наиболее простых задачах синтеза (первого уровня сложности) задается структура ТП или его элементов (операции, перехода). В этом случае часто используют таблицы применимости (табличные модели).

Для полного перебора вариантов структуры из конечного множества необходимо задавать перечень всех элементов этого множества (второй уровень сложности структурного синтеза). Такой перечень создается в виде каталога типовых вариантов структуры, например, типовых технологических маршрутов. Тогда для данного класса (группы, подгруппы или вида) деталей устанавливается так называемый обобщенный маршрут (обобщенная структура) обработки. Он включает перечень операций обработки, характерный для определенного класса, подкласса или группы деталей. Перечень является упорядоченным и представляет собой множество существующих индивидуальных маршрутов. Эти маршруты имеют типовую последовательность и содержание, причем для предприятия или отрасли они отражают передовой производственный опыт.

При третьем уровне сложности структурного синтеза решаются задачи выбора варианта структуры во множестве с большим, но конечным результатом известных вариантов. Для решения таких задач используют алгоритмы направленного перебора (например, алгоритмы дискретного линейного программирования), алгоритмы последовательные, итерационные и др.; сведения задачи к полному перебору путем ограничения области поиска на стадии формирования исходных данных. Например, оптимизация плана обработки поверхности представляет задачу структурного синтеза, когда выбор варианта плана происходит во множестве с большим, но конечным числом известных вариантов. Для поиска оптимального варианта используют алгоритмы дискретного программирования, находят условия, которым должен удовлетворять оптимальный многошаговый процесс принятия решений. Подобный анализ называют динамическим программированием. Оптимальная стратегия обладает тем свойством, что, каков бы ни был путь достижения некоторого состояния (технологического перехода), последующие решения должны принадлежать оптимальной стратегии для части плана обработки поверхности, начинающегося с этого состояния (технологического перехода). Для

того чтобы учесть сформулированный принцип оптимальности, можно использовать следующие обозначения:  $f_n(p_i)_y$  – технологическая себестоимость, отвечающая стратегии минимальных затрат для плана обработки от технологического перехода  $p_i$  до последнего перехода (если до него остается  $n$  шагов);  $j_n(p_i)$  – решение, позволяющее достичь  $f_n(p_i)$ .

Общей особенностью всех моделей динамического программирования является сведение задач принятия решения к получению рекуррентных соотношений, которые можно представить в следующем виде

$$f_n(p_i) = \min [C_{p_{ij}} + f_{n-1}(p_j)], \quad (1.3)$$

где  $C_{p_{ij}}$  – технологическая себестоимость при выполнении технологического перехода  $p_j$  после перехода  $p_i$ .

Возможные варианты плана обработки поверхности представляют сеть или граф. Рекуррентное соотношение (1.3) позволяет из множества сформированных вариантов выбрать один или несколько лучших с указанием глубин резания, подач и скорости резания по технологическим переходам, а также заготовку.

К третьему уровню сложности структурного синтеза ТП и его элементов также относят задачи целочисленного программирования; при этом программировании к требованиям линейности критерия и ограничений добавляется условие целочисленности переменных. Например, имеющуюся совокупность  $\{p\}$  переходов необходимо распределить по позициям станка (вертикального или горизонтального многошпиндельных токарных полуавтоматов, пруткового автомата и др.), для чего вводят переменные  $x_{ij}$  равные 1, если  $i$ -й переход выполняется на  $j$ -й позиции и 0 – в противном случае, где  $i = 1, 2, \dots, p$ ;  $j = 1, 2, \dots, m$ .

При этом учитывают основные группы ограничений, связанных:

1) с необходимостью закрепления определенных переходов за позициями станка

$$\sum_{j \in A_i} x_{ij} = 1,$$

где  $A_i$  – множество индексов позиций, на которых может быть выполнен  $i$ -й переход;

2) с требованием определенной очередности выполнения переходов

$$x_{ij} \leq \sum_{v=1}^j x_{i',v} \text{ для всех } i' \in B_i, j \in A_i,$$

где  $B_i$  – множество индексов переходов, без выполнения которых нельзя выполнить переход с индексом  $i$ ;

3) с возможностью совмещения нескольких переходов на одной позиции  $\sum_i^p x_{ij} \leq k$ , при котором суммирование ведется по индексам

рассматриваемых переходов. Целое число  $k$  означает количество совмещенных на одной позиции переходов.

Если при указанных ограничениях требуется найти минимум целевой функции

$$Z = \sum_i \sum_j C_{ij} x_{ij}, \quad (1.4)$$

(где  $C_{ij}$  – себестоимость  $i$ -го перехода на позиции  $j$ ), то задачу целочисленного программирования с булевыми переменными можно решить методом частичного перебора (аддитивный алгоритм).

Задачи структурного синтеза четвертого уровня сложности (выбор вариантов во множестве с заранее неизвестным числом элементов или вообще в бесконечном множестве) решаются при активном участии технолога-проектировщика и реализуются в режиме диалога с ЭВМ. Например, при проектировании инструментальной наладки для пруткового автомата в режиме диалога устанавливается определенный порядок взаимодействия технолога и машины (рис.1.11). Технолог, работающий в режиме диалога с ЭВМ, выбирает такой вариант структуры, который представляет собой оптимальный компромисс между производительностью работы автомата и вероятностью обеспечения заданного качества обрабатываемой детали. ЭВМ помогает технологу принять решение об изменении структуры, рассчитав по программе режимы резания и производительность автомата.

Общую трудоемкость проектирования наладки можно уменьшить с помощью перехода от диалогового режима к пакетному. Подобные задачи решают путем применения процедур обучения (процедур формирования понятий). В качестве процедур обучения используют программы распознавания и классификации. При этом происходит перераспределение рутинной и творческой работы при использовании пакетного режима более высокого уровня, технолог занимается подготовкой исходных данных и проверяет окончательный результат.



Рис. 1.11. Схема взаимодействия технолога-проектировщика и ЭВМ при проектировании автономной операции.

Пятый, самый сложный, уровень структурного синтеза направлен на создание принципиально новых ТП и решается так называемым поисковым конструированием (искусственный интеллект).

Одним из путей поискового конструирования является использование метода эвристических приемов:

- уяснение или формулирование технического задания (ТЗ);
- выбор одного или нескольких аналогов (прототипов) ТП;
- анализ прототипов.

Выявление их недостатков и формулирование постановки задачи в виде ответов на вопросы:

- а) каковы показатели качества в прототипе синтезирующего ТП и насколько желательно их улучшить;
- б) какие новые параметры качества детали должен обеспечить создаваемый ТП и какие параметры качества должен утратить рас-

- сматриваемый прототип;  
 в) решение задачи.

Большие трудности, возникающие при поисковом конструировании и эвристическом программировании, привели к появлению экспертных систем. В основе экспертных систем лежит БД, используемая экспертом (технологом-пользователем) в режиме диалога. Недостатком таких систем явилась зависимость качества проектных технологических решений (в частности, проектирование маршрутной и операционной технологий) от уровня подготовки эксперта. Другой недостаток заключается в ограничении круга решаемых задач из-за размерности.

Необходимость повышения уровня интеллектуализации автоматизированного процесса

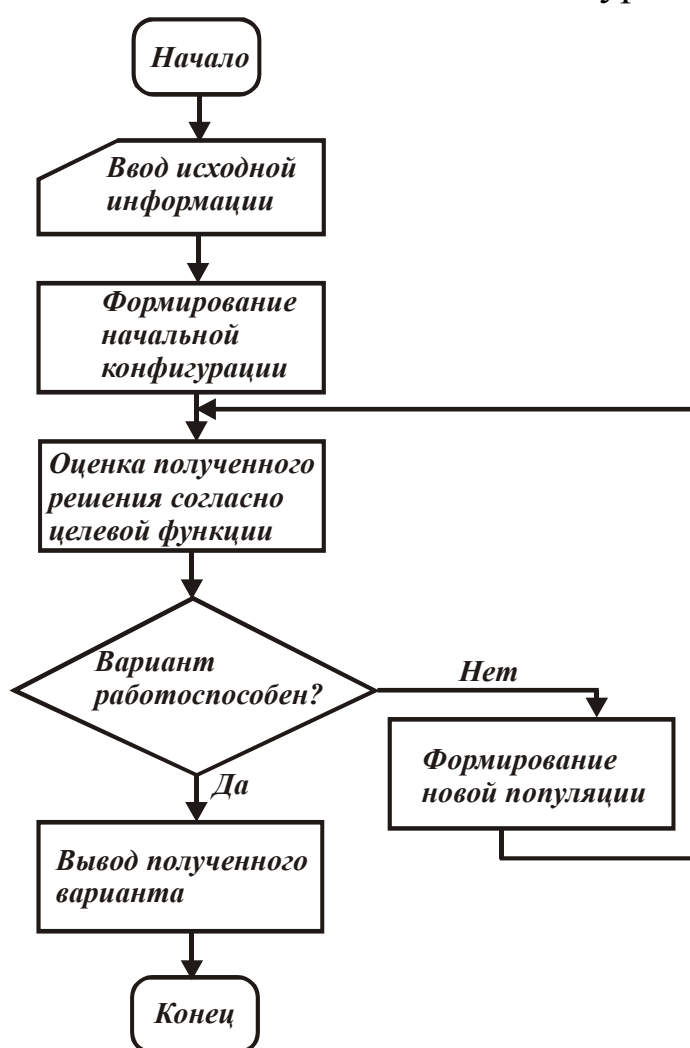


Рис.1.12. Генетический алгоритм.

синтеза технологических решений при высоких размерностях решаемых задач потребовала разработки принципиально новых решений, одним из которых явилось создание и использование метода генетических алгоритмов.

Применение генетических алгоритмов предполагает отображение возможной структуры ТП в виде хромосомы (фреймов), состоящей из генов (полей). Каждый ген является аналогом операции в технологическом маршруте.

При формировании структуры ТП используется набор эвристических

правил, позволяющий эффективно формировать конкретные структуры. Оценка эффективности проводится на основе расчета значений целевой функции и анализа полученных результатов. Реализация такого подхода осуществляется на основе алгоритма, представленного

на рис.1.12.

Совокупность возможных структур ТП, представленная в виде хромосом, образует популяцию. Процесс решения задачи сводится к формированию новых популяций путем модификации предыдущих. Модификация основана на формировании новых хромосом путем скрещивания лучших (согласно целевой функции) хромосом из предыдущей популяции. Это позволяет достаточно быстро находить работоспособный вариант при решении задач высокой размерности.

### 1.2.6. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

Расчет оптимальных параметров (режимов резания, параметров качества и др.) ТП или операции при заданной структуре с позиции некоторого критерия называют параметрической оптимизацией, которая предусматривает определение таких значений параметров  $x$ , при которых некоторая функция  $F(X)$ , называемая целевой функцией, или функцией эффективности (например, приведенные затраты, технологическая себестоимость, штучное время, штучная производительность, технологическая производительность, вспомогательное время и др.), принимает экстремальное значение.

Для решения задач оптимизации в технологическом проектировании используют функциональные математические модели и методы математического программирования – линейное, целочисленное, динамическое, геометрическое и др.

В технологическом проектировании оптимизационные модели, описанные методами математического программирования, записывают в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} F(x_1, x_2, \dots, x_n) &\rightarrow \min(\max), \\ g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) &\leq \overline{b_i}, i = \overline{1, m}, \\ a_{1i} \leq x_j &\leq a_{2i}, i = \overline{1, n}, \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

где все управляемые  $x_j$  могут принимать значения из множества  $[a_{1i}, a_{2i}]$  действительных чисел;  $F(X)$  и  $g_i(X)$  – скалярные функции своих аргументов;  $\overline{b_i}$  – заданные действительные функции.

Задачи подобного типа в технологии машиностроения возникают при определении оптимальных режимов обработки. В этом случае применяют методы линейного и нелинейного программирования.





$$\sum_{j=1}^3 a_{ij} x_j \leq b_i, \quad i = \overline{1, n},$$

где  $x_1 = lnt$ ;  $x_2 = z_s$ ;  $x_3 = z_n$ ;  $t, s$  – соответственно глубина резания и подача при рассматриваемом переходе;  $a_{ij}$  – коэффициенты, зависящие от показателей степени при глубине резания, подачи и скорости резания в формулах сил и скорости резания, а также от коэффициентов геометрических рядов подач и частот вращения шпинделя;  $k_0, \dots, k_3, b_i$  – коэффициенты и величины ограничений, зависящие от конкретных условий обработки.

Одним из возможных методов решения широкого класса нелинейных задач является метод геометрического программирования, позволяющий рассматривать задачи с учетом особенностей их инженерной постановки. Основное требование геометрического программирования состоит в том, чтобы все технические характеристики были выражены в виде положительных полиномов (позиномов) от регулируемых параметров, т. е. в виде функций

$$g(X) = \sum_{i=1}^n c_i \prod_{j=1}^q x_j^{\alpha_{ij}},$$

где  $c_i$  и  $\alpha_{ij}$  – постоянные;  $c_j \geq 0, x_j \geq 0$ .

Во многих технологических задачах зависимости между параметрами приводят к функциям типа позиномов. Так, при построении операций при врезном шлифовании на одно- и многокруговых шлифовальных полуавтоматах ставилась задача выбора режимов обработки, обеспечивающих минимальное время обработки при достижении заданной точности. С учетом ограничений по суммарным значениям радиальных сил, по суммарной мощности, необходимой для резания, и ограничения, обеспечивающего размерную стойкость круга при черновой обработке, формулируется следующая задача геометрического программирования:

$$\begin{aligned} g_0(x) &= c_1 x_1^{-1} x_2^{-1} + c_2 x_1 x_2^{1,75} + c_3 x_2^{-1} x_3^{-1} \rightarrow \min; \\ g_1(x) &= c_4 x_1^{0,8} x_2^{0,8} \leq 1; \\ g_2(x) &= c_5 x_2 \leq 1; \\ g_3(x) &= c_6 x_1 + c_7 x_3 \leq 1; \\ x_j &> 0 (j = \overline{1,3}); c_i > 0 (i = \overline{1,7}), \end{aligned} \tag{1.9}$$

где  $x_1 = s_j$  – подача;  $x_2 = n_i$  – частота вращения заготовки;  $x_3$  – переменная (носит вспомогательный характер).

Геометрическое программирование более чем другие методы нелинейного программирования приспособлено для использования в ЭВМ. В процессе решения появляется возможность анализировать поведение целевой функции  $g_0(\bar{x})$  при изменении различных параметров, входящих в задачу.

Для параметрической оптимизации можно использовать метод динамического программирования, который сводится к рекуррентным соотношениям (например, распределение припуска по технологическим переходам). Динамическое программирование – это вычислительный метод, обеспечивающий глобальный оптимум.

Используют также различные методы поиска, исключаящие полный перебор (например, регулярного поиска для определения оптимальных режимов резания при обработке ступенчатых валов на токарном гидрокопировальном полуавтомате). Задают исходные данные (размеры и материал детали, режущий инструмент, глубину резания, жесткость узлов станка, цикловые и внецикловые потери времени работы оборудования). Требуется найти режим обработки  $s_j, n_i$ , удовлетворяющий условиям по точности обработки, шероховатости поверхности, мощности, расходуемой на резание, кинематике станка и приводящий целевую функцию к максимуму:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \Sigma_f &\leq \delta_f; \\ \Delta y_{f \max} &\leq k_1 \delta_f; \\ \Delta u_{\max} &\leq k_2 \delta_f; \\ Rz_{f \max} &\leq Rz_{f \text{дон}}; \\ \sum_{1}^{q+1} N_{\text{рез } f \max} &\leq N_{\text{д}} \eta k_n; \\ \sum_{1}^q N_{\text{рез } f} &\leq N_{\text{д}} \eta k_n; \\ s_{\min} &\leq s_j \leq s_{\max}; \\ v_{\min} &\leq v_i \leq v_{\max}. \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

Целевая функция (штучная производительность)

$$Q = \frac{k}{kt_x + k(\sum C_i + t_e + 1)}, \quad (1.11)$$

где  $\delta_f$  – заданный допуск на диаметр ступени  $f$ ;  $\Delta\Sigma_f$  – ожидаемая суммарная погрешность;  $\Delta y, \Delta u$  – составляющие суммарной погрешности;  $k_1, k_2$  – экспериментальные коэффициенты;  $N_\delta$  – мощность электродвигателя;  $k_n$  – коэффициент перегрузки электродвигателя;  $\eta$  – КПД;  $q+1$  и  $q$  – индексы резцов, установленные соответственно на гидрокопировальном и поперечном суппортах;  $k$  – технологическая производительность;  $t_x$  – время на холостые перемещения инструмента;  $\Sigma C_i$  – потери времени, связанные с эксплуатацией режущего инструмента;  $t_\theta$  – внецикловые потери времени.

Ограничения (1.10) определяют возможные варианты обработки деталей. Для каждой обрабатываемой поверхности детали имеется набор возможных сочетаний  $s_j$  и  $n_i$ , выбор которых обусловлен приведенными выше ограничениями. Множество допустимых для  $f$ -й поверхности детали пар  $(s_j, n_i)$  обозначают  $R_f = \{(s_j, n_i)^f\}$ , где  $f = \overline{1, k}$  – индекс ступени вала.

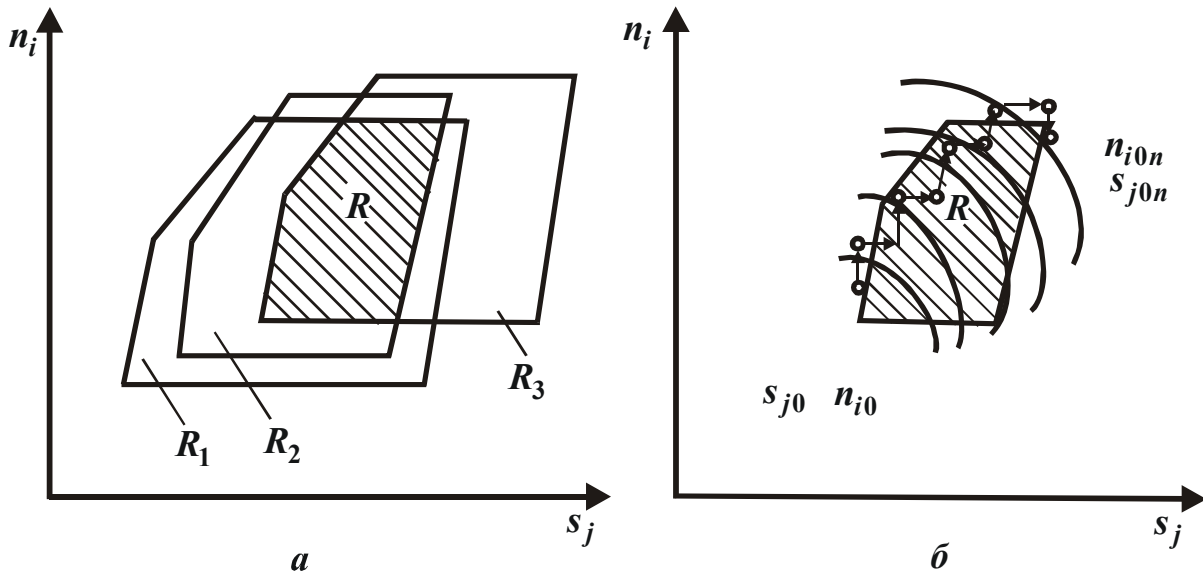


Рис. 1.13. Схема образования области допустимых режимов резания (а) и геометрическая интерпретация нахождения оптимальных режимов резания с наложением уровней целевой функции (б).

Возможный вариант обработки детали в целом может быть реализован с параметрами  $s_j, n_i$ , принадлежащими всем множествам

$R_f$ , т. е. область  $R$  их пересечения  $s_j, n_i \in \bigcap_{f=1}^k R_f$  (рис. 1.13,а). Для

начала перебора находят один допустимый режим  $(s_{j0}, n_{i0})$  и, двигаясь от него вдоль границы области пересечения (рис.1.13,б), определяют оптимальный режим  $s_{jon}, n_{ion}$ , приводящий целевую функцию (1.11) к максимуму.

Влияние ограничений на значение целевой функции и область допустимых решений задачи различно. Например, анализ результатов моделирования операции обработки на токарных гидрокопировальных полуавтоматах показал, что изменение заданного допуска на диаметр  $\delta_f$  ступени вала влияет на значение целевой функции  $Q$  (рис.1.14, а) и число возможных вариантов обработки (рис.1.14, б).

При параметрической оптимизации ММ оценивают с точки зрения пригодности их использования для решения технологических задач в производственных условиях. Это выполняют с помощью статистического анализа путем:

- сравнения двух методов решения конкретной задачи – ММ-использования нормативных данных, при этом проверяют гипотезу соответствия значений двух выборок;
- проверки ММ на чувствительность влияния случайных факторов;
- проверки ММ на ее адекватность реальному ТП.

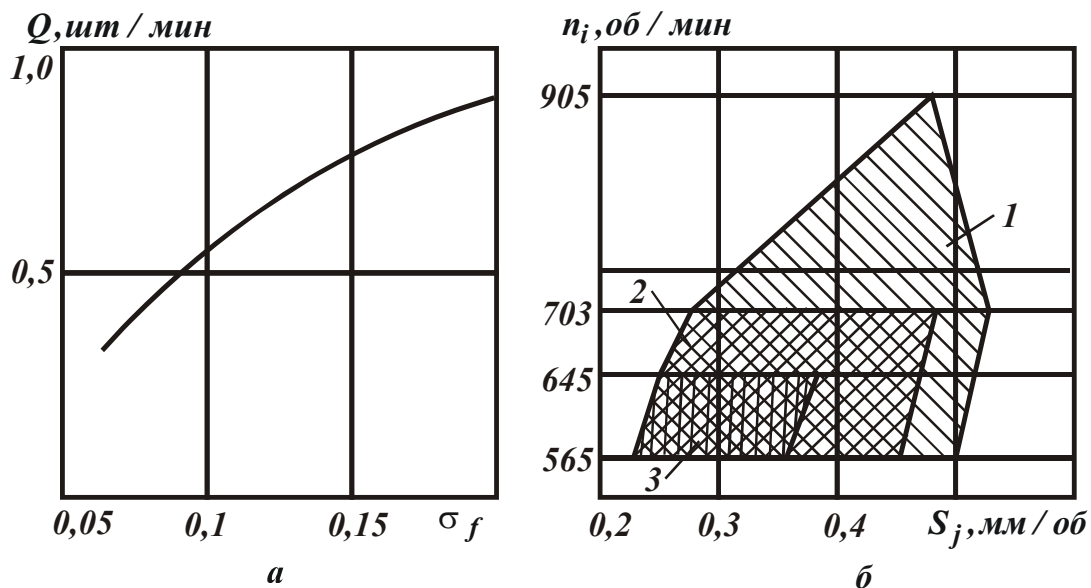


Рис. 1.14. Зависимость производительности  $Q$  от допуска ( $\delta_f$ ) (а) и изменение областей допустимых режимов резания  $s_j$  и  $n_j$  от  $\delta_f$  (б): 1 -  $\delta_f = 0,2$  мм; 2 -  $\delta_f = 0,15$  мм; 3 -  $\delta_f = 0,1$  мм (для диаметров  $D_f = 60$  мм).

## 1.2.7. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПОДСИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТП

### Краткая характеристика методов автоматизации проектных работ

Существующие подсистемы проектирования в большей степени информационно-поисковые или вариантные и в меньшей степени поисковые. На рис.1.15 показана схема методов автоматизации проектных работ, представляющих три группы.

Первая группа – информационно-поисковые подсистемы. На рис.1.15 приняты следующие обозначения:  $I'_u$  и  $Q'_u$  – входные и выходные данные;  $x'_u$  – оператор (способ проектирования).

Вторая группа представляет типовое вариантное проектирование, при котором создается обобщенная структура, а затем из нее синтезируется конкретная структура или структуры. При этом в большей или меньшей степени используется типизация. Типовое вариантное проектирование использует различные операторы проектирования  $x'_u$ , основанные на наборе эвристических методов, логических или математических алгоритмов.

Третья группа методов представляет творческие действия. Они направлены на то, что неизвестно. В частности, применяют эвристическое программирование.

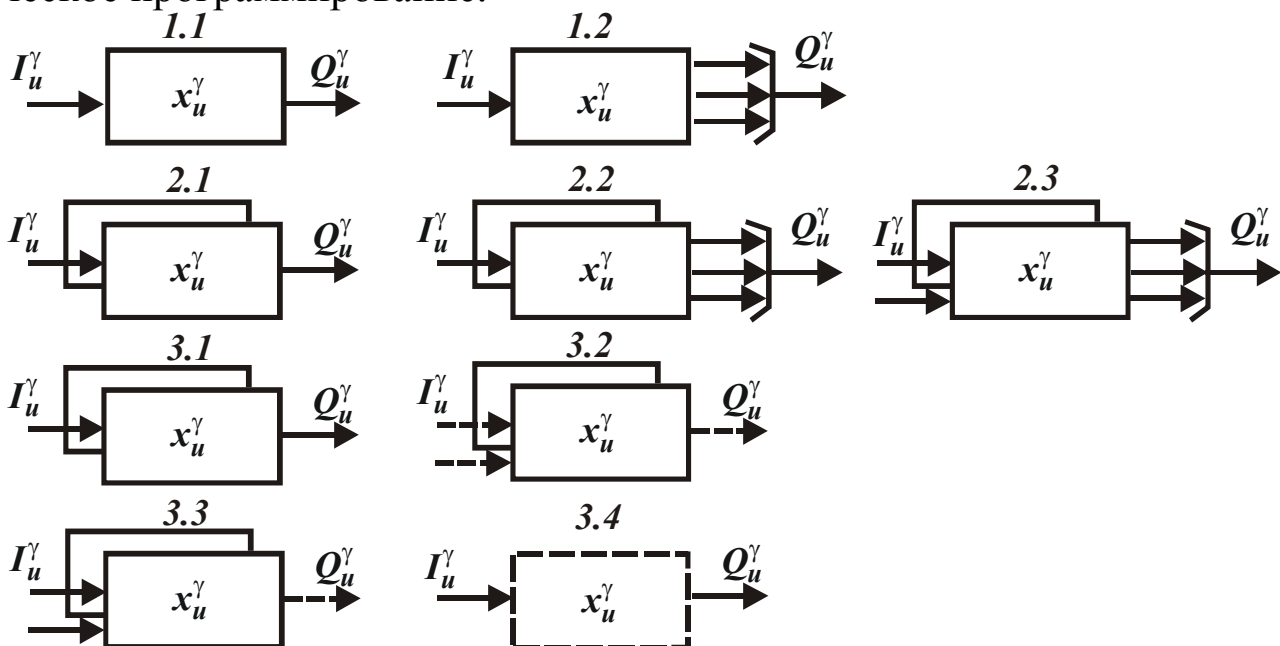


Рис.1.15. Схема методов автоматизации проектных работ: 1, 2, 3 – группы методов.

Ниже приводится описание ряда подсистем проектирования, иллюстрирующих приведенные схемы проектных работ.

### Подсистемы проектирования

**Информационно-поисковые подсистемы.** Существуют автоматизированные информационно-поисковые подсистемы, основанные на методе адресации и с прототипом. На рис.1.16 показан алгоритм адресации обрабатываемой детали к тому или иному ТП.

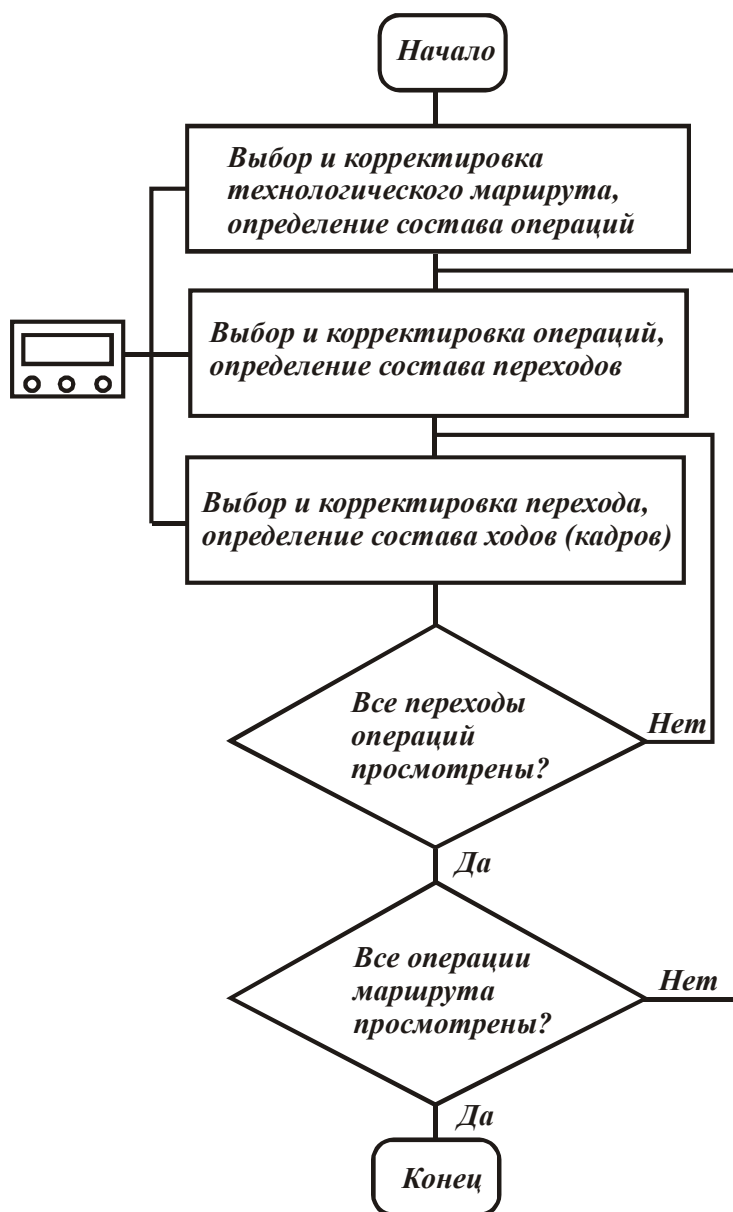


Рис.1.16. Алгоритм проектирования ТП методом адресации.

Проектирование включает разработку технологического маршрута, операции и перехода. При этом для адресации детали к тому или иному ТП необходимо, чтобы использовались унифицированные элементы (операции, переходы, рабочие и вспомогательные ходы).

Проектирование с прототипом позволяет максимально использовать накопленный предприятием опыт, но этот метод проектирования имеет отличительные особенности:

- 1) выбираемые прототипы не содержат всего состава элементов технологического процесса (операций, переходов, рабочих ходов), которые следует включать при изготовлении изделия;
- 2) синтезировать структуру ТП должен технолог-проектировщик в режиме диалога с ЭВМ;
- 3) БД должна иметь сведения не только о типовых и групповых ТП,

но и о единичных.

**Подсистемы на основе обобщенной структуры.** Принципиальная схема такой подсистемы показана на рис.1.9. При технологическом проектировании, как было сказано выше, получил распространение метод структурного синтеза, основанный на использовании типовых решений и относящийся к методам выделения варианта из обобщенной структуры.

Работа по типизации ТП является базой построения алгоритмов. В качестве основы используют типовые решения в сочетании с индивидуальными, учитывающими особенности предприятий и отдельных отраслей в машиностроении. Для данного класса (группы, подгруппы или вида деталей) устанавливают так называемый обобщенный маршрут обработки, характерный для определенного класса, подкласса или группы деталей. Этот перечень является упорядоченным и представляет собой множество существующих единичных маршрутов, которые имеют типовую последовательность и содержание, причем на уровне предприятия или отрасли отражают передовой производственный опыт.

Необходимое условие включения единичных маршрутов в обобщенный – наличие области пересечения операций, например, маршрутов  $M_i$  и  $M_j$  как непустого множества  $M_i \cap M_j \neq \emptyset$ .

Важной характеристикой (критерием оптимальности) формирования обобщенного маршрута является мощность пересечения множеств  $|M_{пер}|$  операций индивидуальных маршрутов [число одинаковых операций, входящих в это пересечение без учета отношения порядка элементов (операций) множества]:

$$|M_{пер}| = \bigcap_{i=1}^n M_i (i = 1, 2, \dots, n) \rightarrow \max ,$$

тогда мощность обобщенного маршрута должна стремиться к минимуму:

$$M_y^* = \bigcup_{i=1}^n M_i (i = 1, 2, \dots, n) \rightarrow \min .$$

Каждой операции обобщенного маршрута соответствует логическая функция. Она зависит от условий, учитывающих геометрические особенности поверхностей, вид заготовки, требуемую точность обработки, качество поверхностного слоя детали, размер партии, габариты деталей.



В общем случае логическая функция выбора  $k$ -й операции имеет вид

$$f_k = \left\{ \bigvee_{j=1}^{n_2} \left( \bigwedge_{i=1}^{n_1} A_i \right) \right\}_k,$$

где  $A_i$  – условие назначения операций;  $i = 1, 2, \dots, n_1$  – число условий, связанных конъюнкцией;  $j = 1, 2, \dots, n_2$  – число условий, связанных дизъюнкцией.

Тогда логическую функцию, определяющую обобщенный маршрут, можно представить в следующем виде:

$$\Phi = \bigvee_{k=1}^{n_3} \left\{ \bigvee_{j=1}^{n_2} \left( \bigwedge_{i=1}^{n_1} A_i \right) \right\}_k,$$

где  $k = 1, 2, \dots, n_3$  – число кодов  $C_k$  операций в обобщенном маршруте; код операции характеризует вид операции (токарные, фрезерные и т. д.) и особенности операции (например, обработка в центрах, патроне, люнете и т. д.).

Синтез индивидуальных технологических маршрутов осуществляется путем их выделения из обобщенного маршрута. Исходными данными для такого выделения являются условия, характерные для конкретной детали класса (группы). Обобщенный маршрут содержит логические функции, соответствующие каждой операции:

$$f_k = \left\{ \bigvee_{j=1}^{n_2} \left( \bigwedge_{i=1}^{n_1} A_i \right) \right\}_k,$$

где  $k = 1, 2, \dots, n_3$  – количество операций в обобщенном маршруте.

Схема алгоритма решения данной задачи представлена на рис.1.17.

Блок 1 вызывает обобщенный маршрут обработки деталей с кодами операций и логическими функциями  $f_k$ . Блок 2 осуществляет вызов условий, характерных для данной детали  $L^D$  (например, особенности геометрии, точность, качество поверхностного слоя, требования к контролю и др.). Блок 3 производит вызов  $k$ -й операции

обобщенного маршрута  $M_y^*$  с логической функцией  $f_k$ . Если логическая операция  $f_k = 1$ , то один из наборов логической функции  $f_k$  имеет вид

$$L_j = \left( \begin{array}{c} n_1 \\ \wedge A_i \\ i=1 \end{array} \right)_j = L^D.$$

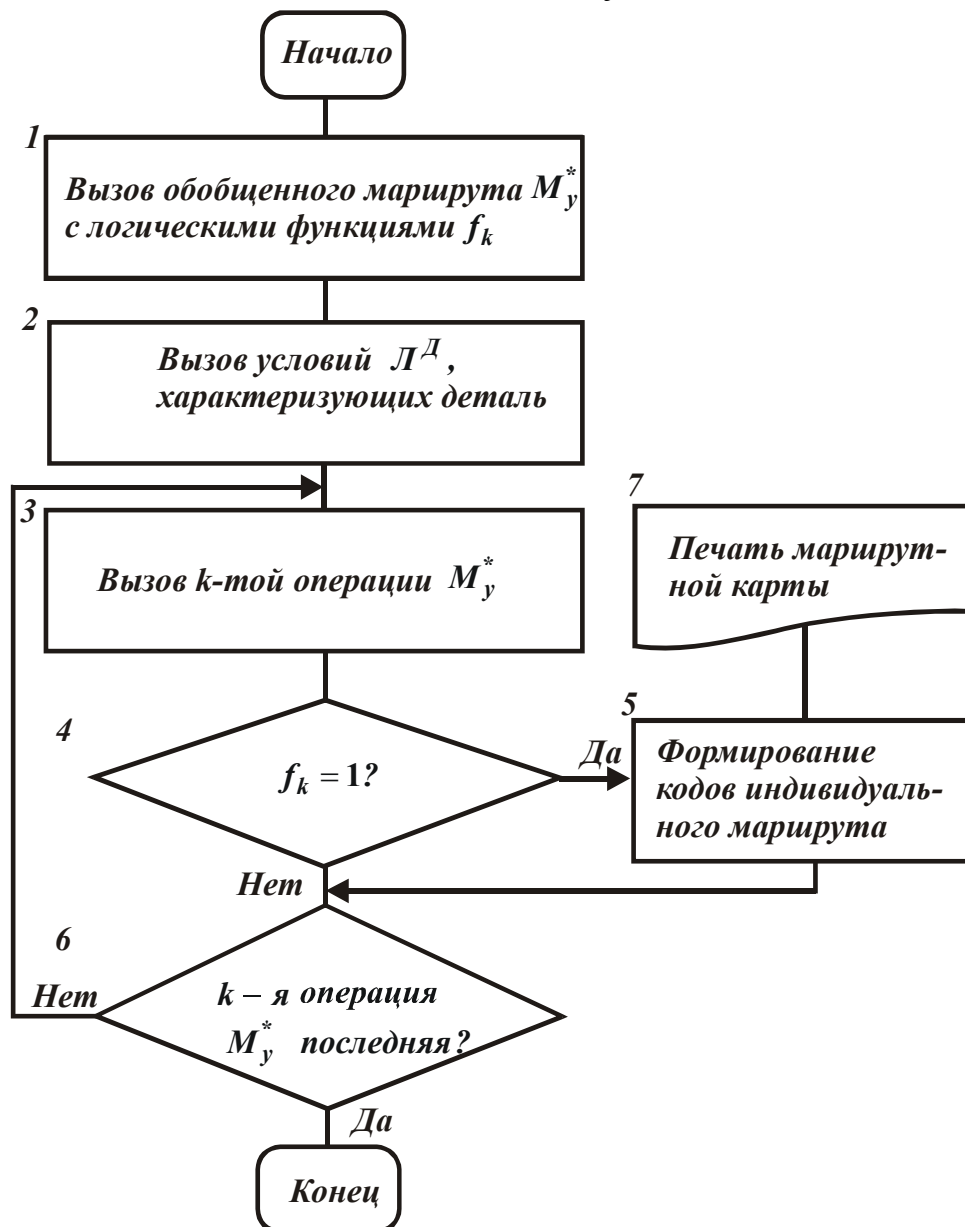


Рис.1.17.Алгоритм синтеза маршрутов.

Если  $f_k = 1$ , то из блока 5 дается команда на вызов следующей операции обобщенного маршрута  $M_y^*$  до тех пор, пока не будут просмотрены все операции  $M_y^*$ .

**Подсистемы на основе многоуровневого итерационного синтеза.** Такие подсистемы основаны на производственном опыте, знаниях технолога и экспертных оценках.

Автоматизация проектирования единичных ТП относится к классу наиболее сложных задач. Для их решения используют методы синтеза ТП, представляющие многоуровневый итерационный (пошаговый) процесс. Среди этих методов выделяют синтез на основе типовых проектных решений, на основе поиска оригинальных проектных решений; типовых и оригинальных решений. В данном разделе рассмотрен ряд подходов к решению задачи проектирования единичных технологических процессов на основе метода синтеза ТП. В соответствии с выбором поверхности в качестве базового структурного элемента детали общая функция ТП расчленена на совокупность подфункций планов обработки отдельных поверхностей  $A = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ , описываемых следующими преобразованиями:

$$\lambda_{\Pi}^0 : Z_1(\varepsilon_1^0) \rightarrow \Pi_1(\varepsilon_1^k);$$

$$\dots\dots\dots$$

$$\lambda_{\Pi}^n : Z_n(\varepsilon_n^0) \rightarrow \Pi_n(\varepsilon_n^k),$$

где  $\lambda_{\Pi}^0, \dots, \lambda_{\Pi}^n$  – планы обработки поверхностей детали;  $Z_1(\varepsilon_1^0), \dots, Z_n(\varepsilon_n^0)$  – параметры обрабатываемых поверхностей в заготовке;  $\Pi_1(\varepsilon_1^k), \dots, \Pi_n(\varepsilon_n^k)$  – точностные параметры и физико-механические свойства поверхности детали по чертежу.

Тогда функциональные модели маршрутов обработки поверхностей детали примут вид:

$$Z_1(\varepsilon_1^0)M_1\Pi_1(\varepsilon_1^1)\dots M_1\Pi_1(\varepsilon_1^k);$$

$$\dots\dots\dots$$

$$Z_1(\varepsilon_n^0)M_c\Pi_n(\varepsilon_n^1)\dots M_q\Pi_n(\varepsilon_n^k),$$

где  $M_1, \dots, M_c, \dots, M_1, \dots, M_q$  – методы обработки поверхности детали.

Граф  $H = (C, \mu)$  возможных вариантов маршрутов (рис.1.18) содержит вершины  $C_i$ , в которые может входить несколько дуг  $\mu_j$  (вершина  $C_{2n}$ ). Это означает, что два метода обработки характеризуются одинаковыми точностными параметрами промежуточных состояний: от начального (индекс 0) до конечного (индекс  $k$ ).

Любой путь на графе из  $C_0$  в  $C_k$  является одним из вариантов маршрута (плана) обработки поверхности. Дуги графа  $\mu_j$  характе-

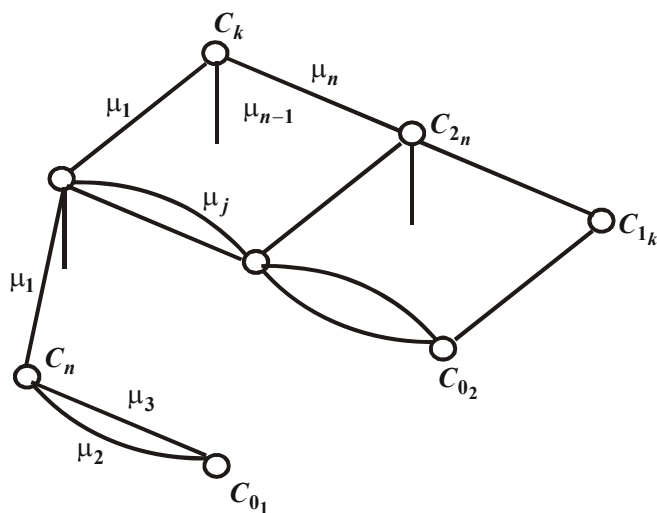


Рис. 1.18. Граф возможных вариантов маршрутов обработки поверхностей.

ризируют технологическое преобразование поверхности с помощью метода  $M_i$  из предшествующего состояния  $C_{i-1}$  в состояние  $C_i$ , с более высокими значениями точностных параметров или физико-механических свойств.

Далее происходит синтез этапов ТП (укрупненных операций) и морфологической структуры – операций ТП с привязкой конкретного оборудования, приспособле-

ния и инструмента.

Возможна обратная последовательность проектирования от плана и последовательности обработки поверхности к проектированию перехода операции и маршрута изготовления детали.

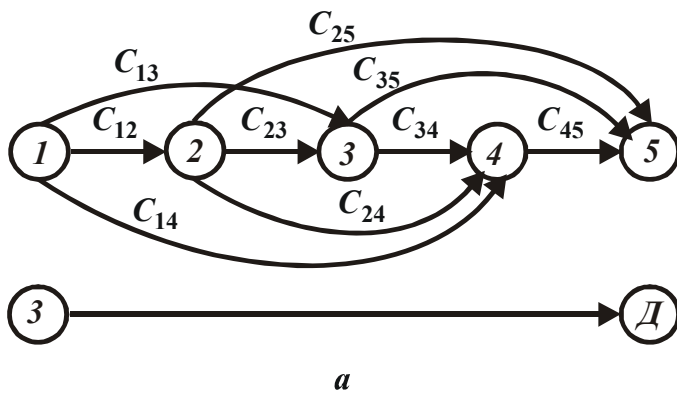
Рассмотрим подробнее основные этапы проектирования.

В состав исходной информации входят:

- общая характеристика детали и заготовки;
- описание геометрии и точности детали;
- технические требования.

На первом этапе проектируются планы обработки поверхностей. Для достижения заданных чертежом размеров и технических требований все поверхности детали проходят несколько стадий обработки, преобразующих ее из состояния заготовки в состояние готовой поверхности. Если предположить, что поверхность заготовки можно обработать не одним способом, то решение задачи можно представить в виде сети, изображенной на рис.1.19,а. Цифрами на рисунке обозначены различные состояния поверхности, начиная от заготовки 3 и кончая готовой поверхностью Д. Дугами показаны возможные пути перехода из одного промежуточного состояния в другое; через  $C_{ij}$  обозначены затраты, связанные с изменением состояния поверхности.

Представим сетевую модель ТП обработки в виде матрицы поверхности (рис.1.19,б). На пересечении соответствующих строк и столбцов записывают стоимость технологических переходов для однопроводной обработки из состояния заготовки в состояние обрабо-



i	j				
	1	2	3	4	5
1		$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$
2			$C_{23}$	$C_{24}$	$C_{25}$
3				$C_{34}$	$C_{35}$
4					$C_{45}$
5					

Рис.1.19. Граф сетевой модели обработки поверхностей (а) и матрица сетевой модели (б).

танной поверхности. Для каждой отдельной поверхности формируется совокупность матриц, характеризующих каждый метод обработки, применимый для данной поверхности. Совокупность матриц для поверхности детали содержит все множество планов обработки данной поверхности.

Результатом выполнения каждой стадии (за исключением последней) является некоторое промежуточное состояние обрабатываемой заготовки.

Формирование стадий осуществляется на основе теории «наращивания точности», т.е. сначала необходимо достичь «одного

уровня точности» основных поверхностей, затем начинать их повторную обработку, стремясь к следующему «уровню точности» до тех пор, пока не будут обеспечены точностные требования чертежа детали.

Дальнейшее проектирование ТП ведется в пределах каждой стадии, т.е. определяется структура операции. Проектирование операции осуществляется в несколько этапов. Сначала из множества вариантов, описываемых графом последовательности обработки, выбирают те, которые обеспечивают получение точностных требований чертежа деталей. Затем для каждого из выбранных вариантов формируют все возможные структуры операций. И в заключение из множества структур операций выбирают те, которые соответствуют производственным условиям и обеспечивают наибольший экономический эффект.

**Подсистемы проектирования на основе преобразования описания детали в описание технологического процесса.** Для развития

структурного синтеза предлагается проектирование структур ТП осуществлять поэтапным преобразованием описания изделия в описание технологического процесса изготовления этого изделия, которое можно представить как  $S_{\partial} : A \rightarrow S_{ТП}$ , где  $A$  – алгоритм проектирования;  $S_{\partial}$  – информационная модель структуры детали;  $S_{ТП}$  – информационная модель структуры ТП.

Данное преобразование осуществляется в несколько этапов. На первом этапе объект проектирования подвергается декомпозиции на элементы – обрабатываемые поверхности, которые классифицируют с помощью эвристических правил по уровням конструктивно-технологической структуры детали. Предлагаемые уровни структуры детали определяют потенциальные возможности объединения поверхностей для их совместной обработки.

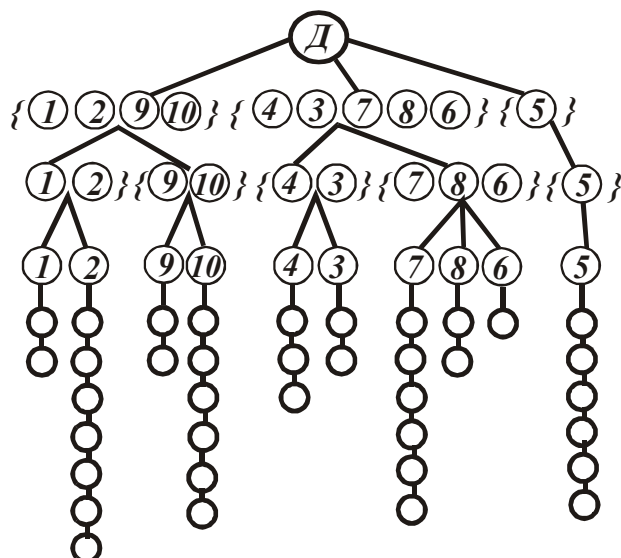
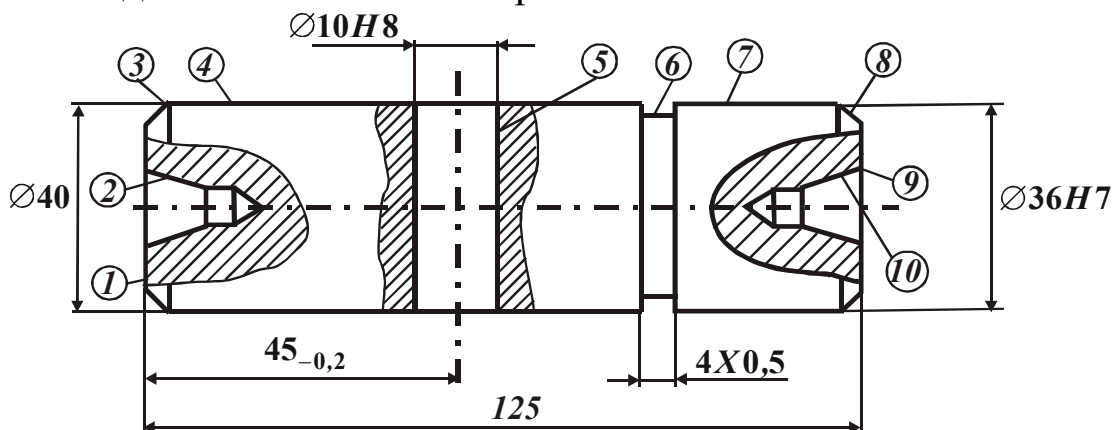


Рис.1.20. Пример определения конструктивно-технологической структуры детали.

Множество поверхностей разбивается на ряд подмножеств – комплекты. В один комплект объединяют поверхности, которые

можно обработать при одном виде движения детали и одних технологических базах. Полученные подмножества разбиваются на группы-комплексы соответственно расположению по сторонам детали. В результате последующих операций классификации по форме, размерам поверхностей и взаимному расположению – на подгруппы-совокупности, комбинации и отдельные поверхности.

Конструктивно-технологическая структура детали представляет информационную модель структуры детали, по описанию которой можно восстановить чертеж детали с достаточной степенью достоверности. По результатам проведенной классификации структуры детали можно представить в виде граф-дерева  $D = (S, r)$ , где вершины – элементы предполагаемых структурных уровней, а ребра – отношения порядка между ними типа «выполнить решение» (рис.1.20)

В результате проведенных операций формируется исходная предполагаемая структура ТП, содержащая всю необходимую и достаточную информацию для осуществления процесса отображения предполагаемой структуры на множестве проектных решений (рис.1.21), которая служит объектом оптимизации при проектировании реальной структуры ТП, так как реальная последовательность обработки может отличаться от предполагаемой. Это отличие является функцией решений в процессе проектирования и может принимать формы концентрации и совмещения в пространстве и времени процессов получения отдельных поверхностей.

Отличительной чертой рассматриваемого подхода является то, что объектом анализа для поиска и выбора проектных решений служит не деталь и не отдельные поверхности, а наборы поверхностей одного комплекса. Это позволяет сократить число возможных сочетаний методов обработки для поверхностей одного набора, что в свою очередь сокращает число альтернативных решений.

Вторым отличием является способ организации информационной базы единиц проектных решений. Единицы решений связаны не с деталью, а с отдельными поверхностями, из которых может быть синтезирована структура детали любой конфигурации.

Типовыми элементами информационной структуры ТП служат информационные единицы проектных решений:

- для уровня переходов – номер и содержание перехода, обозначение обрабатываемой поверхности, выдерживаемый размер;
- для уровня операции – код, номер и наименование операции, типоразмер, обозначение оборудования и др.;

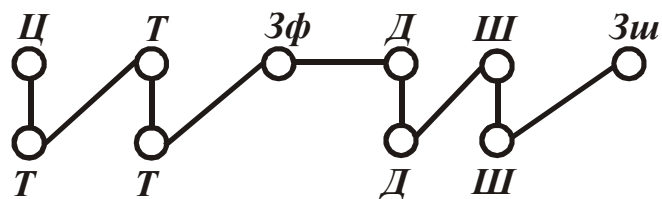
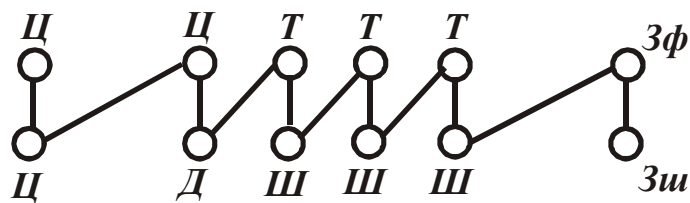
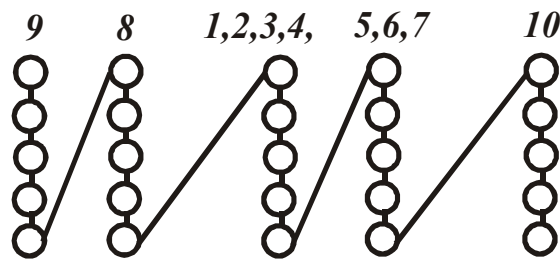
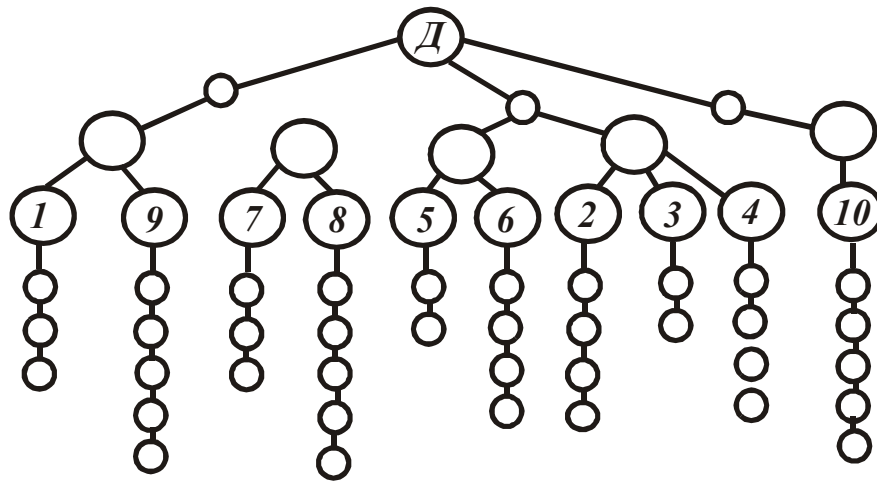
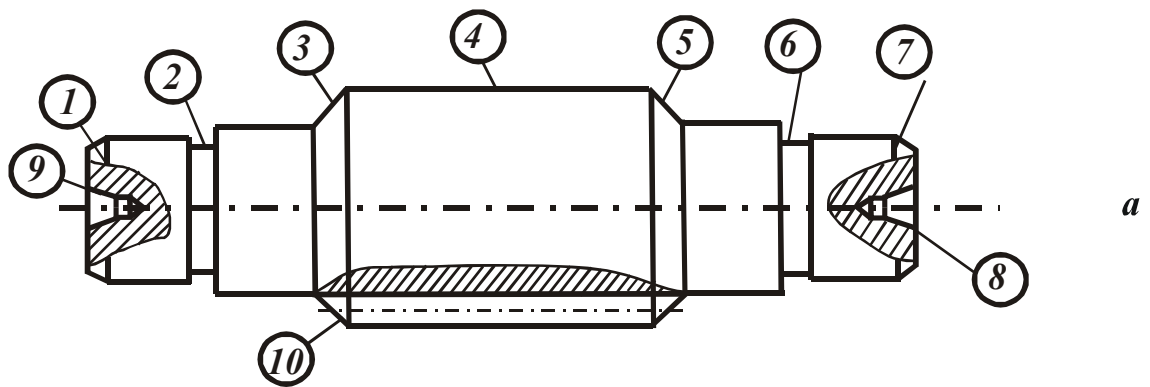


Рис.1.21. Синтез укрупненного маршрута обработки: деталь (а); конструктивно-технологическая структура детали (б); функциональная структура маршрута (в); морфологическая структура маршрута (г); структура укрупненного маршрута изготовления детали (д).



– для уровня маршрута обработки – наименование и обозначение детали, материал заготовки и другие общие сведения о детали, заготовке и перечне операций.

Выбор проектных решений заключается в поиске допустимой области существования решений для всех поверхностей набора, выборе среди них альтернативных и оптимального решений по критерию максимальной производительности или себестоимости при достижении заданной точности.

Единицы проектных решений выбирают по таблицам нормативно-справочной информации в такой последовательности: поиск единиц, характеризующих тип и типоразмер оборудования; специальных и нормализованных приспособлений; режущего и вспомогательного инструментов; методов обработки и содержания технологических переходов. При этом выбор оборудования предшествует выбору методов обработки, что дополнительно сокращает число конкурентоспособных вариантов.

По мере выполнения процедур проектирования и выбора единиц решений осуществляется направленное совершенствование структуры информационной модели ТП. Этот процесс затрагивает изменение расположения элементов решений относительно предварительно намеченной структуры, что соответствует последовательному уточнению расположения элементов ТП во времени и пространстве (рис.1.22).

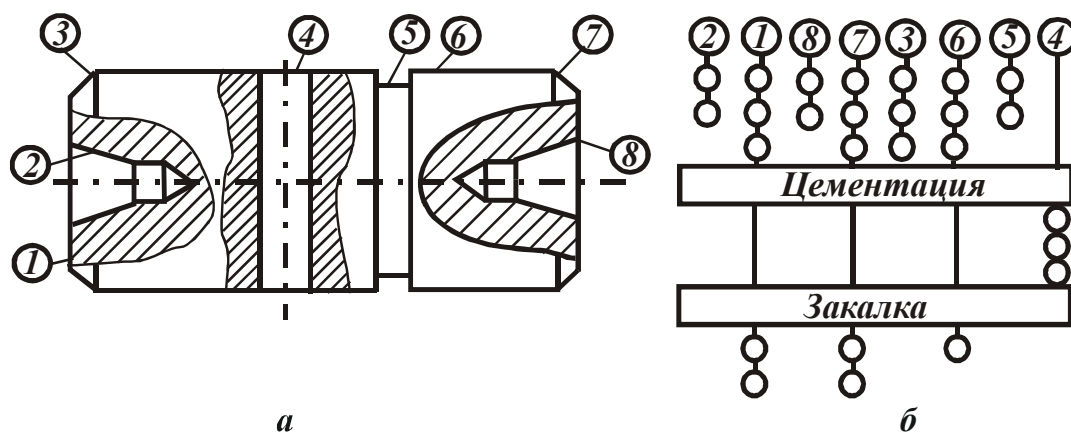


Рис. 1.22. Структурные преобразования маршрута изготовления детали: деталь (а); изменение структуры маршрута при включении операций технической обработки (б).

Согласно рис.1.22 упорядочение операций в маршруте изготовления детали имеет вид:

10 Фрезерно-центральная  
20 Токарная  
30 Химико-термическая  
40 Сверлильная  
50 Слесарная

55 Контрольная  
60 Термическая  
70 Доводочная  
80 Шлифовальная  
85 Контрольная.

Синтез сложных решений осуществляется в соответствии с эвристическими правилами упорядочения проектных решений. На уровне операции упорядочение предусматривает три уровня принятия решений:

- формирование совокупности инструментальных переходов;
- поиск оптимальной последовательности выполнения переходов при изготовлении детали на станке;
- окончательное формирование структуры операции с учетом возможных совмещений и концентрации переходов.

Последовательность окончательно сформированных структур операций образует маршрут обработки, который уточняется по результатам выбора оснастки и инструментов в сторону уменьшения количества операций.

Проектирование завершается синтезом информационной модели структуры ТП, удовлетворяющей совокупности исходных ограничений и наилучшей с точки зрения выбранного критерия предпочтения.

Полученная структура используется как базовая для параметрической оптимизации. Такой подход к проектированию структур процессов инвариантен по отношению к объектам проектирования, что позволяет использовать его для проектирования как деталей типа тел вращения, так и корпусных деталей. При этом, возможно проектировать также типовые и групповые структуры при условии, что в качестве исходных будет описание комплексной детали.

**Подсистема проектирования на основе эвристического программирования.** Проектирование ТП в первую очередь предполагает синтез его структуры. Под структурой ТП механической обработки будем понимать частично упорядоченную последовательность технологических установов, обеспечивающую полную обработку данной детали, т.е. порядок обработки поверхностей с указанием соответствующих технологических баз. Частичная упорядоченность отражает то, что некоторые установы могут объединяться в одной технологической операции исходя из общности применяемого оборудования и схем базирования. В общем случае это синтез структуры ТП, опре-

деление состава его элементов (установов), технологических связей между ними (технологической топологии) и средств технической реализации (состав технологического оборудования).

На начальном этапе проектирования ТП изготавливаемая деталь рассматривается как совокупность ее элементарных поверхностей (рис.1.23). На основании анализа требований к точности и качеству получения поверхности детали назначают планы обработки каждой поверхности, которая заменяется набором поверхностей, отражающих различные стадии ее обработки. При этом в мысленном представлении технолога-проектировщика формируется образ не одной детали, а системы деталей, отвечающих различным стадиям обработки детали в целом.

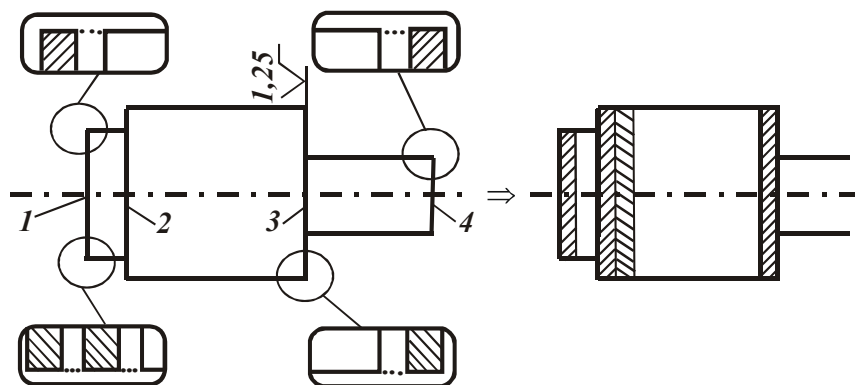


Рис. 1.23. Схема анализа чертежа детали (заштрихованные участки – припуски); 1–4 – обрабатываемые поверхности.

Для каждого этапа на основании анализа размерно-точностных взаимосвязей между конечными состояниями поверхностей (для окончательного этапа обработки соответствующих готовой детали) и свойствами поверхностей, явля-

ющимися технологическими базами, определяется порядок обработки поверхностей детали. В итоге формируется упорядоченная последовательность технологических установов. При этом используются следующие эмпирические правила:

- поверхности должны обрабатываться в последовательности, обратной степени их точности;
- поверхность должна быть обработана до ее использования в качестве технологической базы и т. п.

В основе механизма выработки варианта проектного решения лежит отражение объекта производства в мышлении проектировщика. Порядок обработки поверхностей устанавливается в результате «проигрывания» различных действий в текущей проектной ситуации, соответствующей конкретной стадии обработки детали, и опреде-

ления возможных будущих ситуаций.

На основании полученного порядка обработки поверхностей строится геометрическая схема ТП и осуществляется анализ соблюдения допусков на выполняемые размеры, расчет припусков на обработку (с проверкой соответствия их значений выбранным методам обработки) и операционных размеров. Выбирается технологическое оборудование. При удовлетворительных результатах анализа полученное проектное решение принимается. В противном случае после корректировки исходной гипотезы, например, введением дополнительной обработки некоторых поверхностей, синтезируется новый вариант структуры. В заключение окончательно формируются технологические операции при объединении соответствующих установов.

Из вышесказанного следует, что процесс выработки технологом-проектировщиком варианта проектного решения состоит из последовательных действий по выдвижению взаимоисключающих альтернатив, их оценки и собственно выбора. Задача решается одновременно на двух уровнях: выдвижения гипотезы решения задачи и подтверждения этой гипотезы. Синтез лучшего в некотором смысле варианта структуры или первого работоспособного варианта осуществляется методом перебора. При этом перебор является не комбинаторным, т. е. не проверяются все возможные альтернативные варианты, а направленным.

Это достигается как за счет использования общих знаний проблемной среды, так и за счет использования «внутренней» модели проблемной ситуации. На основании информации, содержащейся в размерно-точностных отношениях, конструктивно-геометрических свойствах детали на различных стадиях ее обработки и эвристических методах, технолог прослеживает в своем мышлении всю эволюцию детали в процессе ее изготовления. Он отбрасывает заранее неприемлемые варианты и тем самым сужает пространство поиска. При этом решение находится за меньшее число шагов, чем потребовалось бы при полном переборе.

В основе эвристического программирования также лежит принцип сокращения области поиска по сравнению с алгоритмическими методами. Результаты приведенного анализа интеллектуальной деятельности технолога-проектировщика положены в основу методики автоматизированного проектирования ТП механической обработки, использованной при создании эвристической программы оптимального структурного синтеза.

### 1.2.8. ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОСТИ ПОДСИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТП

Повышение интеллектуальности подсистем проектирования осуществляется использованием эвристического программирования (см. параграф 1.2.7) экспертных систем, переходом от режима диалога к пакетному режиму более высокого уровня.

Одно из требований автоматизированного проектирования в режиме диалога состоит в максимальном освобождении технолога-проектировщика от рутинных работ, требующих каких-либо вычислений или количественных оценок проектных ситуаций. В процессе проектирования технолог-проектировщик задает информацию о полезности следствий. Эта информация для сокращения числа целесообразных альтернатив и отбрасывания неприемлемых обрабатывается ЭВМ. Проектировщик, принимающий решение, анализирует результаты расчета на ЭВМ и отбирает рациональные (с его точки зрения) альтернативы, а если необходимо, то осуществляет дальнейшую детализацию альтернатив и возникающих из них следствий. Под полезностью понимают обобщенную оценку альтернативы, описывающую ее пригодность для дальнейшего проектирования и легкость реализации. Эту оценку дает технолог-проектировщик. Полезность следствия обозначают через  $P_{ij}$ , где  $i$  – условный номер альтернативы,  $j$  – номер следствия данной  $i$ -й альтернативы. Для освобождения технолога-проектировщика от количественной оценки альтернатив (следствий) используют несколько способов задания оценок полезностей. Например, проводят простое ранжирование следствий или полезности альтернатив, сравнивают их между собой качественно, используя отношения типа «больше – меньше», «хуже – лучше», которые технолог-проектировщик может задавать знаками ">", "<".

Например, на этапе выбора модели многошпиндельного токарного пруткового автомата может сложиться следующая ситуация: для обработки втулки используют либо прутки, либо толстостенную трубу. Заготовку можно обработать на трех разных моделях автоматов. Следовательно, имеются две альтернативы и по три следствия из каждой. Для первой альтернативы необходимо получить полезность следствия  $P_{11}, P_{12}, P_{13}$ ; для второй –  $P_{21}, P_{22}, P_{23}$ . Задача состоит в нахождении доверительного интервала для каждого значения  $P_{ij}$ .

Если ввести условие

$$\sum_{j=1}^n \Pi_{ij} = 1,$$

где  $n$  – число следствий из  $i$ -й альтернативы, то определение доверительного интервала сводится к нахождению верхней и нижней границ оценки полезности следствий (альтернатив), т. е. к нахождению  $\Pi_{ij}^+$  и  $\Pi_{ij}^-$  соответственно.

Допустим, что технолог-проектировщик задал отношение между следствиями в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Pi_{11} &< \Pi_{12}; \\ \Pi_{13} &< \Pi_{12} < \Pi_{23}; \\ \Pi_{23} &< \Pi_{11}; \\ \Pi_{22} &< \Pi_{11}. \end{aligned}$$

Вводят ограничения и преобразуют эти выражения:

$$\begin{aligned} \Pi_{11} - \Pi_{12} &< 0; \\ \Pi_{13} - \Pi_{12} &< 0; \\ \Pi_{12} - \Pi_{23} &< 0; \\ \Pi_{23} - \Pi_{11} &< 0; \\ \Pi_{22} - \Pi_{11} &> 0; \\ \Pi_{11} + \Pi_{12} + \Pi_{13} &= 1; \\ \Pi_{21} + \Pi_{22} + \Pi_{23} &= 1. \end{aligned}$$

Подобную задачу сводят к задаче линейного программирования:

$$\begin{aligned} Z &= g^1 x_1 + g^2 x_2 + \dots + g^j x_j + \dots + g^n x_n \rightarrow \min; \\ a_1^1 x_1 + a_2^2 x_2 + \dots + a_j^j x_j + \dots + a_m^n x_n &> b_i \text{ при } i = \overline{1, s}; \\ a_1^1 x_1 + a_2^2 x_2 + \dots + a_j^j x_j + \dots + a_m^n x_n &= b_i \text{ при } i = \overline{s+1, m}, \end{aligned}$$

где при всех  $i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n$  вещественные числа;  $g^j, b_i$  и  $a_j^j$ , заданы, а неизвестные  $x_j$  подлежат определению.

Для перехода от режима диалога к пакетному режиму более высокого уровня формируют обучающие выборки. Составляют матрицу  $A$  «признак – значение». Элемент матрицы  $A_{ij}$  соответствует  $i$ -му значению  $j$ -го признака,  $i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$ ; (где  $m$  – максимальное число значений, принимаемых  $j$ -м признаком,  $n$  – число признаков).

Тогда

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & \dots & A_{1j} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & \dots & A_{2j} & \dots & A_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{i1} & A_{i2} & A_{i3} & \dots & A_{ij} & \dots & A_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{m1} & A_{m2} & A_{m3} & \dots & A_{mj} & \dots & A_{mn} \end{bmatrix}.$$

С помощью матрицы  $A$  можно описывать любые объекты или ситуации. Разница будет состоять в числе признаков, описывающих объект (ситуацию), и в количествах значений каждого признака.

Матрицу  $S$ , полученную добавлением матрицы  $A$  к матрице «нуль-единичного» столба, называют полной формой понятия:

$$S = [A] \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_i \\ \dots \\ F_m \end{bmatrix},$$

где  $F_i = 1$  – объект (ситуация), описываемый  $i$ -й строкой матрицы  $A$ , является положительным событием;  $F_i = 0$  – в противном случае.

Чтобы заполнить матрицу  $S$ , следует рассмотреть большое количество вариантов комбинаций значений  $N$  и классифицировать полученные комбинации  $N = \prod_{i=1}^n m_i$ . Матрицу  $S$  строят на основе

обучающей выборки. Основной задачей построения обучающей выборки является определение существенных признаков, описывающих объект, и нахождение количества значений, которые может принимать каждый признак объекта.

Как показали исследования, многие технологи-проектировщики при опросе не могли четко сформулировать причины выбора одной альтернативы из некоторого количества предлагаемых. Причем признаки, по которым определялся объект (например, комплекс элементарных обрабатываемых поверхностей), для разных технологов-проектировщиков были неодинаковыми. Поэтому задачу выделения существенных признаков, описывающих объект, следует возлагать на

технолога-проектировщика, работающего по методам САПР.

Однако на многих этапах проектирования возникает задача отнесения объекта не к одному из двух классов, а из нескольких (например, при отнесении комбинаций поверхностей к одному из шести комплексов элементарных обрабатываемых поверхностей). В данном случае к матрице  $A$  добавляется не «нуль-единичный» столбец, а столбец, в котором  $F_i$ , принимает значения  $F_i = \overline{1, k}$ , где  $k$  – номер класса объекта, к которому относится классифицируемый объект, или  $F_i = 0$ , если объект не был отнесен ни к одному из классов. Значения признаков, оценивающих объект в процессе диалога технолога-проектировщика с ЭВМ, накапливаются на магнитном диске. Каждому набору  $i$ -го значения признаков ставится в соответствие  $F_i$ , относящее этот объект к классу, определяемому технологом-проектировщиком.

Области распределения положительных и отрицательных объектов не должны пересекаться, иначе могут быть ошибки. Влияние подобных ошибок на качество проектируемой наладки снижается за счет одновременного проектирования нескольких наладок и ведет к увеличению их числа.

Для оценки степени обученности системы используется экзамен на контролируемой группе объектов, который можно применить для постепенного перехода от режима диалога к новому уровню пакетного режима.

Степень обученности системы оценивается следующими показателями:

$$p = \frac{n^+ + n^-}{N} - \text{частота ошибок при оценке степени обученности}$$

системы;

$$p^+ = \frac{n^+}{N^+}; p^- = \frac{n^-}{N^-} - \text{частота ошибок при распознавании поло-}$$

жительных и отрицательных объектов,

где  $N$  – число контрольных объектов, используемых для оценки степени обученности системы;  $N^+, N^-$  – число положительных и отрицательных объектов;  $n^+, n^-$  – число ошибок при распознавании положительных и отрицательных объектов.

Экспериментальное определение величины обучающей выборки проводили для этапа расчленения поверхности детали на комплексы



элементарных обрабатываемых поверхностей. Нужно было сформировать понятие «комплекс поверхностей, который можно обработать проходными резцами».

Были выделены следующие признаки, описывающие подобный комплекс поверхностей:

- 1) вид поверхностей, вошедших в комплекс;
- 2) последовательность диаметров поверхностей, начиная с левой стороны;
- 3) положение поверхностей, вошедших в комплекс;
- 4) допустимость обработки этих поверхностей;
- 5) наличие требования «притупить острые кромки»;
- 6) вид заготовки.

Первый признак мог принимать восемь значений, второй – три, четвертый – два, пятый – два и шестой – три значения.

Понятие, которое необходимо было сформировать с помощью программы «ПАРК», имело следующий вид:

$$(1^1 \vee 6^1) \wedge 2^2 \wedge (3^3 \vee (1^3 \wedge 1^4)) \wedge 2^5 \wedge (1^6 \vee 2^6 \vee 3^6),$$

где верхний индекс обозначает номер признака.

Составляли пять обучающих выборок, которые различались по числу входящих в них объектов и по соотношению входящих в них положительных и отрицательных объектов. Выборки составляли так, что первая была произвольной, а последующие формировались добавлением нескольких описаний объектов к предыдущей выборке, т. е. осуществлялся постепенный рост обучающей выборки.

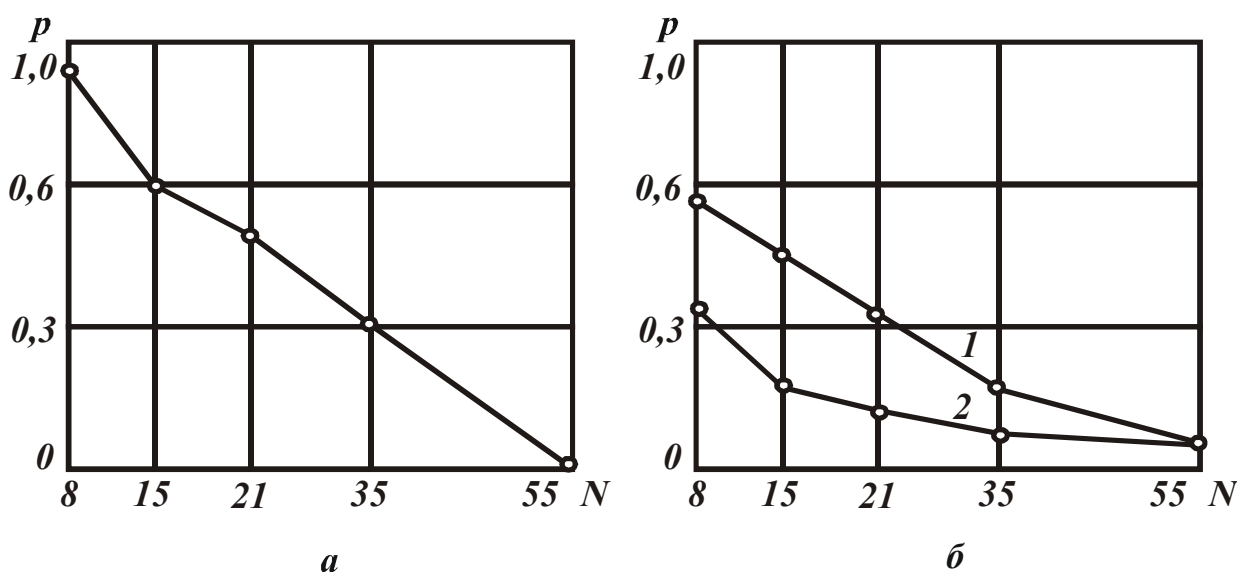


Рис.1.24. Зависимость частоты от величины обучающей выборки  $N$ : при оценке степени обученности системы (а); при распознавании положительных 1 и отрицательных 2 объектов (б);  $p$  – вероятность ошибки.

При обработке обучающих выборок на ЭВМ фиксировались показатели степени обученности и были получены зависимости этих показателей от величины обучающей выборки (рис.1.24). Эти зависимости имеют монотонно убывающий характер.

Таким образом, при переходе от диалогового режима проектирования к пакетному более высокого уровня степень обученности системы следует оценивать с помощью экзаменующей выборки непосредственно во время процесса проектирования. Обучающие выборки следует накапливать на внешних носителях информации и использовать по мере накопления этих выборок.

При достижении показателя степени обученности системы значений, удовлетворяющих технолога-проектировщика ( $p = 0,05...0,1$ ), следует переходить к пакетному режиму более высокого уровня.

### 1.2.9. РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Эффективность создания и эксплуатации автоматизированных производственных систем обеспечивается интеграцией отдельных автоматизированных систем: АСНИ, САПР К, САПР ТП (АСТПП), АСУТП, АСУ. За рубежом такие системы получили название CIM (Computer Integrated Manufacturing).

В качестве примера рассмотрим интегрированную автоматизированную систему проектирования ТП и АСУ ТП при изготовлении деталей на многопозиционных станках с ЧПУ. Вначале проектировался ТП и создавалась базовая управляющая программа. При изготовлении деталей возникали отказы, которые регистрировались. Проводился анализ производственной ситуации и автоматически принималось решение дальнейших действий (рис.1.25).

Управляющие программы строились таким образом, чтобы можно было исключить отдельные их фрагменты при возникновении различных отказов.

Например, для обработки стороны корпусной детали требуется обработать поверхности *А*, *Б*, *В*, *Г* восемью инструментами. На стадии технологического проектирования разрабатывается базовый ТП, представленный на рис.1.26 в виде графа.

Жирной линией показана цепь последовательности обработки поверхностей *А*, *Б*, *В*, *Г*, а также базовая управляющая программа. Происходит автоматическая оценка текущих производственных ситу-

аций. Модель эксперта предусматривает алгоритм выработки решений дальнейших действий в случае возникновения отказов.

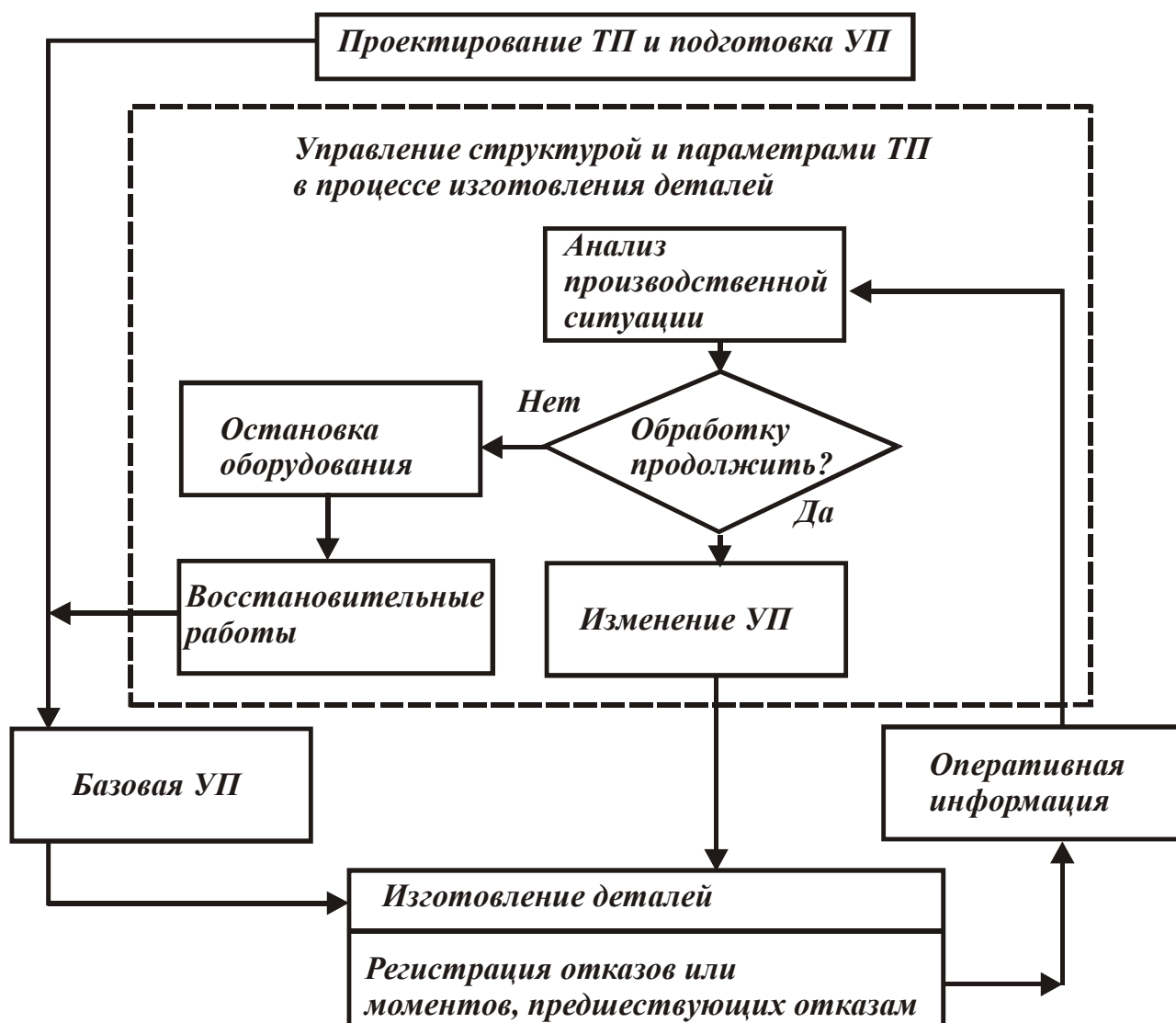


Рис.1.25. Схема функционирования интегрированной системы проектирования ТП – изготовление деталей на многопозиционном станке с ЧПУ.

Модель эксперта связана с машиной вывода, на которую также воздействует диагностическая или контролирующая система. В зависимости от сложившейся ситуации могут возникнуть различные решения для устранения возникающих отказов или их обхода.

Если процесс обработки проходит нормально (по базовому ТП), то булев вектор выполнения переходов имеет вид  $S1 = \langle 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1 \rangle$ .

При возникновении отказов возможны следующие ситуации:

1. Замена инструмента на дублирующий (например, инструмента 3, как показано на рис. 1.26). Тогда булев вектор  $S2 =$

- $\langle 1,1,1,1,1,1,1,1 \rangle$ .
2. Замена инструмента 5 на эквивалентный 5' с изменением режима резания (подачи и скорости резания) (рис. 1.26). Булев вектор  $C3 = \langle 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1 \rangle$ .
  3. Поломка инструмента 7 (тело инструмента осталось в отверстии). Переходы 7 и 8 пропускаются и запоминаются. Булев вектор  $C4 = \langle 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0 \rangle$ .
  4. Выполнение доделочных переходов 7 и 8 в другую смену. Булев вектор  $C5 = \langle 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1 \rangle$ .
  5. Отказ технологической системы остановки оборудования. Булев вектор  $C6 = \langle 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 \rangle$ .

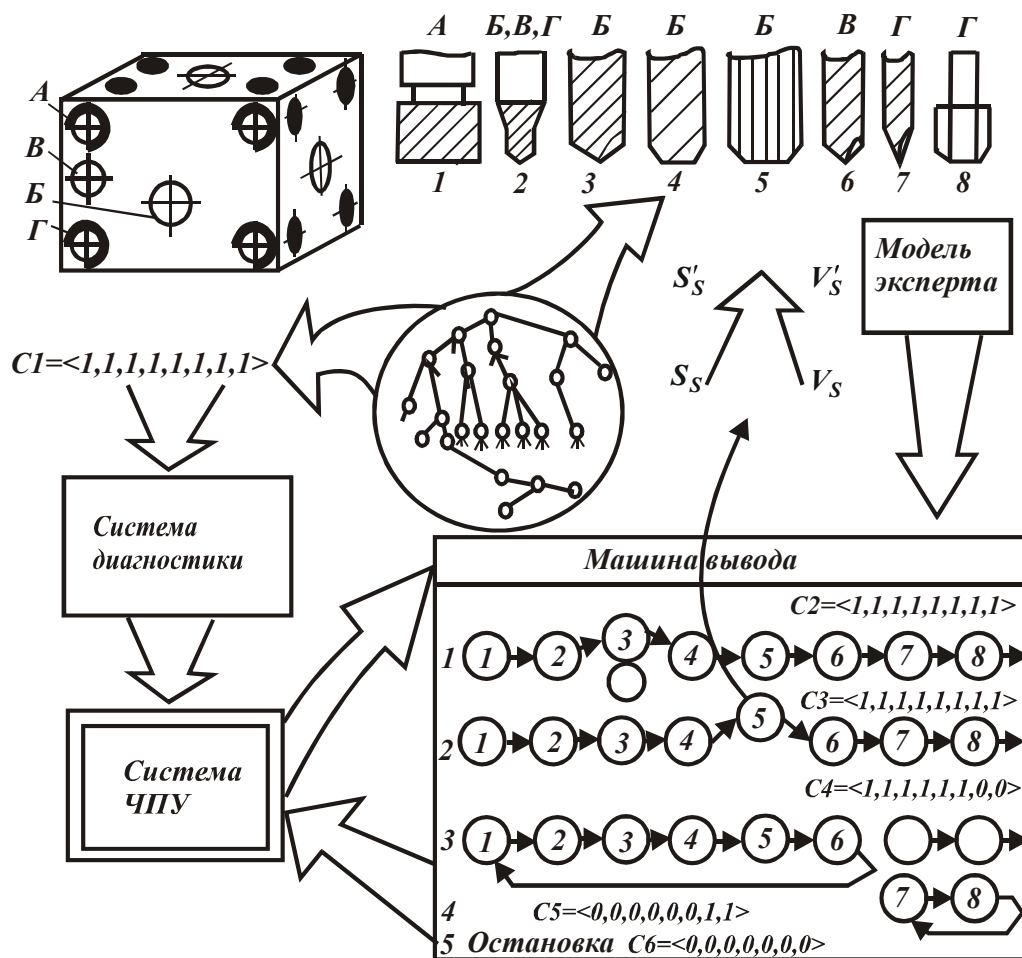


Рис. 1.26. Алгоритм и процедуры принятия решений.

Модульные структуры управляющих программ в банке данных (БД) формируются с помощью интерпретатора. Получаемая реакция от системы диагностики или контроля воздействует на УП. Происходит корректирующее воздействие.

Основой для объединения различных по назначению автоматизированных систем в комплексное автоматизированное производство

является общность стратегии создания систем и применение для разработки составляющих их подсистем и основных средств обеспечения инструментальных средств.

Дальнейшее развитие САПР связывается с интенсивным развитием НИОКР в области компьютерных технологий, созданием компьютерных виртуальных конструкций, технологии, оснастки, инструментов, производств, что приведет к значительному ускорению освоения выпуска новых изделий. Использование методов промышленной логистики дает возможность на стадии проектирования минимизировать издержки на освоение новой продукции.

Методология проектирования собственной продукции, а также специальное программное обеспечение относится к категории «ноу-хау» и будет составлять коммерческую тайну предприятия. Поэтому использование инвариантных систем проектирования, поставляемых зарубежными фирмами, будет иметь ограниченный характер, так как они не обеспечивают резкое повышение качества продукции. Получение экономической отдачи от вложенных средств в компьютерные технологии проектирования и производства будет требовать от предприятий поэтапного и системного подхода к проведению работ по компьютеризации, созданию определенной «критической массы» специализированного программного продукта, обеспечивающего окупаемость производственных затрат и получение прибыли.

Предпочтительны будут интеллектуальные системы. Основой для создания таких САПР является искусственный интеллект на базе эвристического программирования. В этом случае значимы эвристики, основанные на дальнейшем развитии научных основ технологии машиностроения, в частности на создании теории и практики принятия решений, в том числе формализованных.

Дальнейшее развитие САПР связано с глобальными процессами информатизации и компьютеризации, что открывает широкие возможности повышения эффективности в машиностроении. Эти возможности стали реальностью в развивающейся совокупности методов и средств *CALS*-технологий, представленных в серии международных стандартов.

## ГЛАВА 2

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

### 2.1. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Автоматизированная система технологической подготовки производства (АСТПП) – это система ТПП, основу организации которой составляет системное применение средств автоматизации инженерно-технических работ, обеспечивающее оптимальное взаимодействие людей, машинных программ и технических средств автоматизации при выполнении функций ТПП. Целью создания АСТПП является совершенствование ТПП на базе математических методов, оптимизации процессов проектирования и управления с применением современных средств вычислительной и организационной техники. Современную АСТПП можно рассматривать как единый программно-аппаратный комплекс на базе вычислительной техники, предназначенной для выполнения функций ТПП. Разработку АСТПП осуществляют на уровне предприятия. Решение об использовании на конкретном предприятии автоматизированной или неавтоматизированной форм выполнения ТПП, а также о степени автоматизации ТПП принимают на основе технико-экономических расчетов.

К АСТПП предъявляют ряд общих требований.

1. Система должна обеспечить выполнение основных функций ТПП, предусмотренных стандартами в составе и объеме, необходимом и достаточном для проведения ТПП предприятия.
2. Система должна функционировать в режиме, обеспечивающем анализ промежуточных решений и подготовку на основе этого анализа исходных данных для выполнения последующих функций или дальнейшего решения задачи.
3. АСТПП должна состоять из подсистем, при этом необходимо обеспечить возможность их объединения в различных вариантах или автономное использование каждой подсистемы.
4. Предусматривается поэтапный ввод АСТПП в эксплуатацию присоединением новых подсистем по мере их готовности или необходимости.
5. Независимо от числа функций, реализуемых в АСТПП, исходные данные для них следует подготавливать на едином входном

языке.

В структуре АСТПП по функциональному назначению выделяют два типа подсистем: общего и специального назначения.

В основной состав подсистем общего назначения входят подсистемы информационного поиска, кодирования, контроля и преобразования информации, формирования исходных данных для автоматизированных систем управления различных уровней, оформление технической документации.

Подсистемы специального назначения применяют при реализации конкретных функций и решений частных задач ТПП. Состав указанных функций и задач описан выше. Состав подсистем специального назначения устанавливают конкретно для каждого предприятия в зависимости от специфики ТПП и экономической целесообразности. Независимо от состава подсистем специального назначения их совместное функционирование обеспечивается едиными подсистемами общего назначения. Обмен информацией между подсистемами осуществляет единая информационная система. Информационную совместимость подсистем гарантирует единая система ввода, вывода, контроля и преобразования информации.

При разработке АСТПП формируется единое для всех подсистем информационное, математическое, методическое, организационное, техническое, лингвистическое и программное обеспечение системы.

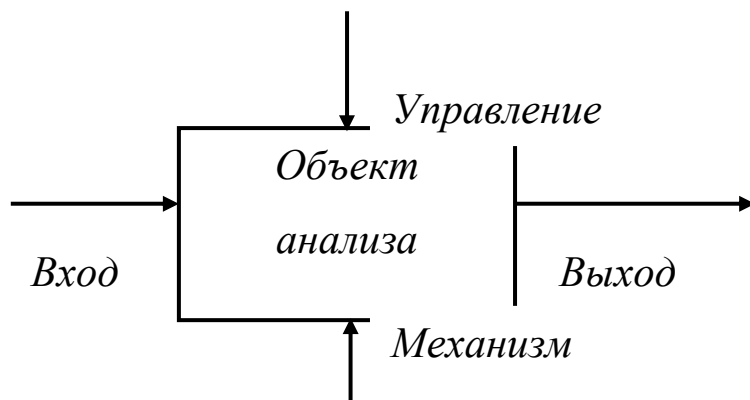
Разработку АСТПП как большой технической системы начинают с ее моделирования, выполняемого в три этапа:

1. Построение концептуальной модели АСТПП и ее формализация.
2. Разработка машинной модели АСТПП.
3. Получение действующей рабочей модели системы. Концептуальная модель системы обеспечивает переход от ее содержательного описания к формальному, т.е. формулируют модель системы и строят ее формальную (структурную) схему. Традиционный подход к созданию концептуальных моделей АСТПП основывается на сохранении в последних всех основных функций и функциональных связей, присущих неавтоматизированному проведению ТПП. Каждую функцию можно рассматривать как отдельную подсистему АСТПП. В свою очередь, каждую выделенную подсистему можно рассматривать как систему и для нее таким же образом определять подсистемы, отвечающие задачам ТПП. Такое иерархическое (ступенчатое) деление АСТПП и ее подсистем

на составные части можно проводить до любого уровня. Обычно ограничиваются тремя – четырьмя уровнями.

Для разработки концептуальных моделей АСТПП используют метод структурного анализа, предполагающий последовательную детализацию изучаемой или проектируемой системы "сверху вниз". В отличие от других методов, использующих тот же принцип, предполагается, что на каждом уровне представлено разложение анализируемого объекта, более детализированное, но полностью эквивалентное предшествующему уровню. Описание структурированной таким образом системы представляется в виде набора схем и пояснений к ним. Такой набор схем, называемый *моделью системы*, обычно отражает систему только с одной какой-либо точки зрения. Для полного описания системы составляют несколько моделей, между которыми устанавливают взаимные связи.

Объектом анализа может быть либо АСТПП полностью (на верхнем уровне), либо любая ее часть (на более низких уровнях разложения). Объект анализа на схеме представляют в виде прямоугольника и рассматривают не изолированно, а с внешней средой. Среду изображают стрелками, направленными либо к прямоугольнику, либо от него. Среда имеет четыре составляющие:



вход, выход, управление и механизм (рис.2.1).

Различают два типа объектов анализа – предмет и операцию. Если объект анализа – предмет, то операции образуют его внешнюю среду, и наоборот. Так, при рассмотрении

2.1. Изображение объекта анализа и его среда.

АСТПП как комплекса программных средств в качестве предметов рассматривают данные, а в качестве операций – преобразования над ними. При этом объектом анализа могут быть данные в среде преобразований или преобразования в среде данных.

Если объект анализа – операция, то стрелка входа изображает предметы, "перерабатываемые" операцией, стрелка выхода – предметы, получаемые в результате операции, стрелка управления – условия, при которых выполняется операция, а механизм – средства реализации анализируемой операции. Если под операцией понимать раз-



рабатываемое программное средство, то входом будут перерабатываемые им данные, выходом – данные, получаемые в результате выполнения программы, управлением – управляющие данные, а механизмом – средства реализации программы.

Если объект анализа – предмет, то стрелка входа изображает операцию, создающую этот предмет, стрелка выхода – операцию, использующую данный предмет, стрелка управления – условие существования предмета (может отсутствовать), стрелка механизма – средства воплощения. Так, для данных входом является создавшая их программа, выходом – использующая (перерабатывающая) их программа, управлением – условия существования данных (например, время хранения), а механизмом устройства запоминания.

Принцип построения структуры концептуальной модели АСТПП иллюстрирует рис. 2.2. На верхнем уровне модели изображена схема, отражающая всю анализируемую систему. Модель представляет собой иерархический набор структурных схем, каждая из которых является детализацией какого-либо объекта (предмета или операции) и окружающей среды из схемы предыдущего (более высокого) уровня. При этом анализируемый объект представлен на схеме

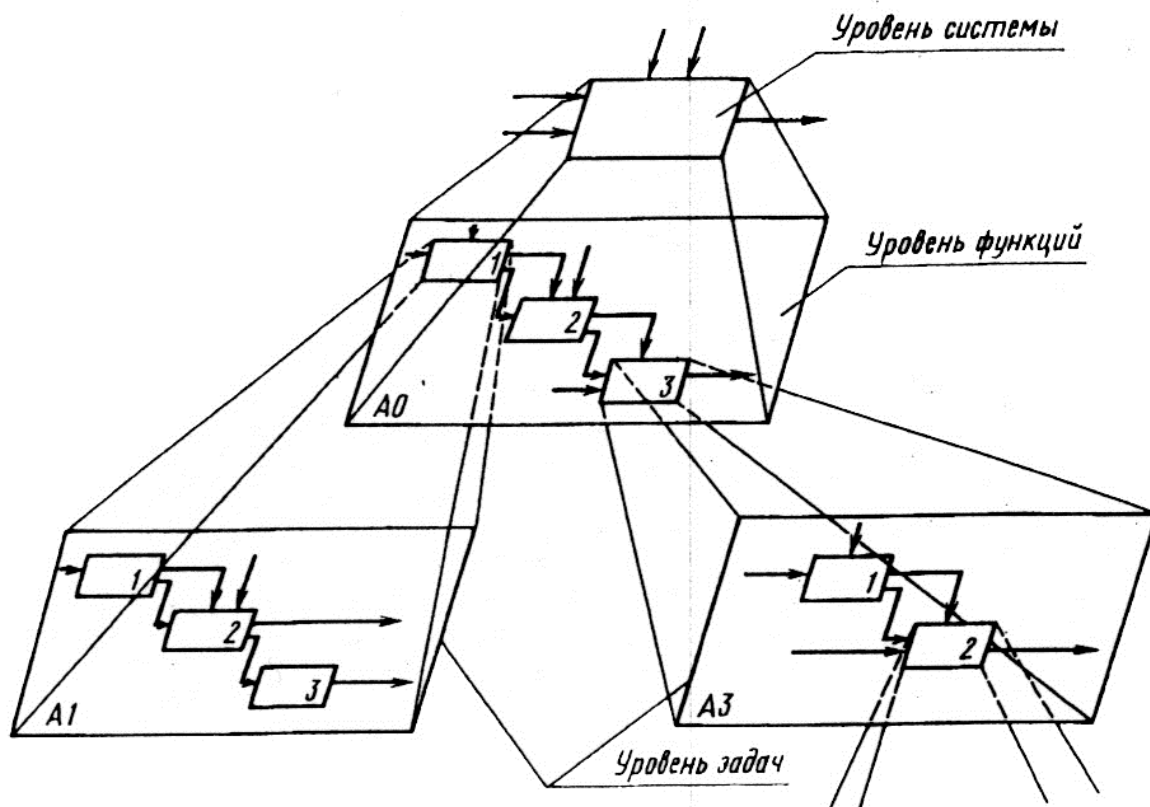


Рис.2.2. Иллюстрация принципа построения структуры концептуальной модели АСТПП.

в виде набора объектов (обычно не более 6), изображенных в виде прямоугольников, и связей между ними, показанных стрелками входа, выхода, управления и механизма. Части, на которые разложен анализируемый объект, должны в совокупности точно представлять его и, кроме того, не пересекаться. Совокупность стрелок, входящих в схему и выходящих из нее, должна точно совпадать со средой анализируемого объекта, изображенного в виде прямоугольника на схеме предыдущего уровня. К этой среде ничего не должно быть добавлено, но ничего из нее и не должно быть потеряно. В пределах схемы среда может быть представлена более дифференцированно (более подробно).

При формировании концептуальной модели АСТПП могут быть выделены уровни системы, функций и задач.

На уровне системы отражают только наиболее общие сведения о среде – входы, выходы, управление. Уровень функций иллюстрирует состав и взаимосвязь последних, ему соответствует общая структура системы ТПП. Уровень задач раскрывается через состав и взаимосвязь задач, решаемых при выполнении каждой, отдельно взятой функции ТПП. АСТПП можно рассматривать с функциональной, организационной и информационной сторон, каждой из которых соответствуют свои модели.

*Функциональная модель* отражает связи между отдельными структурными единицами системы и показывает взаимодействие между ними в процессе выполнения основных функций АСТПП.

*Организационная структура* может быть представлена в виде схемы, в которой указаны производственные подразделения АСТПП и связи между ними.

*Информационная модель* отражает информационные взаимосвязи элементов АСТПП, возникающие в процессе выполнения ее функций. Информационные модели представляют с помощью языков спецификаций информационных моделей. Наиболее часто используют универсальный высокоуровневый язык моделей данных "сущность – связь".

Практические аспекты создания информационных моделей подробно изложены в специальной литературе, посвященной разработке банков и баз данных.

На основании информационных моделей определяют требования к информационной базе АСТПП (по объему хранимой информации, форме ее ввода и вывода) и способам ее обработки.

Существуют два подхода к проектированию АСТПП. Первый состоит в определении перечня задач, решение которых автоматизируется. Такой перечень в дальнейшем не пополняется, не предполагается его информационная и управляющая стыковки с системами, автоматизирующими решения других задач ТПП. Этим самым создаются локальные системы для решения постоянного круга задач. Второй подход характеризуется возможностью расширения перечня решаемых задач в локальной системе и стыковкой отдельных локальных систем в единую комплексную систему, а в дальнейшем и в интегрированную систему. В этом случае все локальные системы следует строить на единой методологической основе, что предполагает единство информационного обеспечения и внешнего представления данных, а также единство математического обеспечения и подхода к выбору технических средств.

Выбор подхода непосредственно связан с выбором объекта автоматизации в области ТПП, которым может быть:

- 1) система ТПП в целом (АСТПП) как совокупность взаимодействующих функциональных подсистем;
- 2) функциональная подсистема как совокупность задач ТПП, относящихся к рассматриваемой подсистеме;
- 3) совокупность задач ТПП, решение которых необходимо для обеспечения функционирования системы ТПП.

При выборе объекта автоматизации учитывают снижение трудоемкости работ и сокращение сроков ТПП, повышение уровня организации и улучшение качества ТПП, создание предпосылок рациональной организации основного производства, возможность снижения или полной ликвидации непроизводительных расходов.

Технические средства, с помощью которых реализуются АСТПП, объединяют в комплексы. Различают местные, централизованные и интегрированные комплексы.

*Местные комплексы* позволяют решать в основном простые локальные задачи, возникающие, например, при проектировании СТО (штампов, прессформ и т.п.), расчете режимов резания, нормировании операций и т.д. Пользователем таких систем является один человек; технические средства систем – персональные ЭВМ, установленные на рабочем месте технолога, или специализированные аппаратные комплексы – автоматизированные рабочие места (АРМ) технолога.

*Централизованные комплексы* обслуживают отдельные производственные подразделения, т.е. несколько пользователей, и дают

возможность решать одну или несколько задач ТПП, например, разрабатывать единичные ТП изготовления деталей на основе процесс-аналогов, выбирать СТО и т.п. Технические средства этих систем – специализированные ЭВМ с сетью терминалов ввода-вывода, печатающими и другими периферийными устройствами, устанавливаемыми в соответствующих отделах и бюро.

Технические средства, объединенные в *интегрированные комплексы*, позволяют решать достаточно большой объем разнообразных задач и выполнять отдельные функции ТПП в масштабе всего предприятия. Пользователями такой системы являются технологи и конструкторы ОГТ, технических отделов и бюро цехов, а также сотрудники конструкторских бюро предприятия. Доступ к таким системам должен быть дистанционным, вывод и ввод информации осуществляется через терминалы. Технические средства этих систем – большие универсальные ЭВМ с высоким быстродействием и значительным объемом памяти, управляющие ЭВМ, специализированные рабочие станции, персональные ЭВМ с периферийными устройствами, объединенные в единую вычислительную систему с помощью специальных каналов связи и образующие локальную сеть.

Основным режимом работы АСТПП следует считать интерактивный (диалоговый) режим. Отдельные задачи или их фрагменты, для которых могут быть разработаны формальные алгоритмы решения, могут решаться в автоматическом (пакетном) режиме.

На основании разработанных концептуальной и информационной моделей разрабатывается и отлаживается программное обеспечение АСТПП, которое после развертывания на технических средствах формирует машинную модель системы.

Разработка концептуальных и информационных моделей АСТПП, несмотря на специализированный характер, сложность и предъявляемые высокие требования к качеству принимаемых решений, может быть эффективно выполнена только специалистами-технологами.

## **2.2. ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА**

Создание полноценной, удовлетворяющей современным требованиям АСТПП, обеспечивающей комплексную реализацию функций

ТПП и высокое качество последней, является сложной, до конца не решенной научно-технической проблемой. Для ее решения необходимо, во-первых, исследование процессов принятия ТР в ходе ТПП, создание общей методологии ТПП, что позволяет представить указанные процессы в виде последовательности формальных процедур, и, во-вторых, разработка эффективных средств (программных и аппаратных) представления процессов принятия ТР, позволяющих проводить автоматизацию этих процессов в программно-аппаратных комплексах.

Практически все функции ТПП содержат задачи, решение которых в автоматическом (пакетном) режиме при использовании средств вычислительной техники невозможно в силу недостаточной разработанности процедур принятия ТР и их недостаточной формализации.

Отработку конструкций на технологичность в значительной мере можно рассматривать как акт творчества, который пока не может быть сведен к последовательности формальных процедур.

Задачи, решаемые при разработке единичных ТП, изготовления деталей на основе процессов-аналогов являются формализуемыми, что нашло отражение в создании значительного числа систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), использующих принцип типовых решений. Эти системы можно рассматривать как отдельные программные модули, которые могут входить в состав АСТПП.

Наиболее трудно формализуемой задачей, решаемой при разработке единичных ТП изготовления деталей при индивидуальном проектировании является создание маршрутной технологии, при разработке которой необходим синтез структуры маршрутного ТП (определение состава и последовательности технологических операций). В математической постановке эта задача сводится к поиску вариантов структур в счетных множествах с весьма значительным, хотя и ограниченным числом элементов. Формализация именно таких задач представляет наибольшие трудности. Задачи, решаемые при разработке операционной технологии, являются формализуемыми. Известно значительное число САПР операционной технологии, позволяющих обеспечивать высокое качество проектных решений.

Задачу разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ в настоящее время следует считать методологически решенной. Существующие системы автоматизированного программирования позволяют создавать управляющие программы высокого качества для

обработки сложных заготовок практически в автоматическом режиме.

При проектировании станочных специальных приспособлений наиболее трудно формализуемой является задача эскизной проработки компоновки конструкции. В АСТПП эта задача решается с использованием средств машинной графики. По-видимому, даже в перспективе, она не будет решаться в автоматическом (пакетном) режиме. Разработку сборочного чертежа и деталей приспособления следует считать задачами, выполнение которых возможно в пакетном режиме при использовании соответствующих технических средств.

Выбор вида и метода изготовления заготовки являются трудно формализуемыми задачами, решение которых в АСТПП требует наличия развитого информационного обеспечения и современных информационных технологий. Задачи оптимизации являются формализуемыми, но требуют разработки чувствительного и надежного критериального аппарата. Задачи выбора ТП, СТО и некоторые другие, сводящиеся к поиску объекта в некотором множестве объектов, являются формализуемыми и достаточно просто реализуемыми в АСТПП. Практически все задачи, решаемые при выполнении функции контроля и управления ТП, являются трудно формализуемыми.

Проведенный анализ раскрывает методологическую проблематику создания АСТПП.

Принятие любого ТР связано с переработкой геометрической информации, сопровождающей выполнение всех функций и задач ТПП. Носителями геометрической информации являются, например, чертеж детали или заготовки, операционный эскиз и т.д. На чертежах и эскизах геометрическая информация, представляя конструктивные параметры детали, является носителем и технологической информации. Специалист-технолог, изучая чертеж детали и ассоциативно воспринимая геометрическую и технологическую информацию, может мысленно изменять положение детали в пространстве, добавляя или исключая из изображения детали необходимые комплексы поверхностей и т.д. При создании АСТПП все указанные действия должны выполняться в автоматизированном режиме, что требует создания системы геометрического и технологического описания объекта (детали, заготовки, сборочной единицы и т.д.). Разработка системы геометрического описания объекта должна основываться на применении вычислительных средств, обеспечивающих создание 3-мерных моделей геометрических объектов, в сочетании с эффек-

тивными методами технологического атрибутирования геометрических моделей. Под технологическими атрибутами здесь понимаются технологические параметры объекта (точность размеров, формы, взаимного расположения, шероховатость поверхностей и т.д.). Особую сложность вызывает значительное число и специфичность технологических атрибутов, которые, в принципе, могут относиться к любой из поверхностей или любому комплексу поверхностей.

Сложной задачей является выбор оптимальной конфигурации АСТПП по составу функций, задач и технических средств. Попытки создания универсальной АСТПП приводят к резкому усложнению ее разработки. Создание специализированной АСТПП может привести к неоправданному уменьшению реализуемых в ней функций и задач, а также к резкому снижению возможности адаптации АСТПП. Вопросам адаптируемости АСТПП следует уделять при разработке особое внимание. Значительно более целесообразной является разработка интегрированной адаптируемой АСТПП высокого качества, тиражируемой для предприятий отрасли, чем создание неадаптируемых АСТПП на каждом конкретном предприятии.

Особой проблемой является кадровое сопровождение разработки и эксплуатации АСТПП. Разработку АСТПП должны выполнять специалисты, имеющие базовое технологическое образование и обладающие глубокими практическими навыками в создании современных программно-аппаратных комплексов на базе вычислительной техники. Примерно такие же требования предъявляют и к специалистам, эксплуатирующим АСТПП. Для разработки и эксплуатации АСТПП можно привлекать специалистов в относительно узких областях, таких как технология машиностроения, разработка программного обеспечения и других, но только в составе групп, объединяющих специалистов разного профиля, работающих над одной проблемой.

## ГЛАВА 3

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕТРАДИЦИОННОГО НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

## 3.1. МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### 3.1.1. ТРАДИЦИОННОЕ МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Методическую основу проектирования производства деталей машин определяет состав и последовательность решения задач разработки систем, реализующих технологические процессы. Тем самым, определяется основа методических указаний по проектированию. Традиционно, согласно стандартам, проектирование технологических систем и процессов включает следующий состав задач и последовательность их решения:

1. Выбор характеристики исходной заготовки с нормированными припусками для последующей обработки и изготовления детали.
2. Выбор «маршрута» обработки, определяя в том числе:
  - очередность этапов энергетических работ, учитывая соответствующую характеристику метода обработки: механическая, термическая, химико-термическая, электрофизическая;
  - очередность методов обработки каждой поверхности, соответствующую очередность технологических переходов и операций, учитывая «вид» обработки по характеристике оборудования и инструментов: точить, сверлить, фрезеровать и т.д.;
  - очередность элементов и элементарных поверхностей по их предпочтению для базирования и установки при выполнении операций;
  - очередность элементов и поверхностей по порядку их обработки.
3. Выбор средств технологического оснащения (СТО): оборудования, приспособлений, инструментов с характеристикой операций и переходов, которые они выполняют: установка, точение, сверление и т.д.
4. Нормирование припусков и функционально-технологической характеристики технологических систем (ТС), определяя расчетные



параметры операционных заготовок, соответствующую наладку и технологический режим обработки и работы СТО, собранных и соединенных в конструкцию ТС.

5. Проверка качества частных операционных подсистем и ТС всего технологического процесса в целом по обеспечению точности, надежности, экономичности и окончательный выбор лучших вариантов.

Учитывая стандартные методические указания, в том числе международные (стандарты ИСО серия 9000), можно отметить следующие принципиальные недостатки традиционного способа проектирования технологических систем и процессов.

Во-первых, затраты на заготовку и последующую обработку определяются суммой затрат, а не одной из ее составляющих. Выбирая заготовку, необходимо учитывать все затраты технологического процесса. Выбор заготовки и метода ее получения без анализа последующей обработки может привести к росту общих расходов. Следовательно, решая задачу выбора исходной заготовки по традиционной методике – до разработки процесса изготовления детали, результат решения может не быть достаточно обоснованным.

Во-вторых, традиционно считается необходимым разработать маршрут технологических операций и обработки поверхностей до выбора СТО. Однако, без оценки средств производства, реализующих операции и переходы, решить указанную задачу с получением экономически оптимальных результатов, также не представляется возможным.

В-третьих, правила очередности обработки поверхностей и предпочтение элементов для базирования, не сформулированные до уровня методически обоснованных закономерностей, не обеспечивают математической алгоритмизации и соответствующего обоснования принимаемых решений.

В-четвертых, использование традиционных оценок объектов только по финансовым затратам связывает решение предварительных задач проектирования с задачей финансовой калькуляции, которая может быть выполнена лишь после структурного синтеза и полного нормирования технологического режима вариантов ТС.

В-пятых, традиционная последовательность проектирования по порядку изготовления изделий взаимосвязывает все частные задачи, не позволяя решать их отдельно, в методически установленной очередности.

### 3.1.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ, ПОВЫШАЮЩИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Решение всех задач производства обусловлено достижением общей цели. Цель по заданному качеству изделий достигается на последнем этапе производства. Следовательно, проектирование необходимо начинать с разработки последней ТС, обеспечивая целевые требования технического задания (ТЗ). При этом определяется единый подход к проектированию. Уточняя этот подход, можно определить следующую основу проектирования производства изделий и, в частности, деталей машин.

В соответствии с неизменной целью, проектирование производства включает три основных и также неизменных комплекса (блока) последовательно решаемых задач:

- разработка принципиальной схемы производства, включающей последовательность создания (очередность изготовления) элементов изделия и последовательность энергетически принципиальных этапов изготовления;
- разработка конструкции ТС производства с использованием соответствующих методов структурного анализа и синтеза;
- разработка параметрической характеристики ТС, включая определение входных параметров заготовок, текущих параметров технологического режима и оптимизацию всех параметров, обеспечивая выходную характеристику получаемой продукции (изделия).

Базируясь на этой основе, проектирование ТС и процессов производства деталей машин должно включать следующую методическую последовательность решаемых задач:

1. Выходная характеристика изделий, обработанных на энергетически различных этапах производства обуславливает необходимость этих этапов и соответствующую характеристику качества изготавливаемого изделия.

Определение последовательности этапов и граничных условий по выходной характеристике изделий, обработанных энергетически различными методами (без определения маршрута операций и переходов) не представляет затруднений.

При изготовлении деталей машин эта последовательность является практически неизменной и определяется следующей общей характеристикой:

- энергетически многообразное получение заготовки с последующей

- механообработкой;
- структурно-нормализующая и улучшающая термообработка с последующей механообработкой;
  - упрочняющая химико-термическая обработка с последующей механообработкой;
  - упрочняющая и улучшающая термообработка с последующей механообработкой;
  - электрофизическая обработка с последующей механообработкой.

В зависимости от требуемой характеристики заданного изделия определенные этапы исключаются.

Любой этап производства начинается с установки заготовки или изделия, т.е. с базирования и закрепления элементов формируемой системы. Погрешность базирования при установке является одним из определяющих факторов конечной точности систем и реализуемых операций. Установленный порядок предпочтения поверхностей и конструктивных элементов для баз одновременно определяет соответствующие приоритеты и ранжирование элементов в очередности изготовления изделий.

В первую очередь должны обрабатываться поверхности, которые предпочтительны для базирования.

2. На основе установленного порядка приоритетов по базированию и изготовлению заданного изделия (п.1) могут быть решены следующие задачи: выбор средств производства (оборудование, инструменты, приспособления) и соответствующий конструктивно-структурный синтез технологической системы (подсистемы).

Учитывая порядок и характеристику обрабатываемых поверхностей, поверхностей для баз и технологические возможности формируемой системы, выполняется корректировка последовательности изготовления изделия, допустимая обеспечением требуемого качества.

3. После структурного анализа и синтеза системы для реализации разрабатываемой операции может быть выполнено соответствующее нормирование всех параметров проектируемой системы.

В том числе определяются: припуски, входные размеры операционной заготовки, параметры наладки и технологического режима, затраты всех производственных ресурсов.

4. Учитывая, что выбор конструктивно-структурных элементов проектируемой системы и нормирование параметров ее операции выполняется по граничным условиям и целевым функциям кри-

териев оптимальности, проверка качества соответствию ТЗ практически не требуется.

Вместе с тем, при необходимости дополнительной проверки обеспечения требуемого качества по точности, надежности и экономичности, рассмотренная последовательность решения производственных задач дает возможность выполнить необходимый размерный анализ и проверку оптимальности проектируемой системы.

5. После разработки ТС последней операции циклы проектирования операционных ТС повторяются. Разрабатывается очередная подсистема и операция в направлении получения исходной заготовки.

Проектирование очередной технологической системы (подсистемы) по порядку, противоположному последовательности операций изготовления заданного изделия, выполняется в соответствии с методическими указаниями, приведенными выше.

После разработки подсистемы производства исходной заготовки проектирование оканчивается.

Если по ходу проектирования не находят потребных средств производства, то формулируется соответствующее ТЗ.

ТЗ определяет задачи на проектирование необходимых изделий, учитывая экономичность приобретения их на рынке, включая приобретение заготовок и полуфабрикатов.

Цель производственных задач является общей и включает два требования:

- создание изделий с заданными показателями эксплуатационного качества;
- создание изделий с заданными показателями экономического качества.

Принципиально важным для проектирования и формулировки критериев эксплуатационного качества является то обстоятельство, что изделия или ТС, являясь продукцией, при эксплуатации используются для другой продукции. При этом качество одного изделия (системы), соответствующее своему назначению, определяется требованиями к качеству изготовления, хранения, перемещения и выпуска другого изделия. Тем самым, целевые требования по эксплуатационному качеству определяются соответствием геометрических и физических параметров рабочей зоны выбираемого или создаваемого изделия параметрам другого изделия или объекта (субъекта) – “потребителя” или “заказчика”.

По характеристике рабочих зон и рабочих параметров определяется соответствие объектов друг другу, соответствующая “цена” качества объектов, дается соответствующая оценка при выборе вариантов и принятии оптимального решения. По параметрической оценке рабочей зоны определяются допустимые граничные условия требуемой характеристики качества изделий и систем различного назначения, включая бытовую технику:

- холодильники – по характеристике холодильных камер;
- телевизоры – по параметрам экрана и т.д.

Такой подход к оценке качества и нормированию эксплуатационных параметров обеспечивает эффективное проектирование как конструкций изделий, так и процессов – обработки, транспортировки, хранения, изображения или описания продукции, для которой изделия или системы предназначены. В этом случае проектирование оптимальных изделий, систем и процессов осуществляется на единой методической основе, при неразрывной зависимости конструктивной и технологической, т.е. структурной и функциональной характеристик формируемой системы: изделие (оснащение) – изделие (продукция) – процесс (операция) работ.

Этот принципиальный вывод определяет соответствующий способ проектирования и подготовки производства, способ нормирования граничных условий и целевых требований задач производства. Соответствующий способ проектирования и подготовки производства отвечает цели производства и обеспечивает оптимальнолучшие результаты решения производственных задач.

## **3.2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ**

### **3.2.1. ИСХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Установленная методическая последовательность проектирования требует соответствующего математического обеспечения, соответствующих методов математического анализа и оценки.

Порядок обработки частей изготавливаемого изделия может быть определен только при наличии математического критерия по оценке качества конструктивных элементов для базирования и обра-

ботки. Выбор средств производства также требует применения математических критериев оценки и предпочтения вариантов.

После расчета частных показателей каждой операции оценка качества реализуемых операций и технологической системы в целом также осуществляется по сформулированным критериям оптимальности.

Математическая оценка качества объектов всегда осуществляется с позиции поставленной цели при наличии математически заданных граничных условий задачи и целевой функции качества. Математически выраженные граничные условия (ГУ) и целевые функции (ЦФ) вместе образуют критерий оптимальности (КО) качества принимаемого решения. При наличии КО все дальнейшие действия направлены лишь на поиск объектов в заданных условиях, учитывая соответствие граничным условиям и условию оптимальности по сформулированной целевой функции.

Таким образом, основой математического обеспечения для принятия проектных решений являются критерии оптимальности объектов и расчетные функции частных параметров.

Решения, принятые по критериям оптимальности, определяют очередность изготовления частей заданного изделия и приоритеты поверхностей для установки. Только по критериям оптимальности могут быть выбраны средства производства и дана оценка системы после структурного синтеза (соединения) выбранных элементов.

В результате полного проектирования определяются геометрические, физические и финансовые показатели систем в статике, кинематике и динамике, представляя соответствующую параметрическую характеристику конструкции системы и ее рабочего процесса (операции).

### **3.2.2. НЕДОСТАТКИ ТРАДИЦИОННЫХ КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОСТИ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОБЪЕКТОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Как было отмечено, оценка объектов машиностроения, соответствующее ранжирование вариантов и выбор оптимального решения осуществляется по критериям оптимальности.

Учитывая изложенные методические положения, рассмотрим традиционные математические принципы оценки отдельных свойств

и оценки качества объектов в целом для принятия проектных решений.

Показателями свойств объектов ( $X$ ), математически отражающими их качественную характеристику, являются геометрические, физические и финансовые показатели. Для оценки характеристики объектов машиностроения соответственно используются следующие показатели:

*геометрические показатели* – линейных и угловых размеров, площадей и объемов, форм и шероховатости профиля, допустимых и фактических отклонений, т.е. погрешностей, соответствующие показатели точности – допуски, квалитеты, степени и классы точности;

*физические показатели* – температур, масс, твердости, напряжений, сил, давлений, скоростей, мощности, времени, производительности, надежности, количества объектов и их частей;

*финансовые показатели* – стоимости изделий, материалов, работ, энергии, производственных площадей и объемов, производственного времени, т.е. финансовые показатели стоимости всех производственных ресурсов, которые представляют затраты при создании и выпуске изделий.

Обозначим значения перечисленных показателей через  $x$ , значение каждого, номенклатурно отдельно-единичного ( $i = 1$ ) показателя через  $x_i$ . В соответствии с граничными пределами значений  $x = (min, max)$  качественное значение единичного параметра выражается следующими граничными условиями

$$x \leq x_i \leq x.$$

Если по условию наименьшее условие ограничивается нулем, то граничные условия, обычно, выражают без указания меньшего значения

$$x_i \leq x.$$

Например, условие отклонения или погрешности в сравнении с допуском может быть записано следующим выражением требуемой точности:

$$\varepsilon_i \leq T\varepsilon.$$

При условии однозначно заданного значения частных показателей (когда  $x = x_{min} = x_{max}$ ), граничные условия выражаются равенством:

$$x_i = x.$$

Исходное определение номенклатуры показателей для матема-

тической формулировки граничных условий являются первым главным этапом для решения задач по критериям оптимальности. Он определяет полноту учета всех влияющих факторов для принятия решений. Математически сформулированные граничные условия определяют исходные условия задачи и допустимость решений по ограничениям параметрических значений показателей объектов.

После установления необходимой и достаточной номенклатуры показателей, их заданные значения определяют граничные условия поиска соответствующих объектов – соответствующих вариантов возможного решения задачи. После отбора вариантов, приемлемых по граничным условиям, оценка найденных объектов выполняется по целевым функциям оптимальности. Целевые функции определяют оптимальность, т.е. лучший вариант решения, принимаемого в соответствии с целью.

Цель, математически выраженная целевой функцией отдельных-единичных ( $i = 1$ ) параметров  $x_i$ , может быть записана различно с использованием абсолютных или относительных частных показателей:

$x = x_i \rightarrow extr(max, min)$  – абсолютный уровень требуемого качества частного показателя;

$\varepsilon(x) = |x_i - x_{opt}| \rightarrow extr$  – абсолютное отклонение от требуемого качества показателя;

$k(x) = x_{opt} / x \rightarrow 1$  – относительный показатель в виде коэффициента, показывающего качество относительно лучшего оптимального значения ( $opt$ ).

Соответственно, указанные требования по частным показателям характеристики объектов  $X$  формулируются следующими функциями целевого результата для принятия решений

$$x_i \rightarrow (max, min); \varepsilon(x) \rightarrow min; k(x) \rightarrow 1.$$

Из рассмотренных критериев следует, что для принятия лучших решений все частные абсолютные показатели должны иметь предельные значения, а коэффициенты должны быть равны единице ( $k = 1$ ).

Так как при оценке частных единичных свойств не учитывается сравнительная значимость всей совокупности свойств, то частные (локальные) критерии не могут быть единичной функцией для объекта в целом.



Например, выбор заготовки, как и технологического оснащения, только по коэффициенту использования материала является недостаточным критерием лучшего качества проектного решения.

Лишь в исключительных случаях, при сравнении объектов, однотипных по назначению и специализации, при взаимосвязи одного из основных показателей с остальными и наличии соответствующего параметрического ряда объектов может быть дана такая оценка.

Учитывая указанный недостаток, основной оценочной функцией для конкурирующих вариантов традиционно считается финансовый критерий экономичности. Таким критерием может быть либо «себестоимость» варианта по текущим – эксплуатационным затратам ( $C_n$ ), либо суммарные – текущие и единовременные («капитальные») затраты ( $C_k$ ) с учетом нормативного коэффициента экономической эффективности по сроку окупаемости ( $K_n$ ):

$$C = C_n \rightarrow \text{extr}(\min) \text{ или } C = (C_n + K_n C_k) \rightarrow \text{extr} .$$

Хотя такая оценка и является достаточно интегральной, однако, она требует соответствующего полного расчета вариантов с учетом нормирования технологических режимов. Лишь после полного проектирования структуры и нормирования функциональных параметров технологической системы, может быть дана соответствующая оценка вариантов.

Учитывая указанные факторы и недостатки, в производственной практике используются различные подходы к формулировке целевых функций для оценки многомерных объектов и принятия оптимальных решений по ходу конструктивно-структурного синтеза систем до нормирования режимных показателей.

Одним из таких подходов является нормирование разработчиком или проектировщиком допустимой «оптимальности» частных коэффициентов, определяющих экономичность и, тем самым, технологичность конструкций по различным показателям (по цене, по использованию материала, энергии, производственной площади, по степени специализации, автоматизации и стандартизации элементов). Очевидно, что оценка с позиции субъективного мнения и интуиции проектировщика или эксперта не является лучшей.

Разновидностью такого подхода и соответствующих методов математической оценки объектов (для принятия решений по оптимальности) являются рекомендации различных теорий по использованию не частных коэффициентов, а многопараметрических целевых функций. Многопараметрические целевые функции определяют каче-

ство возможного решения не по одному свойству объекта, а по множеству факторов в сравнении их с лучшими – оптимальными значениями. Вместе с тем, и в этом случае лучшая значимость частных показателей определяется величиной, нормированной проектировщиком или экспертом. Традиционно для такой оценки принимаемых решений рекомендуется использовать целевые функции двух основных видов, учитывая либо абсолютные значения частных показателей, либо относительные значения в виде множества частных коэффициентов.

Соответственно, в первом случае рекомендуется использовать следующую комплексную целевую функцию (функционал):

$$F(x) = \sum_{i=1}^I k_i x_i,$$

где  $x_i$  – частные показатели  $i$ -х свойств объекта, рассматриваемого как возможное решение;  $k_i$  – «весовой» коэффициент значимости  $i$ -го показателя свойств, установленный проектировщиком, разработчиком или экспертом.

С позиции второго подхода целевая функция оптимальности решения определяется значимостью частных показателей в сравнении с «базовыми» показателями их лучшего качества, нормированными экспертом либо по аналогичному образцу объекта, либо интуитивно-эвристически.

Существуют и другие подходы к формулировке целевых функций, определяющих математические методы оценки многофакторных решений. Общим их недостатком является нормирование предельной значимости факторов разработчиком или экспертом. Иными словами, традиционно для многофакторной оценки проектных решений рекомендуется использовать целевые функции либо с субъективно принятыми весовыми коэффициентами, либо с учетом аналогично принятых базовых значений предельно лучшего качества частных факторов принимаемого решения. При этом применение более сложных расчетных схем не компенсируется положительным эффектом, так как без экспертных оценок ни один из традиционных методов не обходится.

Вместе с тем, можно принимать объективные решения без экспертных оценок, используя нетрадиционный подход к математической формулировке оценочных функций. Объективная оценка уровня качества может быть дана на основе сравнения конкурирующих вари-

антов между собой и определения фактической оптимальности с позиций целевых требований ТЗ в пределах заданных граничных условий задачи. При этом не исключается проверка качества проектируемых систем и по финансовым показателям вариантов. Рассмотрим такую возможность и соответствующий способ многофакторной оценки объектов и решений, принимаемых по ходу проектирования технологических систем и реализуемых ими процессов.

### 3.2.3. МНОГОФАКТОРНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ БЕЗ НОРМИРОВАНИЯ ЗНАЧИМОСТИ ЧАСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЕРТОМ

Из предыдущего раздела следует, что оптимальность частного показателя характеристики объекта, рассматриваемого как возможное решение, может оцениваться коэффициентом в виде следующей целевой функции

$$k_i = f(x) = \frac{x_i - x_0}{x_{opt} - x_0} \Rightarrow \max.$$

При этом знаменатель является весовым уровнем качества фактического свойства ( $x_i$ ) в числителе, отсчитанного от худшего ( $x_0$ ) значения, но допустимого целевыми требованиями, сформулированными техническим заданием (ТЗ) в соответственно установленных граничных условиях

$$(x \leq x_i \leq x); \quad x = (x_i, x_0, x_{opt}).$$

Также очевидно, что оптимально-лучший показатель, как и худший, количественно, т.е. численно может иметь или наибольшее, или наименьшее параметрическое значение  $x_{opt} = (\min, \max)$ .

Соответственно, при наличии множества рассматриваемых объектов ( $X$ ) и множества свойств ( $x$ ) у каждого объекта ( $x \in X$ ):

$$x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_i); \quad X = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_k); \quad x \in X.$$

Критерий оптимального качества объекта должен выражаться следующей комплексной целевой функцией

$$F(X) = \sum_{i=1}^I \frac{x_i - x_0}{x_{opt} - x_0} \rightarrow \text{extr}(\max).$$

Тем самым, без введения весовых коэффициентов и нормирования базовых значений оптимальности каждого свойства экспертом (субъектом) может быть дана комплексная оценка качества каждого объекта и принято соответствующее решение.

Обобщая рассмотренное математическое обеспечение по критериям оптимальности можно заключить, что для принятия обоснованных и целесообразных решений необходимо:

- наличие граничных условий статистически обоснованной возможности поиска вариантов проектных решений, соответствующих условиям качества;
- наличие целевых требований к качественной значимости изменения параметров возможных вариантов в большую или меньшую сторону (*max, min*).

Исходные граничные условия и целевые требования к лучшему качеству зависят от назначения создаваемого объекта, условий его производства и дальнейшего применения.

Если изделие, система предназначена для продажи, граничные условия качества и целевые требования к качеству определяются статистическими данными рыночного спроса и возможностями соответствующего производства.

В случае прямого заказа, условия и целевые требования определяются непосредственно заказчиком – потребителем продукции.

Когда объект производства предназначен для комплектации технической или технологической системы, т.е. для обеспечения качества другого изделия, то граничные условия и целевые требования, очевидно, определяются соответствием качества свойств проектируемого объекта свойствам заданной системы или изделия.

Во всех случаях производства, при обеспечении граничных условий требуемого эксплуатационного качества, необходимо обеспечивать качество производства по наименьшим затратам производственных ресурсов.

Учитывая, что свойства объектов в статике, кинематике и динамике всесторонне определяются геометрическими, физическими и финансовыми показателями, номенклатура показателей качества должна, очевидно, соответствовать этим показателям.

Учитывая логические функции граничных условий по качеству и целевые функции по экономичности, обобщенно критерий оптимальности (КО) для принятия производственных решений может быть записан следующей системой функциональных зависимостей:

$$KO : \left\{ \begin{array}{l} \text{ГУ} : \left\{ \begin{array}{l} x = (x_1, x_2, \dots, x_i); x \leq x_i \leq x; \\ X = (X_1, X_2, \dots, X_k); x \in X; \end{array} \right. \\ \text{ЦФ} : \left\{ \begin{array}{l} x = (x_i, x_0, x_{opt}); x_i = x \rightarrow x_{opt}; \\ F(X) = \sum_{i=1}^I \frac{x_i - x_0}{x_{opt} - x_0} \rightarrow \text{extr}(\max) \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (3.1)$$

При наличии множества объектов  $X = (X_1, X_2, \dots, X_k)$ , из критериального условия целевой функции

$$F(X) \rightarrow \text{extr}(\max)$$

следует логический алгоритм ранжирования объектов и определение оптимального решения

$$F(X) = F(X_{opt}) = F(X_1) > F(X_2) > \dots > F(X_k) = \min. \quad (3.2)$$

Рассматривая положительные стороны сформулированного способа оценки, ранжирования объектов по уровню их качества, можно отметить следующие принципиальные положения.

1. Из комплексной целевой функции следует, что в основу предложенного способа оценки производственных объектов заложен принцип «паретовских решений». Оценка объектов при выборе решений осуществляется с позиции эквивалентной равнозначности влияния каждого показателя характеристики объекта на окончательное решение. Принципиальное отличие и достоинство сформулированного критерия оптимальности заключается в том, что при оценке фактическое влияние различных факторов неравнозначно.

Эта значимость определяется не экспертом (субъектом), а реальной характеристикой сравниваемых объектов. Вес каждого показателя зависит от состава параметров установленной номенклатуры и фактической (объективной) характеристики объектов, приемлемой по граничным условиям технического задания (ТЗ).

Например, выполняется комплексная оценка и ранжирование вариантов возможных решений по качеству совокупности физических и финансовых показателей объектов. При равенстве их финансовых показателей, различие по оптимальности определяется только физическими факторами. При равенстве физических свойств – различие качества объектов определяется финансовыми показателями. Наконец, в случае различия всех показателей, однако эти показатели приемлемы по исходным требованиям граничных условий, – ранжирование объектов зависит от значения всех факторов, определяя соответствующие уровни их качества по совокупности свойств.

Для убедительности рассмотрим более подробно конкретный пример задачи выбора оборудования, аналогичной выбору и других СТО при проектировании технологических систем и процессов.

Допустим, в заданных условиях выбора и принятия решений – на предприятии найдено несколько станков, приемлемых для обработки детали по эксплуатационным ограничениям: рабочая зона и рабочая характеристика каждого оборудования обеспечивает требуемые ТЗ показатели качества обработанной заготовки. При этом количество обрабатываемых поверхностей для каждого варианта может быть различным.

Множество вариантов оборудования  $(X_k)$ , соответствующих граничным условиям ТЗ, как и деталь, имеют многопараметрическую характеристику:

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_k) ; x = (x_1, x_2, \dots, x_i) ; x \in X ,$$

где  $x_1 = L_i$  – габаритные размеры, определяющие использование производственных площадей и объемных ресурсов;

$x_2 = m_i$  – габаритная масса, определяющая использование материальных ресурсов;

$x_3 = W_i$  – габаритно установленная мощность, определяющая использование энергетических ресурсов;

$x_4 = T_i$  – подготовительно-заключительное время наладки совместно со вспомогательным на установку единицы оснастки и предмета труда, определяющие использование временных ресурсов;

$x_5 = V_i$  – скорость работы, определяющая производительность и соответствующее использование временных ресурсов;

$x_6 = P_i$  – надежность по вероятности безотказной работы, определяющая использование временных ресурсов;

$x_7 = C_i$  – цена минутной (часовой) работы с учетом балансовой цены, определяющая использование текущих и капитальных финансовых ресурсов;

$x_8 = N_i$  – количество обрабатываемых поверхностей, определяющее использование производственных ресурсов на единицу предмета труда – одну поверхность, одну деталь, одно изделие.

В функции целевых требований – экономии использования производственных ресурсов всех видов (финансов, времени, энергии, производственных площадей и объемов) на единицу продукции,

определяются соответствующие критериальные значения ( $min, max$ ) оптимальности показателей установленной номенклатуры ( $x_{opt}$ )

$$L_i \rightarrow min; m_i \rightarrow min; W_i \rightarrow min; V_i \rightarrow max; \dots; N_i \rightarrow max.$$

Соответственно худшие значения  $x_0 = (max, min)$  определяются противоположной критериальной значимостью указанных показателей.

Вычислив значение целевой функции для каждого варианта средств производства с учетом «весового» предельного уровня фактического качества ( $x_{opt} - x_0$ ) по каждому  $i$ -му показателю, отсчитанному от худшего значения ( $x_i - x_0$ ), определяется ранжирование вариантов и оптимальность принимаемого решения

$$F(X) = \sum_{i=1}^I \frac{x_i - x_0}{x_{opt} - x_0} = F(X_{opt}) = F(X_1) > F(X_2) > \dots > F(X_k).$$

При этом, очевидно, что влияние – «вес» каждого фактора на комплексный показатель качества зависит только от объективно по объектам установленных диапазонов фактического отличия одноименных показателей, а не от мнения эксперта. Вместе с тем, это отличие устанавливается по фактической характеристике объектов после того, как учтены граничные условия приемлемых вариантов.

В частных случаях, если у рассматриваемых вариантов один или несколько показателей равны, то эти факторы не оказывают влияния на оценку качества варианта. Значимость – «вес» таких факторов в комплексной оценке равна нулю. Например, если габаритные размеры и, тем самым, занимаемая производственная площадь вариантов равны, то эти показатели не окажут влияния на оценку и т.д.

С позиции традиционных теорий экономики и технологии машиностроения, для сравнительной оценки вариантов возможных решений, затраты по каждому варианту требуется пересчитывать в финансовые показатели. Но вполне понятно, что при определенной финансовой стоимости (цене) единичных ресурсов любой физической природы, количество различных затрат можно сравнивать между собой и без пересчета в финансовые показатели. Иными словами, сравнение двух объектов, например, непосредственно по значению производственной площади – эквивалентно финансовой оценке рассматриваемых вариантов по стоимости их рабочих мест. Очевидно, что аналогичная оценка вариантов по затратам производственных ресурсов любой природы может выполняться прямым сравнением соответ-

ствующих затрат без трудоемкого пересчета в финансовые показатели «себестоимости».

Следовательно, комплексная оценка качества объекта и соответствующих вариантов возможных решений на стадии проектного анализа и синтеза вполне осуществима по комплексу разнородных финансовых, геометрических и физических показателей, определяющих качество объектов.

2. Вторым, принципиально важным достоинством сформулированного способа оценки качества объектов является следующее положение.

При сравнении каждого показателя характеристики объекта с допустимо возможным изменением (*min, max*) по установленной шкале качества, неравномерность принятых шкал параметрической характеристики, а также принятые масштаб и размерность единиц измерения показателей – не влияют на оценку качества. Такое положение определяется тем, что значения показателей, одноименных по номенклатуре, определяются двумя факторами:

- одноименные показатели определяются по одной и той же шкале с установленным параметрическим рядом значений;
- все показатели определяются в относительных единицах значимости по сравнению с диапазонами значений лучшего и худшего качества, соответствующих граничным условиям допустимого варьирования установленных параметров.

3. Третьим, принципиально важным достоинством сформулированного способа оценки качества объектов является его универсальность.

Сформулированная комплексная целевая функция является инвариантной к номенклатуре показателей и различным целевым требованиям к их оптимальности. По составу показатели могут быть любыми, также различными могут быть и целевые требования к их значимости, устанавливаемые при проектировании и решении конкретной проектной задачи. Например, при оценке и ранжировании поверхностей детали для определения их предпочтения при выборе технологических баз, номенклатура показателей определяется только геометрической характеристикой, а целевые требования формулируются с позиции обеспечения точности установки.

При решении следующей задачи – выбора СТО для базирования, установки и обработки детали в технологической системе, соответственно могут быть учтены как требования обеспечения точности,



так и требования экономичности различных вариантов СТО.

### **3.3. ИНФОРМАЦИОННАЯ БАЗА ПРОИЗВОДСТВА**

#### **3.3.1. ТРАДИЦИОННЫЕ СПОСОБЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Решение задач для достижения цели выполняется на этапе технологической подготовки производства (ТПП) при наличии соответствующей информационной базы (ИБ). Обеспечение решений, принимаемых с позиции цели, определяет необходимость следующих составляющих ИБ:

- нормативно-справочное информационное обеспечение – совокупность сведений, определяющих правовые нормы проектирования, и справочная информация, необходимая для проектирования, реализации производства и достижения цели;
- математическое обеспечение – совокупность математических методов, алгоритмов, моделей и функций, необходимых для проектирования, реализации производства и достижения цели;
- методическое обеспечение – совокупность методов, алгоритмов и норм, устанавливающих состав документов, задач, порядок их решения, правила отбора и эксплуатации средств, необходимых для проектирования, реализации производства и достижения цели;
- лингвистическое обеспечение – совокупность языков проектирования, национальных языков, включая термины, обозначения и определения их понятий, методы сжатия и развертывания описаний, необходимых для проектирования, реализации производства и достижения цели.

В различных условиях производства ИБ включает описания, представляемые на различных носителях информации, в том числе в документации различных форм, с использованием разнообразных языков: национальных, проблемно-ориентированных, машинных.

При этом по способу представления информации языки могут быть:

- графические – чертежнографические, схемографические;
- текстовые – алфавитные, цифровые, символные;
- звуковые;
- комбинированные.

Наличие многообразных языков, обозначающих идентификаторов и синонимов, носителей и источников информации, соответствующих мест хранения информации – ведет к избыточности ИБ более высокой, чем необходимо и достаточно. Затраты на поиск мест хранения разнообразных кодов, обозначений и синонимичных характеристик, на лингвистическое преобразование эквивалентных характеристик для представления их в документации различных форм (ТД, КД, ПД), составляют значительную и непроизводительную часть времени производства.

### **3.3.2. ПОКАЗАТЕЛИ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗДЕЛИЙ (СРЕДСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ)**

Конструктивные (технические, технологические) характеристики средств производства определяются в зависимости требуемых – технически заданных (ТЗ) показателей изготавливаемой, перемещаемой и выпускаемой продукции. Продукция машиностроения, в свою очередь, является средствами технологического оснащения (СТО) производства. Иными словами, изделия на стадии выпуска имеют «техническую» характеристику, которая отражается в конструкторской документации (КД), а на стадии эксплуатации характеристика того же изделия определяется как «технологическая» и отражается в технологической документации (ТД). При этом, очевидно, что номенклатура показателей, отражающих статические и динамические характеристики СТО в конструкторской и технологической документации, должна быть одной и той же. Соответственно, формы и, следовательно, оформление КД не должно отличаться от форм и оформления ТД.

Формы документации, оформление КД и ТД, т.е. формы носителей информации – терминология, символы и обозначения, регламентированные «Едиными системами» стандартов – ЕСТПП, ЕСКД, ЕСТД, значительно отличаются. Наличие отдельных систем стандартов по ТПП, КД, ТД указывает на то, что это не единая система, что отсутствует общая их взаимоувязка и унификация информации, необходимые для целесообразно эффективного производства. При этом также очевидно, что и номенклатура показателей качества изделий должна включать все те же («технические», «технологические») показатели, отражающие статистические и динамические характери-

стики физических свойств этих объектов в соответствии с назначением.

Как было отмечено, значительные отличия и многообразие форм документации, форм представления информации, формальных языков, а также неоднозначность терминов и обозначений – ведут к неоднозначной идентификации и характеристике объектов, синонимичной и избыточной информации. Это приводит к непроизводительным затратам одного из невозполнимых ресурсов производства – времени. Время тратится на изучение многочисленных формальных языков, на поиски информации в различных носителях и классификаторах, на многократное преобразование информации. Более того, многочисленные эквивалентные преобразования и дублирования информации разнообразными обозначающими ходами – ведут к появлению ошибок и неоднозначным оценкам характеристик объектов.

Наибольшая неоднозначность проявляется при переходе от графического к текстовому описанию объектов. Использование, наряду с текстовой информацией, графических характеристик и соответствующих методов представления производственных решений связано с двумя факторами.

Во-первых, образное графическое представление объектов легче и однозначнее понимается человеком, хотя для машинной обработки информации является сложной.

Во-вторых, и это главное – для некоторых важнейших свойств не установлено математическое обеспечение для соответствующей параметрической формализации, характеристики и оценки объектов.

В частности, к таким свойствам относится форма (конфигурация) тел и поверхностей. Хотя отклонения формы от прямолинейности, от круглости, от цилиндричности и т.д. физически измеряются – для показателей непосредственно формы не установлены количественные меры – параметрические ряды показателей. Традиционно «считается», что параметрические показатели являются «количественной» характеристикой объекта, а метрологически неформализованные – его «качественной» характеристикой. Наличие таких «качественных» показателей качества является лишь следствием того, что для рассматриваемых свойств не установлены параметрические ряды и соответствующие шкалы числовых мер.

При параметрической – количественной неопределенности установить понижается или повышается качество в соответствии с целевыми требованиями не представляется возможным. Поэтому ка-

ественная характеристика объектов может быть дана лишь с использованием количественных показателей и соответствующие требования регламентируются национальными и международными стандартами при оценке производственных решений и выпуске продукции.

Показатель качества продукции – количественная характеристика одного или нескольких свойств продукции, составляющих ее качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям ее создания и эксплуатации или потребления.

При наличии параметрически-количественных показателей лучшее качество объекта определяется большим или меньшим размерным значением его параметров в соответствии с назначением и целевыми требованиями – потребностью. Например, с позиции экономических требований количество затрат производственных ресурсов должно быть наименьшим, а количество произведенной продукции – наибольшим, линейные размеры объектов должны быть наименьшими, а их допустимые отклонения допуски – наибольшими, стоимость работ – наименьшая, а скорость рабочих действий – наибольшая и т.д. по всей номенклатуре параметрических показателей оцениваемых объектов и производственных решений.

Для характеристики форм, также как и для степени закрытости поверхностей и тел не установлена параметрическая формализация, используются лишь безразмерные, именованные обозначения этих свойств и их кодирование. Код – всего лишь знак или совокупность знаков, принятых для обозначения, а не для меры объектов классификации и, в том числе, классифицируемых свойств.

Профессор Соколовский А.П. одним из первых включил показатели формы в ряд основных классификационных признаков деталей машин. Однако, в классификаторе Соколовского А.П. классификационные группировки изделий выделяются по совокупному сочетанию ряда показателей: форма основных поверхностей, размеры детали, качество и шероховатость обрабатываемых поверхностей, характеристика материала.

Недостатком такой классификации является группировка подобных изделий по сочетанию множества свойств, что приводит к огромному числу групп и типов. Так, одна только группа валов может иметь 81 тип. Иллюстрированный определитель деталей общемашиностроительного применения, разработанный на такой основе, представляет классификатор с объемом информации в 238 страниц.

Вместе с тем, классификация различных сборных изделий осу-

ществляется не по сочетанию множества свойств, а по параметрическим рядам отдельных частных показателей. Например, по количеству рабочих позиций и рабочих органов выделяют: однопозиционные и многопозиционные, одноинструментальные и многоинструментальные, одношпindelные и многошпindelные. По массе и соответствующей грузоподъемности: сверхлегкие, легкие, средние, тяжелые, сверхтяжелые. По точности: нормальной, повышенной, высокой, особо высокой и особо точной характеристики и т.д. по различным параметрическим рядам изделий.

### **3.3.3. СПОСОБ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ, ОТВЕЧАЮЩИЙ ЦЕЛЕВЫМ ТРЕБОВАНИЯМ**

Использование иерархического метода классификации позволяет параметрически упорядочить различные геометрические и физические свойства объектов, а также установить соответствующие параметрические ряды. Параметрические ряды показателей свойств позволяют давать оценку характеристики объектов в функции целевых требований к качеству их свойств и принимать соответствующие оптимальные производственные решения.

Параметрический ряд – последовательный ряд числовых значений параметра, построенный на основе принятой системы градации, т.е. шкалы.

Иерархический метод классификации – последовательное разделение множества объектов на подчиненные группировки.

Признаком, по которому производится классификация, качественная оценка и сертификация, может быть комплексная характеристика объекта или отдельные свойства. Таким образом, на основе установленного порядка иерархии отдельных свойств: прочности, твердости, геометрических форм, степени подвижности, степени закрытости и т.д. может быть сформировано необходимое математически-метрологическое обеспечение для характеристики и оценки этих свойств. К настоящему времени для некоторых свойств установлены даже не по одной, а по несколько шкал. Например, твердость может определяться по шкалам Бринеля, Роквелла и др. При наличии иерархических шкал для геометрической формы и закрытости, этим свойствам можно давать параметрическую характеристику, как и другим

геометрическим показателям, для которых установлены параметрические ряды (линейных и угловых размеров, поверхностных и объемных размеров, степеней и классов точности, допусков формы и погрешностей других свойств). Тем более, что имеются многочисленные средства измерения погрешностей формы и установлены допуски, позволяющие по допустимым отклонениям определять переход этого свойства от одного иерархического уровня к другому: от прямой – прямолинейной формы к ломано-угловой, от ломано-угловой к круглой, от круглой к круглоконической, от круглоконической к цилиндрической и т.д. При этом, очевидно, форма должна определяться формообразующим профилем и контурной картиной поверхности согласно их международного понятия (СТ ИСО 4287 1-84).

Для построения иерархически упорядоченной шкалы, аналогично шкале отклонений форм, шкалам шероховатости, твердости и т.д., необходимо установить принцип количественной оценки рассматриваемых свойств. Учитывая, что для оценки отклонений форм положен принцип прилегающих линий, поверхностей и базовых длин (СТ ИСО 4287 1-84, СТ ИСО 1132-80, ГОСТ 24642-81, ГОСТ 25526-82), этот принцип целесообразно принять основополагающим и для определения метрологически-математической формой характеристики форм.

Из рассмотренных положений следует, что для равнозначного описания и однозначной оценки качества многомерных объектов необходимо выполнить два условия.

Во-первых, необходимо установить эквивалентное – равнозначное соответствие языков, используемых для лингвистической идентификации и характеристики объектов, их свойств и параметров.

Во-вторых, для оценки различных свойств и характеристики объекта требуется информационная база с формализованным математически-метрологическим обеспечением.

# ГЛАВА 4

## РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

### 4.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Процесс проектирования представляет собой многоэтапную последовательность принятия технических решений в соответствии с определённой (предварительно сформулированной) целью. Техническое проектирование, как процесс, относится к области технического творчества человека и непосредственно связано с его мыслительной деятельностью. Существенные особенности и отличия (по сравнению с эвристической деятельностью человека) имеет компьютерное техническое проектирование, которое связано с «машинной» обработкой данных и знаний. Применительно к машиностроению результаты проектирования воплощаются в виде тех или иных технических систем (инженерные объекты, изделия, продукция и т.п.). Техническими системами могут быть конструкции и процессы. Причём, любая конструкция предназначается для реализации какого либо технического или технологического процесса. Техническую систему, реализующую технологический процесс, называют технологической системой. Рассмотрим исходные теоретические предпосылки технического проектирования.

#### Производственные потоки в технических системах

В соответствии со схемой, приведенной на (рис.4.1) можно выделить следующие производственные потоки: поток материалов (блок 1.1), поток информации (блок 1.2), поток энергии (блок 2.1) и поток затрат (блок 2.2).

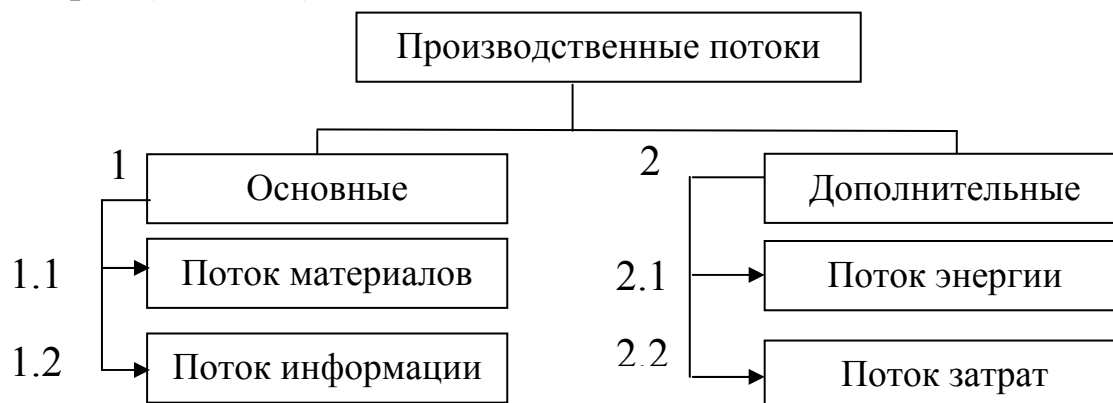


Рис. 4.1. Классификация производственных потоков.

Взаимосвязь производственных потоков (рис.4.2) предполагает наличие некоего связующего процесса, которым, как можно предположить, является процесс управления производством.

Поток

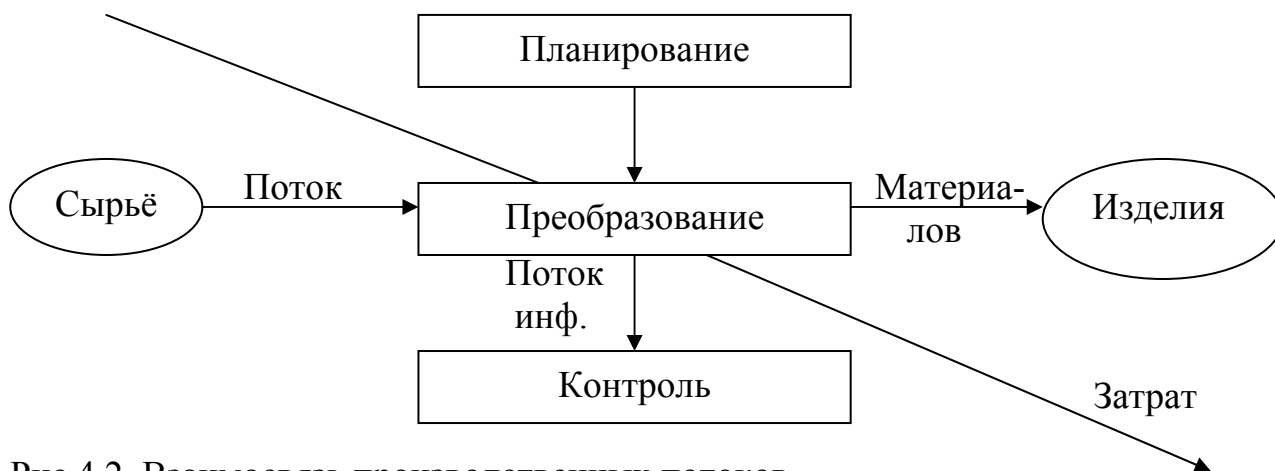


Рис.4.2. Взаимосвязь производственных потоков.

Как следует из анализа рис.4.2, поток информации взаимосвязан с другими потоками и позволяет направлять (координировать) их для достижения цели производства при наименьших затратах. Можно предположить, что связующим процессом между потоками информации и другими потоками является процесс управления (на рис.4.2 не показан), т.е. взаимосвязь процессов обработки информации и мате-

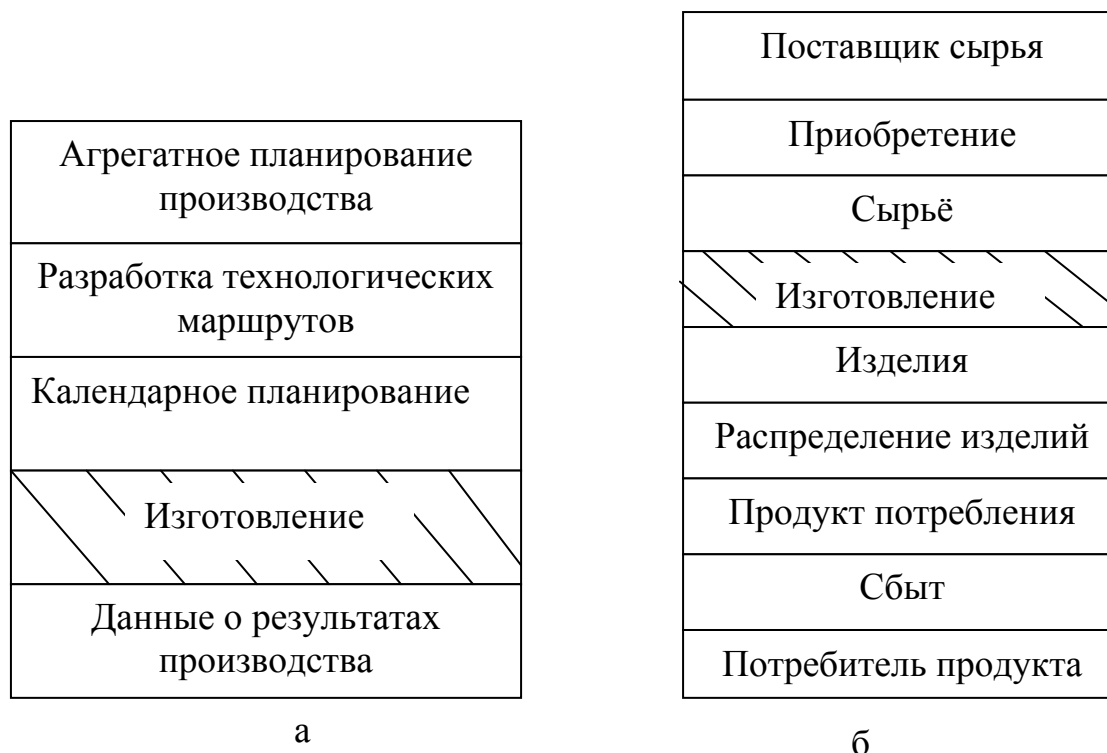


Рис. 4.3. Схема движения потоков информации (а) и материалов (б).



риалов осуществляется через процесс управления.

Анализ схем движения потоков информации и материалов (рис.4.3) показывает, что они имеют общий блок (этап изготовления продукции), который оказывает влияние на оба указанных потока и является подтверждением их неразрывности (на рис.4.3 этот блок заштрихован). Кроме того, видно, что структурные схемы этих потоков (рис.4.3) характеризуют отдельные стороны (информационную и материальную) интегрированной системы жизненного цикла изделия (рис.4.4).



Рис. 4.4. Структура жизненного цикла изделия.

## Процессы обработки информации и материалов

Движение информации и материалов в производственной системе сопровождается их соответствующими преобразованиями, которые могут быть названы обработкой (processing).

*Обработка материалов (material processing)* – это последовательность физических (механических) операций (действий), сопровождаемых изменением их качественного состояния (формы, размеров, структуры и т.п.). Примерами таких операций являются техноло-

гические операции изготовления изделий (обработка, сборка). Характерная особенность обработки материалов – существенное потребление ресурсов (материальных, энергетических).

*Обработка информации (information processing)* – это последовательность математических (абстрактных, символических, алгоритмических, лингвистических, семантических и т.п.) операций, производимых по неким формальным правилам на основе алгоритмических процедур. Характерная особенность операций обработки информации – незначительное (по сравнению с обработкой материалов) потребление энергии (энергия, потребляемая, например компьютером, во много раз меньше энергии, потребляемой электродвигателями металлорежущего станка). Последние 40-50 лет без преувеличения можно назвать временем развития информационных индустрий. Информационные технологии охватывают все области человеческой деятельности, включая политику, экономику, промышленность, образование, искусство и другие.

Таким образом, процесс проектирования относится к числу процессов обработки информации в производственных системах и возможен на основе эвристической деятельности человека. Однако эта деятельность должна быть основана на определённой методологии технического творчества. Такой методологией в настоящее время является общая теория систем, частным случаем которой является теория технических систем. Однако общая теория систем, больше известная как системный подход, не в полной мере соответствует специфическим особенностям компьютерного (безлюдного) проектирования, что сдерживает развитие этого направления информационной индустрии. Нами предложена новая методология технического творчества – общая теория управления, характерными признаками (атрибутами) которой являются следующие [182]: 1) цель управления; 2) объект управления; 3) управляющий орган; 4) обратная связь (общая, местная); 5) информационная технология (преобразование и использование информации); 6) память (накопление прошлого опыта и текущих результатов); 7) информационная модель объекта.

Предпосылками этой методологии является взаимосвязь процессов обработки информации и материалов. Они взаимодействуют, оказывая влияние друг на друга, обладают относительной самостоятельностью, однако полностью их разделить нельзя. Общим блоком этих процессов является этап изготовления продукции (материальный физический процесс) в ходе которого происходит обработка материалов

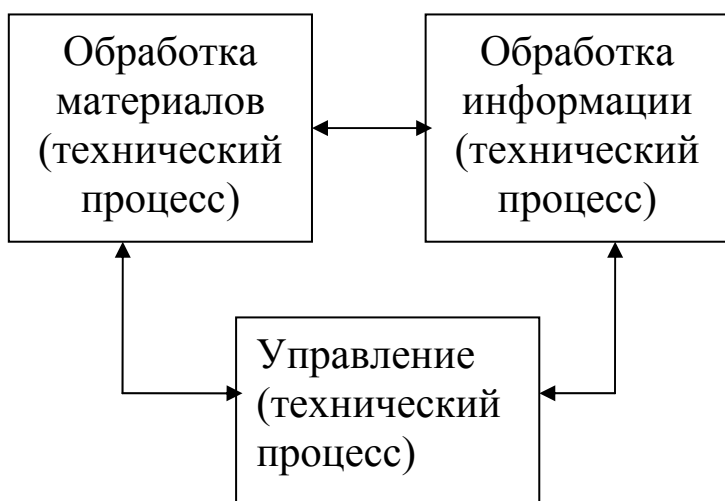


Рис. 4.5. Взаимодействие технических процессов в интегрированной технической системе жизненного цикла изделия.

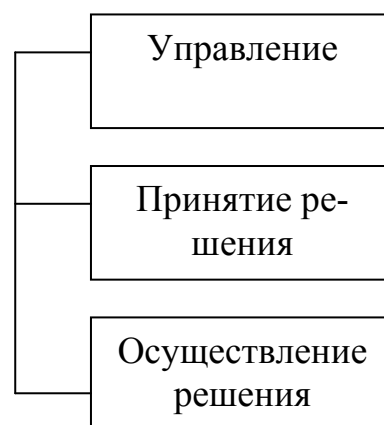


Рис. 4.6. Обобщённая характеристика процесса управления.

и при этом возникает новая информация. Эту информацию необходимо учитывать, принимая соответствующие (информационные) решения, чтобы оптимизировать указанный выше материальный (физически осуществляемый) процесс (т.е. направлять процесс по требуемой траектории изменения его параметров). Отсюда приходим к заключению, что в рамках единой интегрированной технической системы (жизненного цикла изделия) процесс обработки материалов оказывает влияние на процесс обработки информации, а процесс обработки информации оказывает влияние на процесс обработки материалов. Отмеченное взаимовлияние двух указанных технических процессов осуществляется посредством ещё одного технического процесса – процесса управления (рис.4.5).

В свою очередь, управление в самом общем виде – это совокупность процедур по принятию и осуществлению решений, направленных на достижение предварительно поставленных целей (рис.4.6).

## 4.2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ТИПОВЫХ И ГРУППОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Развитие компьютерных технологий возможно только на основе системной методологии технического творчества, которая в свою очередь должна быть основана на определённых технологических принципах и подходах, апробированных в технологии машино- и приборостроения. К числу таких основополагающих принципов мож-

но отнести известные принципы построения типовых и групповых технологических процессов, основанных в свою очередь на идеях стандартизации и унификации средств технологического оснащения (СТО). Дискретные ряды СТО по номенклатуре и размерам предполагают использование имеющихся в распоряжении технолога (и конструктора) позиций, всякое отсутствие которых приводит к резкому возрастанию трудоёмкости и себестоимости технологических процессов. Например, при разработке единичных технологических процессов изготовления (обработки и сборки) сходных изделий работа технолога многократно повторяется, подобно тому, как при выполнении компьютерной программы часто используются одни те же подпрограммы. Исходя из здравого смысла эти (одни и те же) подпрограммы не нужно каждый раз разрабатывать. Однажды разработанную подпрограмму следует многократно применять. Поэтому основная трудность при проектировании технологических процессов на основе имеющихся унифицированных (типовых и групповых) заключается в поиске, заимствовании и выборе соответствующих ранее разработанных данных. Естественно, что такая работа наиболее эффективно может быть выполнена при использовании компьютерных технологий технического творчества. Собственно говоря, именно это обстоятельство и вызывает повышенный интерес к технологическим основам построения унифицированных технологических процессов и необходимости их совершенствования применительно к компьютерному проектированию. Здесь под совершенствованием понимается прежде всего разработка алгоритмического обеспечения компьютерного проектирования, т.е. умело проведенная формализация принятия технологических решений.

### **Основы построения унифицированных технологий**

Основу построения типовых технологических процессов составляет общность конструктивных элементов (признаков, особенностей) изделий и вытекающая из этого общность технологии их изготовления (обработки и сборки). Типизация технологических процессов является основной формой их стандартизации [344]. Она способствует снижению затрат на разработку технологических процессов, ускорению этих разработок, а также уменьшению трудоёмкости и себестоимости производства изделий. Цель типизации – стандартизовать технологические процессы для того, чтобы обработка и сборка одинако-

вых и сходных по конструкции изделий осуществлялась одними и теми же, наиболее совершенными и эффективными методами, при использовании одних и тех же СТО (оборудование, приспособления, инструмент, средства механизации и автоматизации и т.п.). Типизация позволяет устранить повторение одних и тех же работ технолога и, следовательно, сократить длительность и объём технологической подготовки производства. Известны три направления типизации: технологических процессов безотносительно к изделиям; технологических процессов с учётом реальных изделий; на основе сочетания первого и второго случаев [344]. На наш взгляд первое направление обеспечивает преемственность между типовыми и групповыми технологиями.

Первым и наиболее важным этапом типизации технологических процессов является классификация изделий машино- и приборостроения по конструктивным признакам изделий и их размерам. Каждый класс изделий разбивают на подкласс, затем – на группы и подгруппы. Для изделий, входящих в одну классификационную группу, обобщают решения технологических задач с целью исключения индивидуального подхода при разработке технологических процессов обработки и сборки конкретных изделий и их элементов. Отсюда следует, что общность конструктивных элементов изделий не является достаточной для классификации, которая в своей основе должна иметь технологический характер. Например, совершенно одинаковые по конструктивным признакам детали, но изготавливаемые из разных материалов (чугун, сталь, цветные сплавы или пластмасса) часто не могут быть объединены термином «типовое изделие». Типовое изделие (или его составная часть) объединяет совокупность изделий, имеющих одинаковый технологический маршрут или план операций, осуществляемых на однородном технологическом оборудовании с применением однотипных приспособлений и инструментов. Кроме того, классификация должна учитывать тип производства, частоту сменяемости объекта производства, технические требования и условия к этому объекту и т.п. Таким образом, сложность классификации заключается в том, что классификационные признаки только частично содержатся в конструктивном исполнении изделий. Другая (невидимая явно) часть этих признаков вытекает из общности технологических процессов и систем.

Вторым этапом типизации технологических процессов изготовления изделий является разработка принципиально общего техноло-

гического процесса с установлением типовой последовательности и типового содержания операций, типовых схем базирования и типовых конструкций технологической оснастки. Если изделия достаточно полно унифицированы, то на них составляют одну общую технологическую карту, содержащую даже нормы времени. При меньшей степени унификации разрабатывают принципиальный технологический процесс, на основе которого составляют технологические процессы для конкретных изделий. По мере совершенствования технологии обработки деталей и сборки изделий типовые технологические процессы необходимо периодически корректировать. Разработанные типовые процессы обработки и сборки оформляют на картах типовых технологических процессов. Эти процессы целесообразно применять на заводах и фирмах серийного и массового производства с устойчивой номенклатурой изделий. В тоже время для условий индивидуального, мелкосерийного и серийного производства выгодно применять принципы групповой технологии.

Основу групповых технологических процессов обработки и сборки составляет, прежде всего, общность технологических переходов и операций, а также СТО. Возможна также частичная общность конструктивных элементов изделий. В этом случае применительно к механической обработке разрабатывают так называемую комплексную деталь, а применительно к сборке – комплексное изделие. Комплексная деталь предопределяет комплект используемого при обработке режущего и мерительного инструмента. Поэтому фактическое наличие инструмента может оказывать влияние на количество деталей в группах (или подгруппах) и, следовательно, на конструктивное исполнение комплексной детали. Принципы групповой технологии позволяют в условиях индивидуального, мелкосерийного и серийного производства осуществлять технологические процессы изготовления изделий, характерные для крупносерийного и массового производства, переходить к поточному производству [180, 182, 344]. Повышается непрерывность, прямоточность и ритмичность производства. Возможна организация групповых поточных линий, когда оборудование располагают по маршруту изготовления деталей или изделий, входящих в группу. Так при групповой сборке все закреплённые за линией изделия собирают периодически пропускаемыми партиями, и в каждый данный момент линия работает как непрерывно-поточная. Переход от сборки одного изделия к другому возможен без переналадки линии или при частичной и несложной переналадке. Оборудо-

вание линии комплектуют и располагают по технологическому маршруту сборки наиболее сложного и трудоёмкого изделия в группе – комплексного изделия. Другие изделия группы можно собирать с пропуском отдельных переходов и операций. Реже используют другой способ групповой сборки, когда на линии одновременно собирают весь комплект изделий группы [344]. В этом случае линия всё время работает как непрерывно-поточная без переналадки оборудования. Приспособления для такой сборки многоместные, более сложные и более крупных размеров. Таким образом, принципы групповой технологии позволяют обеспечить при сборке собираемость стандартизованных и унифицированных деталей в механизме, а при их обработке – наименьшую номенклатуру используемых станочных приспособлений и применяемого режущего и мерительного инструмента.

На разработку группового технологического процесса затрачивают значительно больше времени, чем на индивидуальный процесс, однако в расчёте на отдельно взятое изделие затраты на технологическое проектирование снижаются в несколько раз. На снижение себестоимости изготовления продукции влияет стандартизация и унификация технологической оснастки и увеличение размера партии (для серийного производства).

Применительно к компьютерным технологиям несомненный интерес и значение имеют алгоритмы формирования групп и подгрупп изделий из имеющихся в компьютерной базе данных технологических маршрутов изготовления отдельных деталей и изделий. Одним из таких алгоритмов может быть следующий (разработан совместно с Челюпановым Г.М.). Пусть имеются, например, три приведённые ниже маршрута (для трёх разнотипных деталей).

1. ЗАГ – ТОК – СЛ – ФРГ – СЛ – ГАЛ – К.
2. ЗАГ – ТОК – СЛ – СВ – ТО – ШЛ – К.
3. ЗАГ – ФРГ – СЛ – СВ – ТО – ШЛ – К.

Здесь введены обозначения операций: ЗАГ – заготовительная, ТОК – токарная, СЛ – слесарная, ФРГ – фрезерно-горизонтальная, ГАЛ – гальваническая, К – контрольная, СВ – сверлильная, ТО – термообработка, ШЛ – шлифовальная. Общность технологических операций позволяет сгруппировать указанные детали следующим образом (в скобках указано количество деталей в группе): ЗАГ(3), ТОК(2), СЛ(3), ФРГ(2), ТО(2), ШЛ(2), К(3). В свою очередь сформированные группы могут быть разделены на подгруппы по общности технологического оборудования и технологической оснастки (станочные при-

способления, режущий и мерительный инструмент). Например, группа деталей ТОК(2) может быть разделена на подгруппы в зависимости от диаметра (по шкале интервалов), длины (по шкале интервалов) и материала обрабатываемого прутка, класса точности токарного станка и т.п. (в группе может быть больше, чем указанные 2 детали, например, 20 или 200 деталей). Критерием правильно сформированной подгруппы, очевидно, является возможность непрерывной (без существенной переналадки) обработки всех деталей, входящих в подгруппу. Другими словами, переналадка оборудования производится только при переходе на обработку деталей из другой подгруппы. Описанный алгоритм формирования технологических подгрупп можно назвать алгоритмом последовательного отсеивания деталей. Этот алгоритм позволяет, во-первых, наглядно продемонстрировать один из возможных способов формирования технологических подгрупп и, во-вторых, является примером формализации технологических решений применительно к компьютерному проектированию технологических процессов и систем.

В заключении следует отметить характерную особенность унифицированных технологических процессов: с самого начала они разрабатывались как формализованные и, следовательно, в наибольшей степени приспособленные для последующей компьютеризации и ускоренной технологической подготовки производства [197]. Однако технические возможности компьютерной техники долгое время были недостаточными для реализации на практике принципов типовой и групповой технологии. Положение кардинально изменилось с появлением IBM совместимых персональных компьютеров, оснащённых операционными системами Windows. На рынке появились многочисленные программные продукты для компьютерного проектирования технологических процессов и систем (Pro-engineering, TechCard, Master CAM, T-Flex, Компас Автопроект и т.п.). В этой связи резко возрос интерес к алгоритмическому и программному обеспечению компьютерных систем технологического проектирования и, следовательно, к соответствующей технологической литературе.

#### **4.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ**

Возможно применение двух методов решения задачи автоматизированного проектирования станочных приспособлений [385]:



1) использование информационно-поисковых систем (ИПС); 2) алгоритмический синтез конструкций приспособлений на базе элементарных типизированных проектных решений. ИПС (рис.4.7) позволяют осуществлять поиск, расчёт и последующее документирование типовых конструкций. Алгоритмический синтез сопровождается графическим и текстовым документированием, технологической подготовкой производства, вплоть до разработки управляющих программ изготовления деталей приспособлений на станках с ЧПУ.

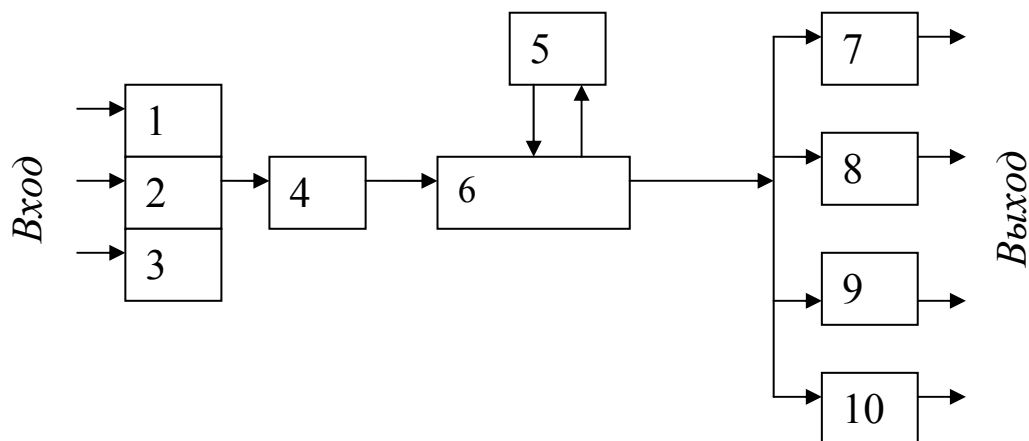


Рис.4.7. Функциональная схема ИПС выбора станочного приспособления.

В соответствии с рис.4.1 на содержание запроса 4 оказывают влияние: требования производства 1, техническое задание на разработку технологического процесса 2 и техническое задание на конструирование оснастки 3. Блок поиска 6 при взаимодействии с базой данных 5 позволяет получить четыре разновидности решений: однозначное решение 7 (с выдачей адреса одного приспособления); многовариантное решение 8 (требующее анализа вариантов и выбора рационального их них); типовое решение-аналог 9 (будет базовым для последующей доработки); отказ 10 (при отсутствии искомой информации).

При алгоритмическом проектировании приспособлений на базе унифицированных решений исходными данными являются описания детали (заготовки) и оснащаемой технологической операции. На основе этих описаний с помощью программ синтеза конструкций компьютерная система САПР генерирует цифровое описание приспособления, которое является исходным для формирования сборочного чертежа приспособления и рабочих чертежей деталей. Далее в подсистеме ТПП приспособлений осуществляется технологическое проектирование процессов и программ обработки деталей приспособления. В результате на печатающем устройстве формируется технологиче-

ская документация и формируется информация для АСУП, включающая управляющие программы для станков с ЧПУ.

Общие задачи автоматизированного проектирования приспособлений включают [385]: 1) преобразование информации из одной формы в другую; 2) инженерные расчёты (на точность, жёсткость, виброустойчивость, прочность и т.д.); 3) выбор схемы конструкции, типов и типоразмеров конструктивных элементов (КЭ); 4) определение числа КЭ и расположения их в пространстве; 5) уточнение расположения КЭ; 6) уточнение размеров и формы КЭ из условий их нерасчленения с другими элементами приспособления; 7) поиск и редактирование данных в информационных массивах.

В интерактивных системах проектирования (наиболее частый случай) функции проектирования распределены между человеком и компьютером. За компьютером рационально закрепить производство расчётов, поиск информации и её отражение в цифровом и графическом виде, преобразование информации из одной формы в другую, построение схем функциональных групп КЭ, предварительную компоновку КЭ, экономическую оценку конструкции и др. За пользователем (конструктором по оснастке) рационально оставить оценку принятых решений; окончательное определение состава и структуры КЭ и конструкции в целом, доработку компоновки приспособления и ряд других функций [385].

Известны такие программные продукты САПР, реализующие метод алгоритмического синтеза: „Кондуктор-1”, „Кондуктор-2ЕС”, „Кондуктор-3”, „Токарь-1М”. Их применяют в различных отраслях машиностроения, что позволяет сократить время проектирования в 8...10 раз и стоимость проектирования в 7...8 раз [385].

#### **4.4. CALS И КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ**

##### **4.4.1. ВСТРОЕННЫЕ ПОДСИСТЕМЫ САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ**

Разрозненные ранее и рассматриваемые, как правило, изолированно системы конструкторского (САПР К) и технологического (САПР Т) проектирования, а также автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) и другие автоматизированные системы управления (АСУ) в настоящее время принято считать компонентами единой системы информационной под-

держки жизненного цикла изделия (ЖЦИ), основанной на применении CALS-технологий. Аббревиатура CALS означает Continuous Acquisition and Life Support. Основные принципы построения CALS следующие [341].

1. Не локальная, а интегрированная компьютеризация (в том числе при проведении научно-исследовательских (НИР) и опытно-конструкторских (ОКР) работ).
2. Единая информационная среда (интеллектуальная компьютерная среда для всех этапов ЖЦИ на основе глобальной сети Internet).
3. Полное электронное определение изделий (электронный макет изделий машиностроения) и, прежде всего, сложных изделий типа летательных аппаратов, газотурбинных двигателей и т.п.
4. Повсеместное применение промышленного оборудования с новым поколением систем ЧПУ на основе IBM совместимых персональных компьютеров (возможна модернизация на этой основе ранее выпущенного оборудования). Сюда же относится применение компьютеризированных координатно-измерительных машин (КИМ), построенных на основе электронной модели изделия.
5. Использование международных стандартов в области CALS-технологий. К числу этих стандартов можно отнести следующие:
  - ISO 10303 (STEP-Standard for Exchange of Product data), позволяющий осуществлять обмен информацией между CAD/CAM-системами управления проектами, представлять данные об изделии для управления изменениями в конструкторско-технологической информации об изделии в условиях виртуального предприятия (функционирует в Internet);
  - ISO 15531 (MAN DAT): представление производственных данных (MAN DAT означает MANufacturing DATa);
  - ISO 99735 (EDIFACT): обмен данными в управлении на предприятии (EDIFACT означает Exchange Data In FACTory).

Проведенный нами анализ состояния вопроса в области CALS-технологий позволил установить, что CALS-стандарты охватывают все этапы ЖЦИ в условиях компьютеризированного производства, причём наибольшую трудность для получения информации имеет этап собственно производства. На этом этапе происходит осуществление результатов проведенного предварительно технологического проектирования. Эта трудность преодолевается при помощи компьютерных систем сбора данных (ССД), которые включаются в состав компьютеризированного технологического оборудования и позволя-

ют выполнять мониторинг фактически выполняемых технологических операций. Нами предложено на основе ССД выполнять технологические подсистемы САПР принципиально нового типа - встроенные подсистемы САПР технологических операций. В отличие от классических САПР, основанных на применении предварительно полученных эмпирических данных, встроенные подсистемы получают информацию от реально выполняемого процесса, Это позволяет, с одной стороны, оптимизировать режимы выполнения технологических операций и переходов с учётом индивидуальных особенностей элементов функционирующей технологической системы, с другой – использовать собранную в ССД информацию в общезаводской системе управления качеством продукции. Ниже рассмотрено два примера таких разработок применительно к операциям шлифования резьбы прецизионных ходовых винтов передач «винт-гайка качения».

#### **4.4.2. КОМПЬЮТЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ФИНИШНОГО РЕЗЬБОШЛИФОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПО КРИТЕРИЮ ТОЧНОСТИ ШАГА РЕЗЬБЫ**

При обработке ходовых винтов на точность резьбошлифования оказывают влияние случайные факторы, в частности осевые температурные и остаточные деформации обрабатываемых деталей. Поэтому для высокоточной обработки резьбы прецизионных ходовых винтов помимо обеспечения точности резьбошлифовального станка (РШС) необходимо использование рациональной технологии финишного резьбошлифования.

Для повышения стабильности технологического процесса резьбошлифования современные модели РШС оснащаются системами ЧПУ, позволяющими запрограммировать рабочий цикл резьбошлифования. В этом случае исключается влияние субъективных факторов на качество обработки, вследствие чего увеличивается производительность обработки и точность шага резьбы. Однако опытная эксплуатация РШС с ЧПУ показала, что даже на автоматических станках не удастся обеспечить стабильность шага, особенно для винтов второго и первого классов точности. Например, винты 63x10 мм с длиной резьбовой части 1200 мм после обработки имели колебание накопленной погрешности шага от 13 до 38 мкм, хотя технология и режимы обработки были неизменными [452]. Система активного контроля осевого удлинения винта при резьбошлифовании, которой

оснащен станок с ЧПУ, не позволяет вовремя корректировать технологию и режимы резьбошлифования, так как влияние технологического перехода на величину этого удлинения может быть выявлено только по окончании данного технологического перехода.

На практике существуют несколько способов повышения точности финишного резьбошлифования, например, в работе [401] описан способ, в соответствии с которым на выбранных режимах обрабатывается первая деталь из партии. Затем обработанную деталь выдерживают при температуре помещения и измеряют накопленную погрешность шага. Перед обработкой последующих деталей в коррекционный механизм станка вносится поправка, равная измеренной погрешности. Данный способ позволяет существенно увеличить точность обработки за счет систематических погрешностей, однако он является низкопроизводительным и не учитывает случайные погрешности.

Известен также способ уменьшения при резьбошлифовании случайных погрешностей обработки. В этом случае после каждого перехода измеряют температурные удлинения обрабатываемого винта и ходового винта станка. Разность этих удлинений вносят и в настройку коррекционной линейки РШС. В отличие от предыдущего этот способ учитывает случайное изменение длины обрабатываемой детали и ходового винта станка, вызванное технологией обработки и температурными условиями в цехе. Однако и этот способ имеет существенный недостаток, заключающийся в нерациональном использовании полученной информации, так как частая поднастройка коррекционного механизма в процессе шлифования одной и той же детали изменяет его первоначальную статистическую настройку по предыдущей детали.

В работе, выполненной автором совместно с Ткаченко Б.О., предлагается способ повышения точности резьбошлифования на основе диагностики технологической операции в процессе её выполнения. Способ реализован с помощью системы автоматической диагностики (САД) технического состояния технологической системы резьбошлифования и основан на компенсации случайной составляющей накопленной погрешности шага резьбы на основе управления режимами шлифования и условиями охлаждения заготовок.

Упрощенный вариант системы (рис. 4.8) отражает наиболее важные элементы и связи.

Работа системы диагностики заключается в получении данных

об осевой деформации заготовки в процессе резбошлифования. Эти данные формируются по двум независимым каналам:  $\Delta l_p$  и  $\Delta l_{cp}$  (расчётная и фактическая осевые деформации заготовки, соответственно). Алгоритм работы системы диагностики включает ряд последовательных этапов.

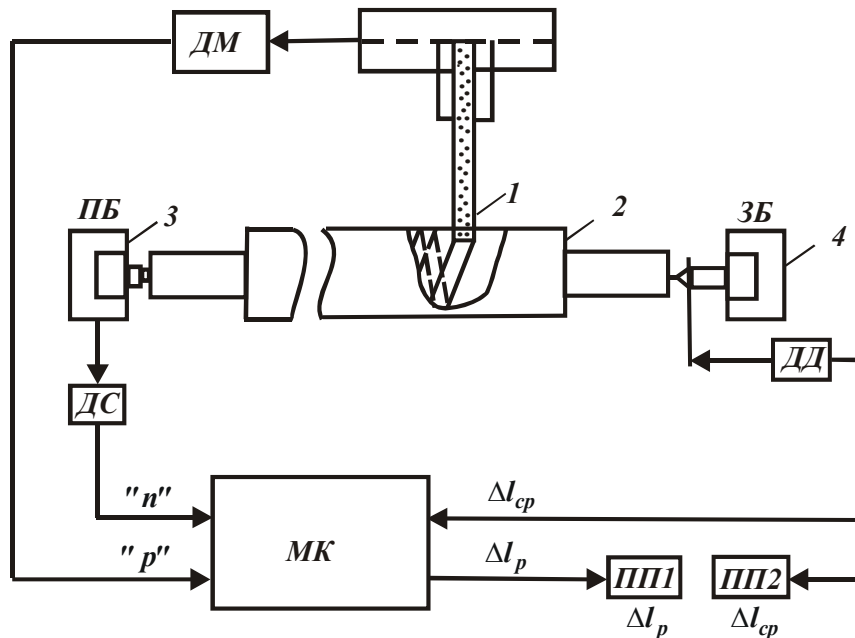


Рис. 4.8. Система компьютерной диагностики процесса резбошлифования: 1 - шлифовальный круг; 2 - заготовка; 3, 4 - передняя и задняя бабки резбошлифовального станка; ДМ - датчик мощности шлифования; ДС - датчик скорости детали (частоты вращения заготовки); ДД - датчик деформации; МК - микроконтроллер.

На первом этапе (на участке врезания шлифовального круга в заготовку) происходит расчет ожидаемой деформации заготовки  $\Delta l_p$  в конце прохода, которая может оказаться не равной фактической деформации  $\Delta l_{cp}$ , которая измеряется датчиком ДД в конце прохода. Отличие в полученных по отдельным каналам данных заключается в том, что расчетную (прогнозирующую) величину  $\Delta l_p$  получают в самом начале очередного прохода резбошлифования в то время как фактическую величину  $\Delta l_{cp}$  получают с опозданием на интервал времени, равный времени прохода.

На втором этапе, начало которого совпадает по времени с окончанием очередного прохода, сравнивают полученные величины  $\Delta l_p$  и  $\Delta l_{cp}$ . При выявлении отличия между ними производят корректировку математической модели процесса таким образом, чтобы результат прогнозирования осевой деформации заготовки по скорректированной математической модели  $\Delta l_p'$  был равен измеренной величине  $\Delta l_{cp}$ . Режим самообучения системы диагностики может быть одно- и

многократным (в зависимости от количества проходов обработки резьбы и предъявляемым требованиям по точности обработки).

На третьем этапе осуществляется прогнозирование величины  $\Delta l_p'$  по скорректированной на предыдущем этапе математической модели. Если прогнозируемая величина  $\Delta l_p'$  не соответствует настройке коррекционной линейки станка, то рабочий – оператор может вносить коррективы в режим обработки резьбы или в условия охлаждения заготовки исходя из обеспечения требуемого соответствия между прогнозируемой осевой деформацией и величиной фактической настройки коррекционной линейки резьбошлифовального станка.

Математическая модель, характеризующая техническое состояние технологической системы многопроходного одностороннего резьбошлифования [452], имеет вид:

$$l_{ij} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \exp(-\mu_n^2 F_{02}) B_i^2}{\mu_n^2 (\mu_n^2 + B_i^2)} \left\{ \frac{q L R L_p \gamma}{s \lambda} \left( 2 F_{01} + \frac{1}{4} - \frac{2}{\mu_n^2} + \frac{1}{B_i} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \exp(-\beta_n^2 F_{01}) \mu_n^2}{\beta_n^2 (\mu_n^2 - \beta_n^2)} \right) + l_{0ij} + (T_B - T_c) L_p \gamma \right\} - \gamma L_p (T_B - T_c), \quad (4.1)$$

где  $l_{ij}$ ,  $l_{0ij}$  - текущее и начальное температурные удлинения заготовки  $i$ -го винта на  $j$ -том технологическом переходе;  $L_p$ ,  $R$  - длина резьбовой части и радиус заготовки;  $F_{0i} = \alpha \tau_i / R^2$  ( $i = 1, 2$ ) - обобщенные переменные Фурье, характеризующие время нагрева  $\tau_1 = L_p a / \nu_\delta R^2$  и охлаждения  $\tau_2 = L_{охл} / \nu_0$ ;  $L_p$ ,  $L$  - длина и ширина контакта реального теплового источника;  $\nu_\delta$ ,  $\nu_0 = \nu_\delta \sin \varphi$  - окружная и осевая скорости заготовки;  $\varphi = \arctg(s / 2\pi R)$  - угол подъема резьбы;  $s$  - шаг резьбы;  $B_i = \frac{\alpha}{\lambda} R$  - критерий БИО;  $\alpha, \gamma, \lambda, a$  - коэффициенты теплообмена, линейного расширения, тепло- и температуропроводности;  $\mu_n, \beta_n$  - корни характеристических уравнений  $I_0(\mu_n) B_i - I_1(\mu_n) \mu_n = 0$  и  $I_1(\beta_n) = 0$ ;  $I_0, I_1$  - функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка;  $T_e, T_c$  - температуры воздуха и СОЖ.

Уравнение (4.1) описывает механизм формирования величины

$l_{ij}$  при финишном резьбошлифовании. Однако вследствие сложности этого уравнения, оно не может быть непосредственно использовано для математического обеспечения управляющей микроЭВМ. В ограниченном интервале изменения переменных  $F_{01}, F_{02}$  и  $B_i$  функция  $l_{ij} = (F_{01}, F_{02}, B_i)$  может быть представлена линейной зависимостью. Например, при  $9,75 \cdot 10^{-5} \leq F_{01} \leq 58,5 \cdot 10^{-5}$ ;  $0,0679 \leq F_{02} \leq 0,2037$  и  $0,1 \leq B_i \leq 1,5$  уравнение (4.1) будет иметь вид

$$l_{ij} = a_1 \frac{P_{ij}}{n_{ij}} - a_2 \frac{P_{ij}}{n_{ij}^2} + a_3 l_{oij} - a_4 \frac{1}{n_{ij}}, \quad (4.2)$$

где  $P_{ij}, n_{ij}$  - мощность резьбошлифования (Вт) и скорость детали (об/мин) на  $j$ -ом технологическом переходе  $i$ -го обрабатываемого винта;  $a_s = (s = 1, 2, 3, 4)$  - коэффициенты, определяемые по следующим формулам:

$$a_1 = 1,276L_p; \quad a_2 = 5,815L_p \\ a_3 = 1 - 9,702/n_{ij}; \quad a_4 = 116,33L_p(T_v - T_c).$$

Для обеспечения адекватности уравнения (4.2) реальному процессу осуществляется автоматическая коррекция этого уравнения при функционировании технологической системы. Наличие микроЭВМ в составе САД позволяет реализовывать принцип самообучения системы. Сущность этого принципа состоит в автоматической корректировке коэффициентов  $a_s$  в уравнении (4.2) на основе сравнения измеренных и вычисленных значений величины  $l_{ij}$ . Для этого используется датчик осевого удлинения винта, а алгоритм коррекции математической модели (4.2) основан на минимизации различия между фактически измеренной ( $l_{\phi ij}$ ) и вычисленной ( $l_{pij}$ ) величинами осевой температурной деформации.

В работе [130] описан алгоритм коррекции математической модели, заключающийся в определении добавок  $\Delta a_p$  к коэффициентам  $a_s$  по формуле

$$\Delta a_p = \frac{\Delta y \frac{\partial f}{\partial a_p} \frac{1}{c_p}}{\sum_{s=1}^k \left( \frac{\partial f}{\partial a_s} \right)^2 \frac{1}{c_s}}, \quad (4.3)$$



где  $\Delta y = (l_{\phi ij} - l_{pij})$  - разность между измеренным и вычисленным значениями прогнозируемой величины;  $f(\cdot)$  - уравнение, по которому производится вычисление прогнозируемой величины;  $c_i$  - весовые коэффициенты, позволяющие регулировать величину и соотношение расчетных добавок  $\Delta a_s$ .

С учетом формулы (4.3) алгоритм определения скорректированных значений коэффициентов математической модели (4.2) будет иметь следующий вид:

$$a'_1 = a_1 + \frac{\Delta y}{Ac_1} \cdot \frac{P_{i1}}{n_{ij}}; \quad (4.4)$$

$$a'_3 = a_3 + \frac{\Delta y}{Ac_3} l_{0i1}; \quad (4.5)$$

$$a'_2 = a_2 - \frac{\Delta y}{Ac_2} \cdot \frac{P_{i1}}{n_{ij}^2}; \quad (4.6)$$

$$a'_4 = a_4 - \frac{\Delta y}{Ac_4} \cdot \frac{1}{n_{i1}}. \quad (4.7)$$

Здесь 
$$\Delta y = (l_{\phi i1} - l_{pi1}), \quad (4.8)$$

$$A = \left( \frac{P_{i1}}{n_{i1}} \right)^2 \frac{1}{c_1} + \left( \frac{P_{i1}}{n_{i1}^2} \right)^2 \frac{1}{c_2} + \frac{l_{0i1}^2}{c_3} + \left( \frac{1}{n_{i1}} \right)^2 \frac{1}{c_4}. \quad (4.9)$$

В результате анализа влияния весовых коэффициентов  $c_i$  ( $i = \overline{1,4}$ ) на точность прогнозирования  $l_{ij}$  в условиях автоматической коррекции уравнения (4.2) математической модели по описанному алгоритму установлено, что существует оптимальное соотношение коэффициентов  $c_i$ , при котором в каждом цикле коррекции корректируется только один из весовых коэффициентов. Например, при последовательной коррекции уравнения (4.2) по коэффициентам  $a_2$  и  $a_4$  алгоритм коррекции имеет следующий вид:

$$a'_2 = a_2 - (l_{\phi i1} - l_{pi1}) \frac{n_{i1}^2}{P_{i1}}, \quad (4.10)$$

$$a'_4 = a_4 - (l_{\phi i2} - l_{pi2}) n_{i2}. \quad (4.11)$$

В описанном способе коррекции идентификация объекта управ-

ления, т.е. технологического процесса финишного резьбошлифования, осуществляется за минимальное время, равное продолжительности одного или двух технологических переходов.

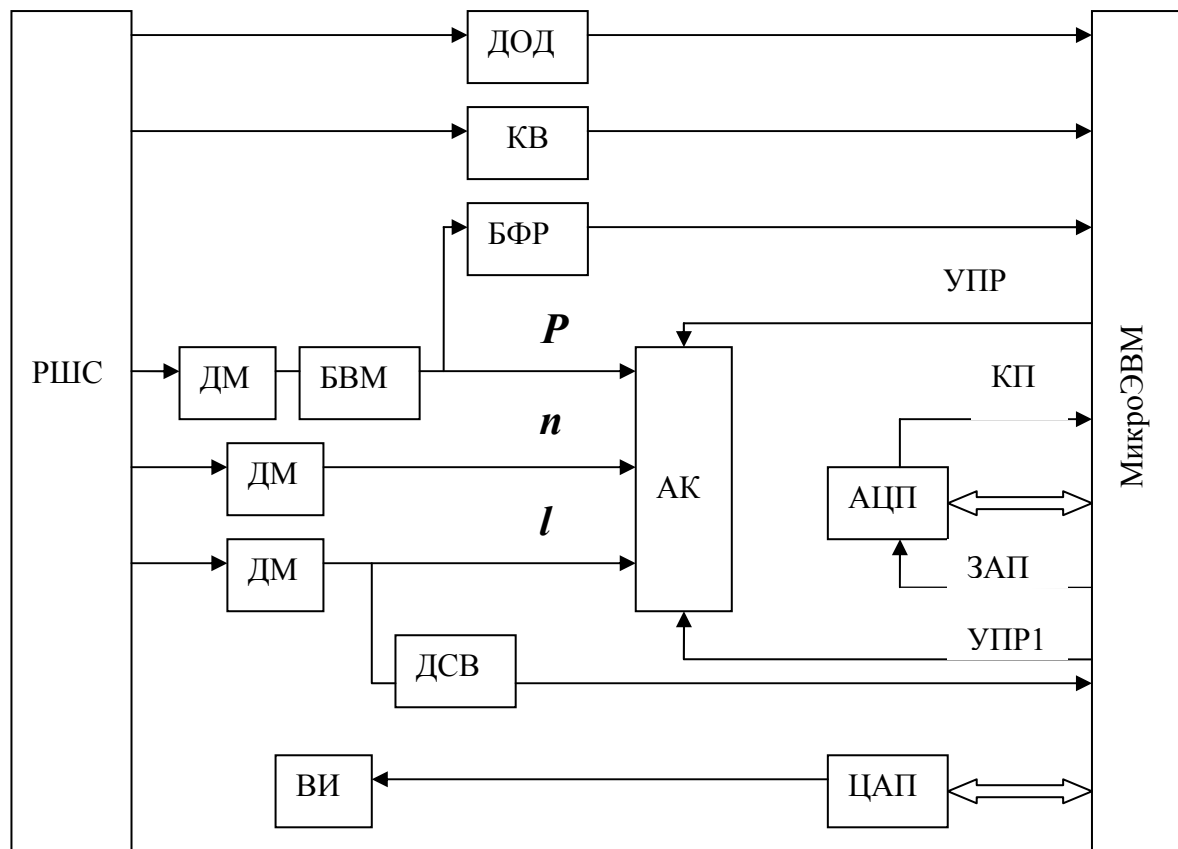


Рис. 4.9. Функциональная схема системы автоматической диагностики: ДОД - датчик оборотов детали; КВ - датчик конца перехода; ДМ - датчик активной мощности; ДС - датчик скорости детали; ДД- датчик осевой деформации детали; ДСВ - датчик смены винта; БВМ - блок вычета мощности холостого хода; БФР- блок фиксации резания; АК - аналоговый коммутатор; АЦП - аналогоцифровой преобразователь; ЦАП - цифроаналоговый преобразователь.

На рис.4.9 приведена функциональная схема, на рис.4.10 – схема алгоритма управления САД. Система работает следующим образом: по команде G5001 резидентная программа “Монитор” осуществляет установку начального адреса управляющей программы (УП), которая предварительно помещена в ПЗУ микроЭВМ. Далее в соответствии с УП устанавливаются начальные значения счетчиков деталей ( $i = 0$ ) и технологических переходов ( $j = 0$ ). После этого система переходит в состояние ожидания сигнала БФР=1.

При врезании круга в обрабатываемую деталь (в начале технологического перехода резьбошлифования) сигнал мощности превышает пороговый уровень, на который настроен БФР, и на выходе это-

го блока появляется сигнал логической единицы, т.е. выполняется условие БФР=1. Затем микроЭВМ вырабатывает сигналы УПР и УПР1 (рис. 4.9) для АК и реализует протокол обмена с АЦП. В ходе этого обмена на выходе АЦП последовательно появляются коды сигналов  $l_{0ij}$ ,  $P_{ij}$  и  $n_{ij}$ , которые поступают в ОЗУ микроЭВМ. МикроЭВМ преобразует поступившие коды в натуральные единицы измерения и по уравнению (4.2) вычисляет прогнозируемую величину  $l_{ij}$ . Результат вычисления преобразуется в восьмиразрядный код целого положительного числа и через ЦАП выводится на внешний аналоговый индикатор-микроамперметр. Канал вывода  $l_{rij}$  настроен таким образом, что величина  $l_{rij}$ , выраженная в микрометрах, соответствует величине тока через микроамперметр (1 мкм соответствует 1 мкА). В этом случае возможно использование стандартного микроамперметра мод. М906 со шкалой 0-50 мкА.

Поскольку результат прогнозирования  $l_{rij}$ , соответствующий моменту окончания технологического перехода, выводится на внешний индикатор-микроамперметр в самом начале этого перехода, то рабочий-резьбошлифовщик имеет возможность, в случае необходимости изменяя режимы резьбошлифования или условия охлаждения заготовки, внести соответствующие коррективы в технологический процесс.

После определения и индикации  $l_{rij}$  САД в течение всего времени технологического перехода находится в состоянии ожидания сигнала КВ=1, появление которого означает окончание технологического перехода. По сигналу КВ=1 осуществляется ввод в микроЭВМ фактической величины деформации  $l_{fij}$ . В результате в ОЗУ микроЭВМ одновременно находятся величины  $l_{rij}$  (получена в начале перехода) и  $l_{fij}$  (получена в конце перехода). Причем величина  $l_{rij}$  представляет собой предварительную (прогнозируемую) оценку  $l_{fij}$ . При идеальном прогнозировании эти величины должны быть одинаковы, т.е.  $l_{rij} = l_{fij}$ . Однако прогнозирование величины  $l_{rij}$  на основе уравнения (4.2) дает погрешность  $\Delta y = (l_{fij} - l_{rij})$ . Для уменьшения этой погрешности проводится коррекция уравнения (4.2) математической модели. При этом в начале каждого технологического перехода на внешний индикатор выводится расчетное значение  $l_{rij}$ , а в конце (при появлении сигнала КВ=1) содержимое счетчика переходов уве-

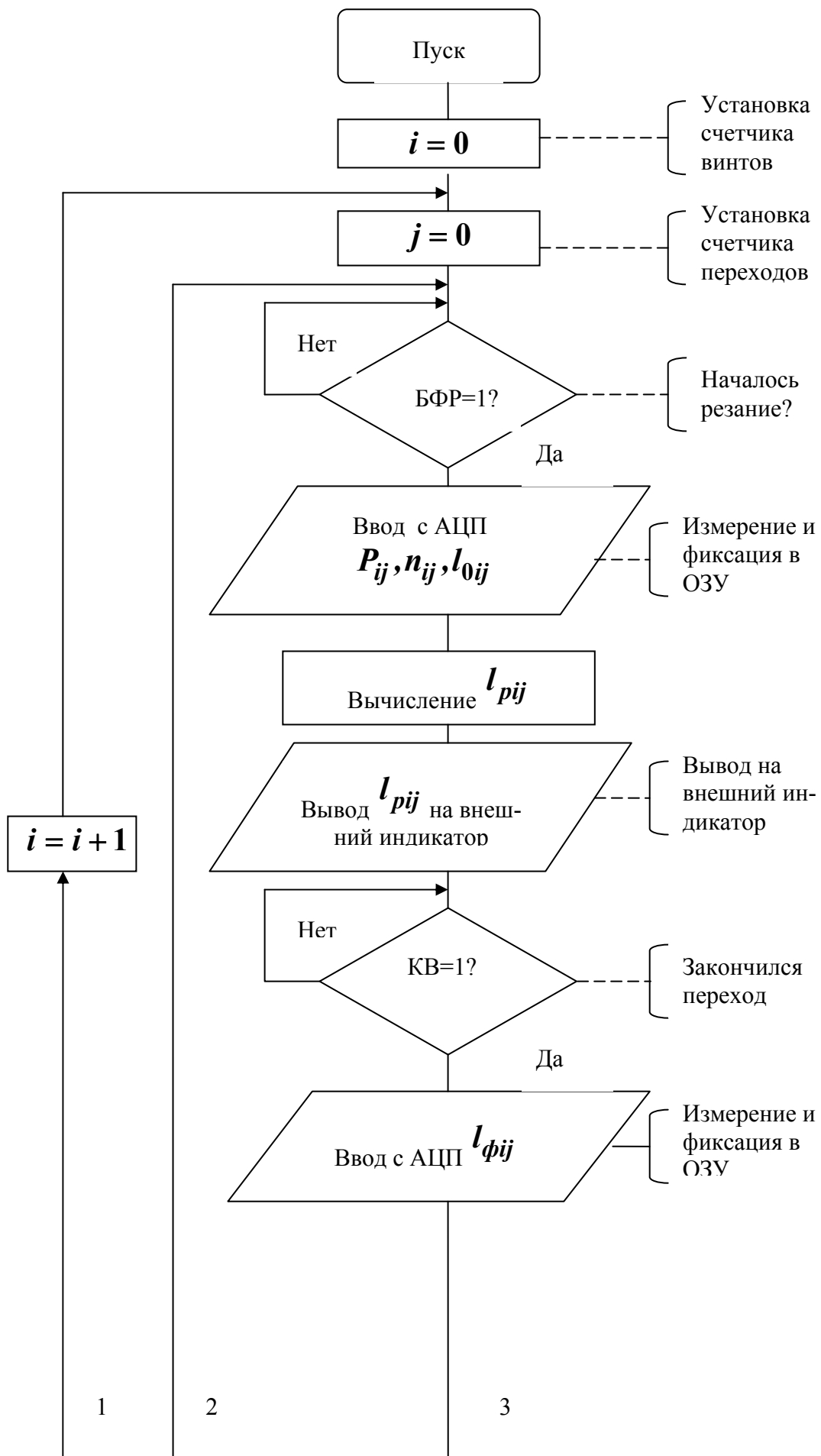
личивается на 1 (блок  $j = j + 1$  на рис. 4.10). Описанный цикл работы САД осуществляется до появления сигнала ДСВ=1, означающего окончание обработки данной детали. При этом содержимое счетчиков деталей увеличивается на 1 (блок  $i = i + 1$  на рис. 4.10).

При функционировании САД в памяти микроЭВМ формируется двухмерный массив информации, который имеет структуру электронной таблицы (база данных). Одна мера (столбцы таблицы) - порядковый номер  $i$  обрабатываемой детали, другая (строки таблицы) - порядковый номер  $j$  технологического перехода. На условном пересечении номера детали  $i$  с номером перехода  $j$  находится запоминающая ячейка, в которой фиксируются следующие параметры:  $l_{0ij}, P_{ij}, n_{ij}, l_{rij}, l_{fij}$ .

Просмотр зафиксированных данных осуществляется с помощью директивы  $S$  встроенного монитора, по которому осуществляется прерывание программы прогнозирования и накопления (сигнал ПП=1 на рис.4.10).

Таким образом, разработанная САД позволяет, во-первых, проводить автоматическую диагностику процесса резбошлифования путем оперативного прогнозирования и индексации осевой деформации  $l_{rij}$  по мере съема припуска; во-вторых, накапливать технологические данные, характеризующие процесс финишного резбошлифования, а также осуществлять просмотр интересующих данных (последовательно или выборочно) по соответствующему винту с номером  $i$  и технологическому переходу с номером  $j$ .

Оценка точности прогнозирования  $l_{ij}$  при работе САД производилась экспериментально на резбошлифовальном станке "Матрикс 5708", оснащенной системой ЧПУ "Фанук", при обработке ходовых винтов с длиной резбовой части 600 мм, диаметром резьбы 61,4 мм, шагом 10 мм и радиусом профиля 3,12 мм. Величина снимаемого припуска составляла 0,3-0,6 мм. Обработка осуществлялась одноточным шлифовальным кругом, имеющим характеристику 92A16CM17K5. В качестве СОЖ использовали масло И-20А. Каждый способ коррекции уравнения (4.2), реализуемый соответствующими управляющими программами, исследовался при обработке партии заготовок не менее 10 шт, причем протоколирование экспериментальных данных  $l_{oij}, P_{ij}, n_{ij}, l_{rij}, l_{fij}$  производилось автоматически при помощи САД, работающей в режиме накопления и прогнозирования данных.



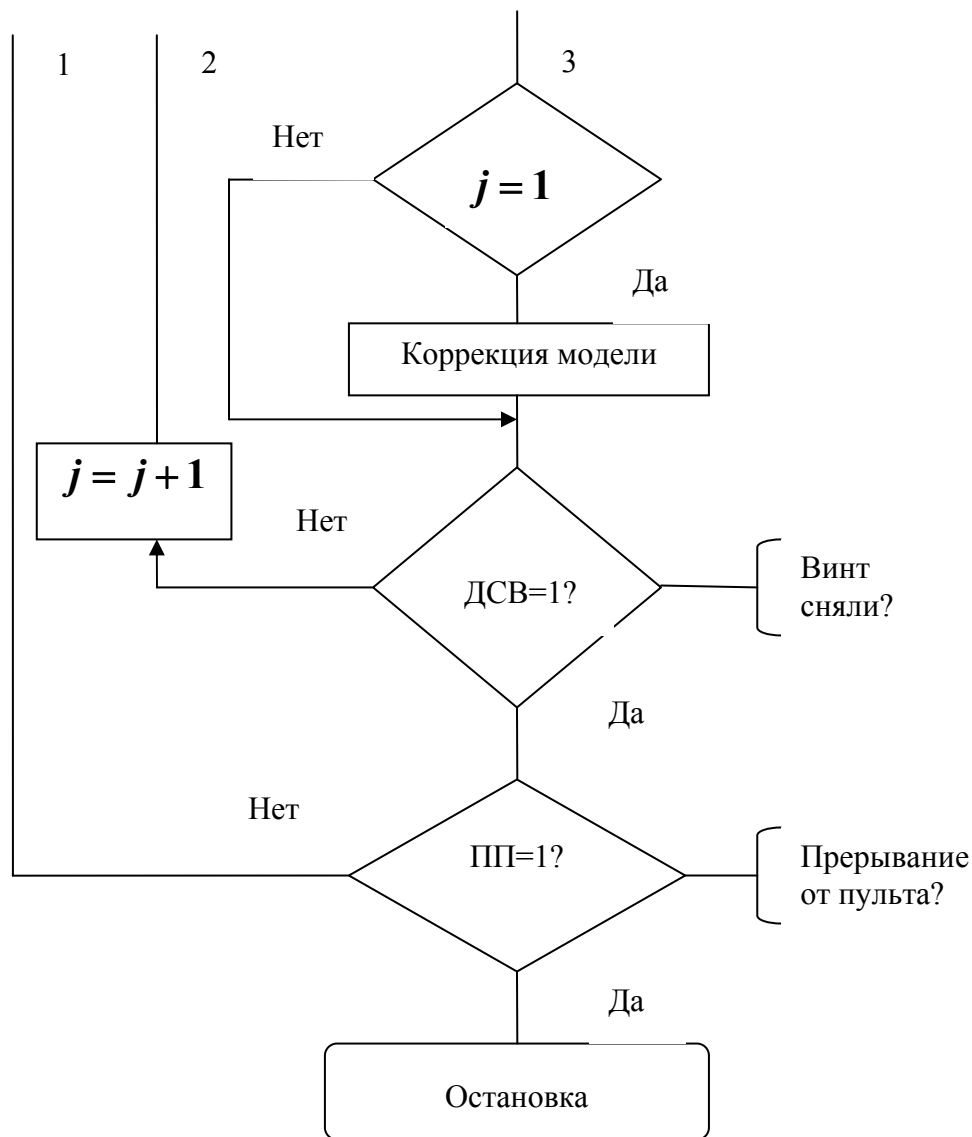


Рис.4.10. Схема алгоритма работы системы автоматической диагностики.

На рис. 4.11 представлены кривые распределения погрешности прогнозирования для случаев одно- и двухразовой коррекции модели. В первом случае (кривая 1) коррекция математической модели проводится после первого технологического перехода один раз за время цикла обработки детали. Во втором случае (кривая 2) коррекция проводится последовательно после первого и второго технологических переходов. Анализ кривых 1 и 2 показывает, что вероятность прогноза  $l_{ij}$  с погрешностью до 6 мкм для одно- и двухразовой коррекции составляет соответственно 60 и 72 %.

На рис. 4.12 приведены экспериментально полученные временные диаграммы осевых деформаций первого  $(l_{1j})$ , шестого  $(l_{6j})$  и

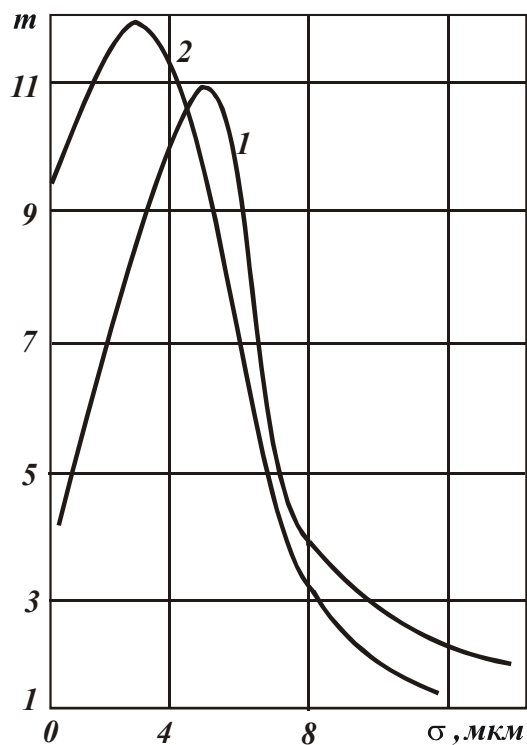


Рис. 4.11. Распределение погрешности  $\delta$  прогнозирования при одно- (кривая 1) и двухразовой (кривая 2) коррекции математической модели:  $m$  - частота.

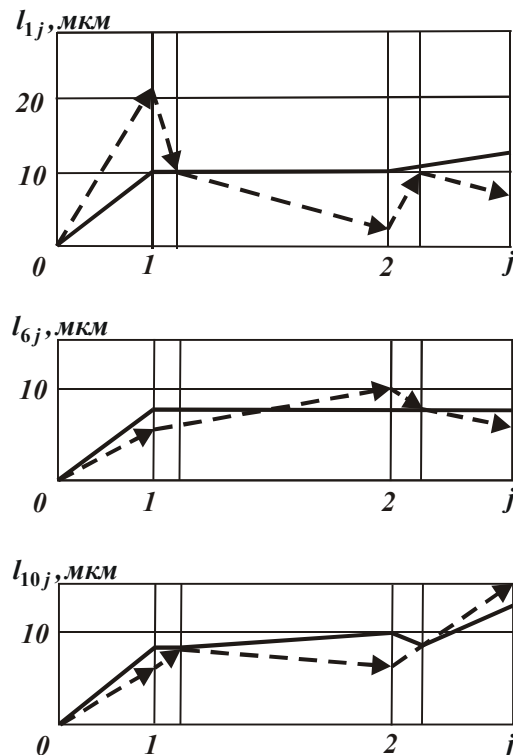


Рис.4.12. Временные диаграммы расчётной (штриховая линия) и фактической (сплошная линия) осевых деформаций обрабатываемых винтов 63×10×630 мм ( $j$ - номер технологического перехода).

десятого ( $l_{10j}$ ) обрабатываемых винтов, выборочно взятых из последовательно обрабатываемых деталей. Перед обработкой этих деталей САД была установлена в режим накопления и прогнозирования данных. Временные диаграмм иллюстрируют процесс обучения САД. Из анализа временных диаграмм (рис.4.12) следует, что наибольшая погрешность прогнозирования характерна для первой детали, когда коэффициенты уравнения (4.2) равны их первоначальным теоретическим знаниям. Затем погрешность прогнозирования уменьшается и не превышает 10-15%.

Анализируя приведенные данные, можно сделать следующие выводы.

1. Осевая температурная деформация обрабатываемых ходовых винтов может быть использована в качестве параметра, характеризующего состояние технологической системы финишного резьбошлифования, так как этот параметр предопределяет накопленную погрешность шага резьбы и характеризует производительность обработки.

2. Упреждающий активный контроль температурной деформации прецизионных винтов, производимый при помощи САД, позволяет стабилизировать температурную деформацию на уровне настройки коррекционной линейки РШС и тем самым устранить случайную составляющую накопленной погрешности шага резьбы.
3. Накопление технологических данных в ОЗУ микроЭВМ и их последующая обработка позволяют объективно оценить качество технологической операции финишного резьбошлифования.

#### 4.4.3. КОМПЬЮТЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РЕЗЬБОШЛИФОВАНИЯ ПО ТЕМПЕРАТУРНОМУ КРИТЕРИЮ

На рис.4.13 показана блок-схема алгоритма функционирования системы диагностики: КВ- конечный выключатель конца прохода, БФР- блок фиксации резания, ДСВ- датчик смены винта, ПНК- прибор неразрушающего контроля. Сущность алгоритма видна из блок-схемы. Некоторые особенности этого алгоритма рассмотрим ниже в зависимости от состояния сигнала ПНК.

При ПНК=0 уровень мощности резания ( $P$ ) снимается непрерывно. Если этот уровень изменяется по величине  $P_{ij}, n_{ij}, t_{ij}$  и по скорости одновременно (нарушены заданные в программе пороги по уровню ( $c_1$ ) и скорости ( $c_2$ ) – они задаются в программе), то компьютер формирует сигнал БФР=1, который разрешает подсчет импульсов датчика оборотов детали (ДОД) до числа  $N$  (например,  $N=5$ ). В этот момент ( $N=5$ ) компьютер из непрерывно поступающих аналоговых сигналов берет усредненные значения сигналов  $P_{ij}, n_{ij}, t_{ij}$  (например, усредненные за секунду по десяти точкам синхронно с частотой сети). Эти данные переводятся в натуральные единицы по формулам градуировки в программе MathCAD.

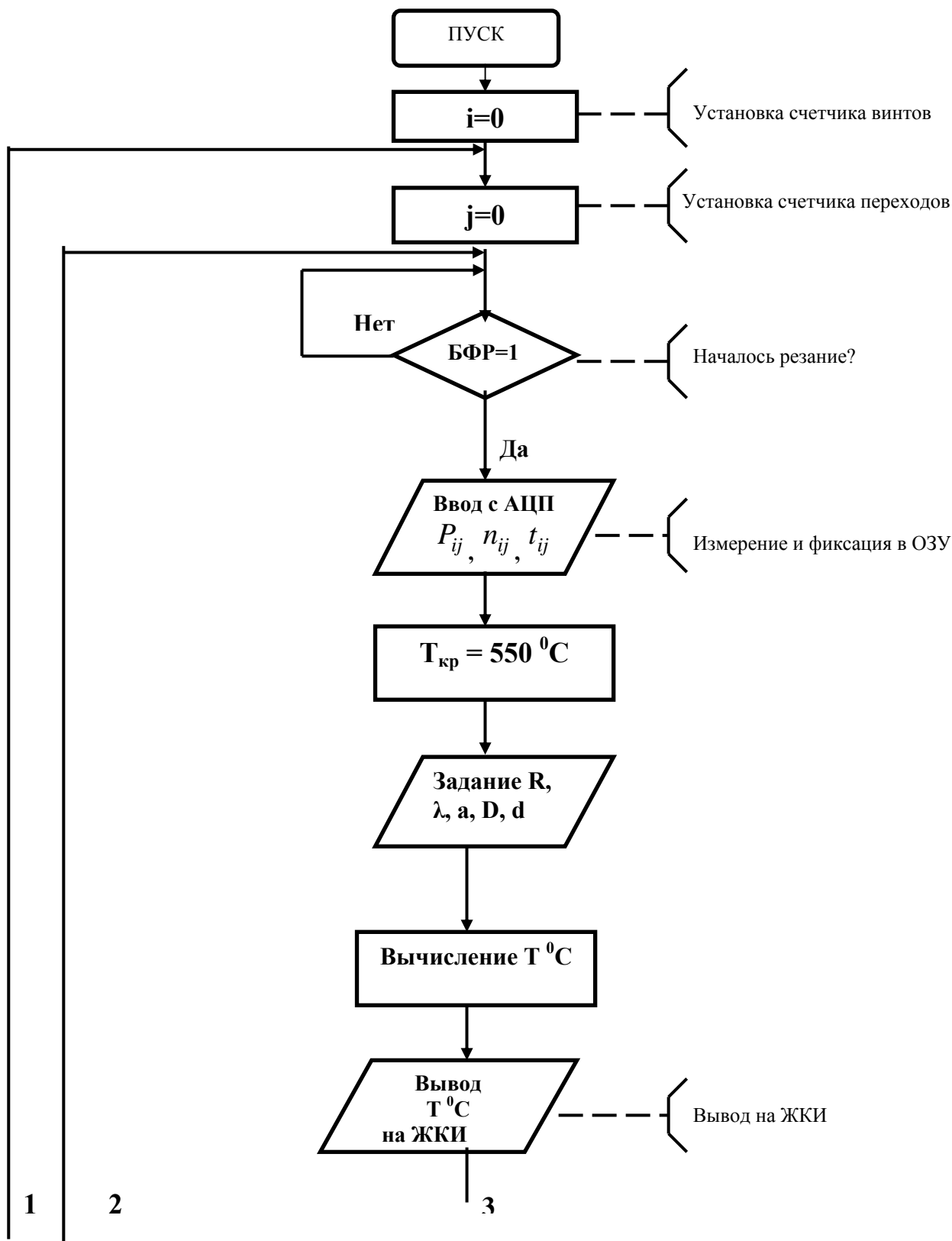
Таблица 4.1

Значения коэффициентов в формулах градуировки ПАМ

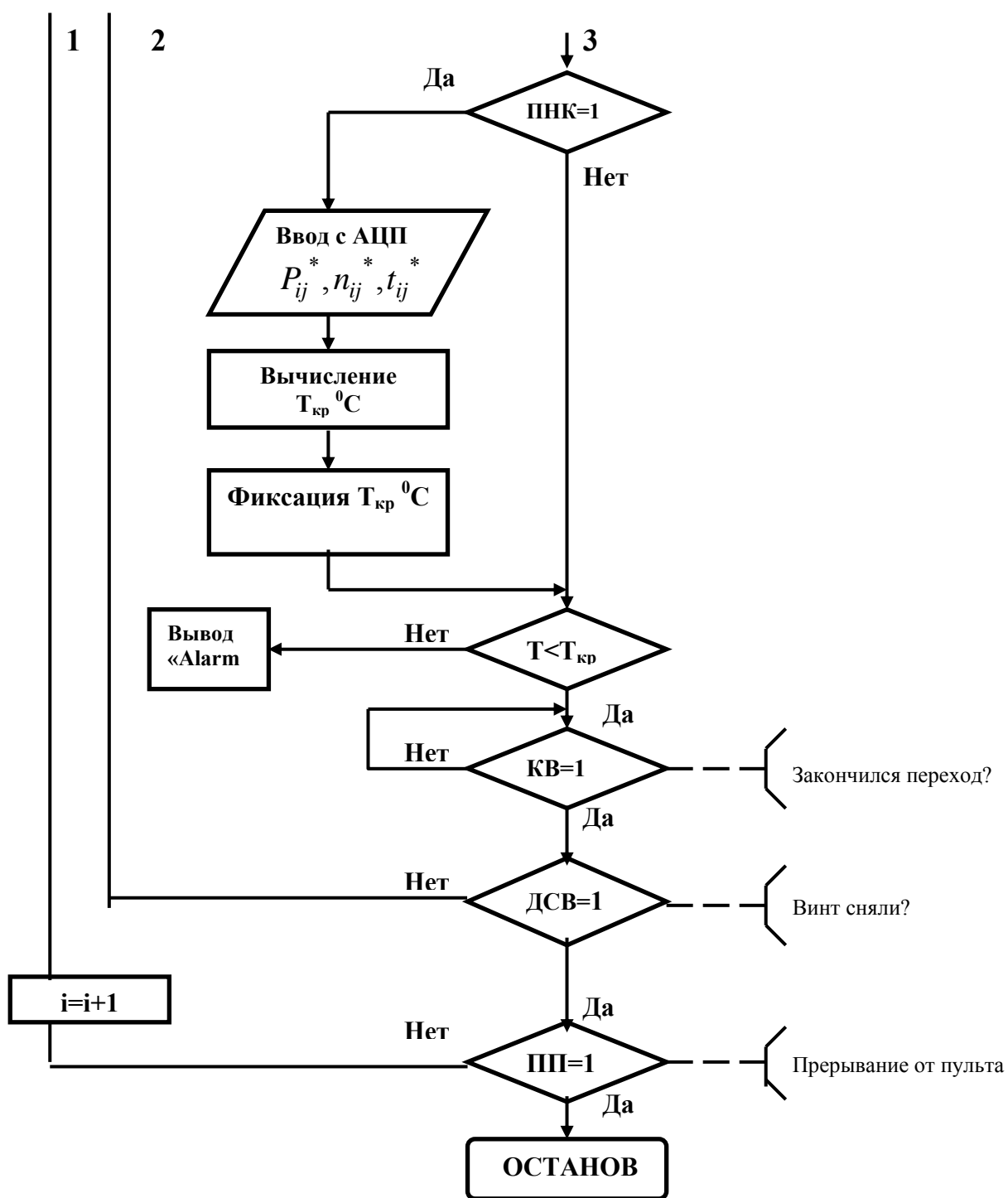
Чувствительность ПАМ	Низкая	Средняя	Высокая
Математическая модель градуировки	$P = ax + b$		
	$a=494,97$	$a=298,04$	$a=105,13$
	$b= -293,94$	$b= -126,48$	$b= -46,729$
Примечание: 1. $a, b$ – коэффициенты Вт/В и Вт, соответственно. 2. Индексы $i, j$ – опущены.			



Математические модели (ММ) градуировки преобразователя активной мощности (ПАМ) (работает в трех режимах чувствительности) сведены в табл.4.1.



а



б

Рис.4.13. Блок-схема алгоритма:  $P_{ij}$ ,  $n_{ij}$ ,  $t_{ij}$  - мощность шлифования, частота вращения заготовки и глубина шлифования при обработке  $i$  - го винта на  $j$  -ом проходе.

ММ градуировки для преобразователя частоты вращения заготовки (датчик скорости детали (ДСД)):

$$n = k_n \cdot U_n, \quad (4.12)$$

где  $k_n$  - коэффициент;  $k_n = 0,8$  (м/мин)/В.

ММ градуировки преобразователя глубины шлифования (датчик глубины шлифования (ДГШ)):

$$t = k_t \cdot U_t, \quad (4.13)$$

где  $k_t$  - коэффициент;  $k_t = 0,2$  мм/В.

Для контрольного примера расчета температуры шлифования (в зоне обработки) в программе MathCAD в качестве исходных данных необходимо задать теплофизические параметры  $a = 8,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda = 42$  Вт/м · С<sup>0</sup>; геометрические параметры: радиус профиля канавки  $R = 3 \cdot 10^{-3}$  м, диаметр шлифовального круга  $D = 400 \cdot 10^{-3}$  м, диаметр детали  $d = 40 \cdot 10^{-3}$  м. Плотность теплового потока  $q$  (Вт/м<sup>2</sup>) находят в программе MathCAD следующим образом

$$q = \frac{P}{S}, \quad (4.14)$$

где  $P$  - мощность резбошлифования, Вт;  $S$  - площадь пятна контакта, м<sup>2</sup>.

Мощность шлифования  $P$  определяют (программным путем) по формуле

$$P = P_{\Sigma} - P_{xx}, \quad (4.15)$$

где  $P_{\Sigma}, P_{xx}$  - мощность, потребляемая электродвигателем привода шлифовального круга в режиме работы и холостого хода, соответственно, Вт.

Запоминание уровня сигнала  $P_{xx}$  происходит каждый раз при появлении сигнала БФР=1 (алгоритм формирования сигнала БФР=1 представлен выше).

Площадь пятна контакта  $S$  находят по следующим формулам. Для первого прохода:

$$S = 2 \sqrt{\frac{D \cdot d}{D + d}} \int_0^{r \cdot \arccos \left[ \frac{R \cdot t_1}{t} \right]} \sqrt{\sqrt{R^2 - x^2} - (R - t_1)} dx, \quad (4.16)$$

где  $D, d$  - диаметры шлифовального круга и заготовки, мм;  $t_1$  - глубина шлифования на первом проходе, мм;  $x$  - переменная интегрирования.

Для любого  $(k + 1)$  - го прохода, начиная со второго  $(k = 1)$ ,

$$S_{k+1} = \sqrt{\frac{D \cdot d}{D + d}} t_{k+1} \cdot r \left[ \arccos \frac{R - \sum_{i=1}^k t_i}{R} + \arccos \frac{R - \sum_{i=1}^{k+1} t_i}{R} \right], \quad (4.17)$$

где  $t_{k+1}$  - глубина шлифования на любом  $k$ -ом проходе ( $1 \leq k \leq n-1$ ).

Время действия теплового источника  $\tau_k$

$$\tau_k = \frac{\sqrt{\frac{D \cdot d}{D + d}} \cdot t_k}{V_k}. \quad (4.18)$$

Скорость заготовки при шлифовании  $V_k$

$$V_k = \frac{\pi \cdot n_k \cdot R}{30}. \quad (4.19)$$

Рассчитываем критерий Фурье  $F_0$

$$F_0 = \frac{a \cdot \tau}{R^2}. \quad (4.20)$$

Далее рассчитываем температуру по следующей формуле [385, 409]:

$$T = T\left(r, \frac{a \cdot \tau_m}{R^2}\right) - T\left(r, \frac{a \cdot (\tau - \tau_m)}{R^2}\right), \quad (4.21)$$

где  $r = R + x$  - радиус – вектор исследуемой точки поверхностного слоя;  $T$  - температура шлифования, зависящая от координаты  $x$  и

критерия Фурье  $F_0 = \frac{a \cdot \tau}{R^2}$ ;  $\tau$  - время действия теплового источника;

$x$  - расстояние от обрабатываемой поверхности до исследуемой точки (глубина расположения точки).

Здесь [385, 409]:

$$T\left(r, \frac{a\tau}{R^2}\right) = -\frac{2qR}{\pi\lambda} \cdot \int_0^\infty \left(1 - \exp\left(-\frac{a\tau}{R^2} \zeta^2\right)\right) \times$$

$$\times \frac{J_0\left(\zeta \frac{r}{R}\right) Y_1(\zeta) - Y_0\left(\zeta \frac{r}{R}\right) J_1(\zeta)}{\zeta^2 \left(J_1^2(\zeta) + Y_1^2(\zeta)\right)} d\zeta, \quad (4.22)$$

где  $T\left(r, \frac{a\tau}{R^2}\right)$  - решение одномерного дифференциального уравнения теплопроводности с краевыми условиями второго рода;  $J_0, J_1$  - функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка;  $Y_0, Y_1$  - функции Бесселя второго рода нулевого и первого порядка;  $\zeta$  - переменная интегрирования.

Верхний предел интеграла в формуле (4.22) выбирается в зависимости от численного значения критерия Фурье (табл.4.2).

Таблица 4.2

Значения верхнего предела интегрирования

$F_0$	0 – 1 $\times 10^{-5}$	1 - 20 $\times 10^{-5}$	20 - 600 $\times 10^{-5}$	600- 5000 $\times 10^{-5}$	5000- 20000 $\times 10^{-5}$	>20000 $\times 10^{-5}$
$Limit$	100-700 $\times 10^3$	100-22 $\times 10^3$	22- 9 $\times 10^3$	9 - 8 $\times 10^3$	1 - 8 $\times 10^3$	1 $\times 10^3$

Далее выводим найденное по формуле (4.22) значение температуры  $T$  °С на монитор компьютера и на внешний цифровой индикатор, расположенный на передней панели устройства сопряжения (УСО).

После этого сформируем ячейку памяти для системы сбора данных:

- 1) определяем адрес этой ячейки;
- 2) записываем туда следующие числа: номер обрабатываемого винта; номер прохода шлифования; параметры, характеризующие этот проход: текущую дату и время суток,  $P_{ij}$ ,  $n_{ij}$ ,  $t_{ij}$  и  $T_{ij}$  °С, где  $i, j$ - номера винтов и проходов, соответственно.

Далее система находится в состоянии ожидания сигнала КВ=1 (конец прохода). При появлении сигнала КВ=1 счетчик числа проходов увеличивает свое содержимое на 1. Подготавливается следующая ячейка для записи данных в системе сбора данных (ССД). Ячейка – это область памяти, в которой содержатся данные следующего вида (номер винта, номер прохода, а также мощность  $P_{ij}$ , глубина шлифования  $t_{ij}$ , частота  $n_{ij}$ ). После этого система переходит в режим ожидания сигнала БФР=1, после появления которого опять подсчитывается число оборотов детали, и когда оно становится, например, N=5, формируется новая ячейка памяти по описанной выше схеме. Затем система переходит в режим ожидания сигнала КВ=1 и т.д. до появления сигнала датчика деформации ДСВ=1. Алгоритм формирования

сигнала ДСВ=1 следующий: контролируется аналоговый уровень сигнала ДСВ и когда он превышает известную величину, например, 4,5 В, должен сработать дискретный преобразователь (например, на основе операционного усилителя типа УТ), который вырабатывает сигнал логической единицы (сигнал ДСВ=1). После появления сигнала ДСВ=1 счетчик винтов увеличивает свое содержимое на 1 и формируется очередная ячейка для записи данных в ССД, которая производится по описанному выше алгоритму до появления нового сигнала ДСВ=1 (между двумя этими сигналами ДСВ=1 несколько раз появляется сигнал КВ=1, по которому осуществляется запись данных по проходам на интервале времени обработки одного и того же винта). Причем появление сигналов БФР=1, КВ=1, ДОД=1, ДСВ=1 должно сопровождаться включением соответствующих индикаторных светодиодов на передней панели УСО.

Таким образом, в ССД в процессе работы станка формируется база технологических данных (БД), характеризующих технологический процесс резьбошлифования всех обработанных винтов (и всех проходов обработки этих винтов). Эта база данных непрерывно пополняется и пользователь в любой момент времени имеет возможность узнать ее текущее состояние (например, сколько винтов обработано к данному моменту времени). Эта база данных должна иметь управление от СУБД, например, от СУБД типа MS ACCESS. Пользователь может получить информацию из этой БД по любому характеризующему ее признаку. Например, он может получить данные, характеризующие обработку на 3-ем проходе 5-го винта или данные по обработке в указанный день и интервал времени суток, или выбрать из этой БД данные, характеризующиеся повышенной температурой с подробным описанием этих данных.

В момент появления сигнала ПНК=1 определяют параметры  $P_{ij}^*$ ,  $n_{ij}^*$ ,  $t_{ij}^*$ , (измеренные в этот момент) и температуру шлифования. Полученная в этот момент времени температура шлифования является критической  $T_{кр}$  (при этой температуре на поверхности образуется шлифовочный прижог). Эту температуру фиксируют на время прохода и снова сравнивают ранее найденную температуру шлифования с новым значением  $T_{кр}$ . Если  $T \geq T_{кр}$ , вырабатывается предупреждающий сигнал. В противном случае работа системы осуществляется по блок-схеме алгоритма.

Для исследования уравнения (4.21) аспиранткой Лищенко Н.В.

выполнены соответствующие расчеты температуры в зависимости от координаты  $x$  и времени  $\tau$  (рис.4.2).

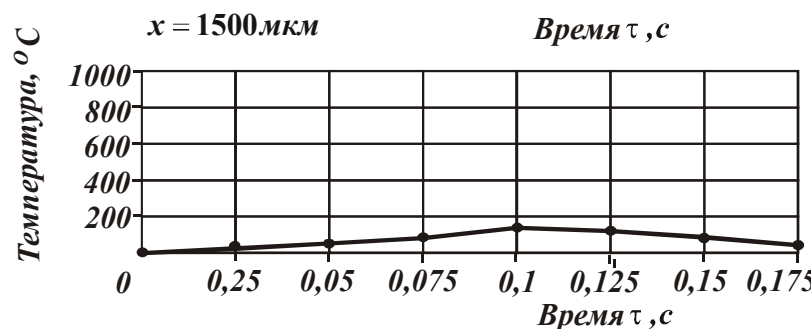
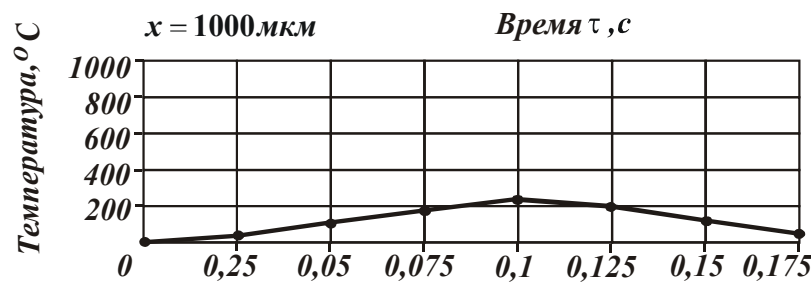
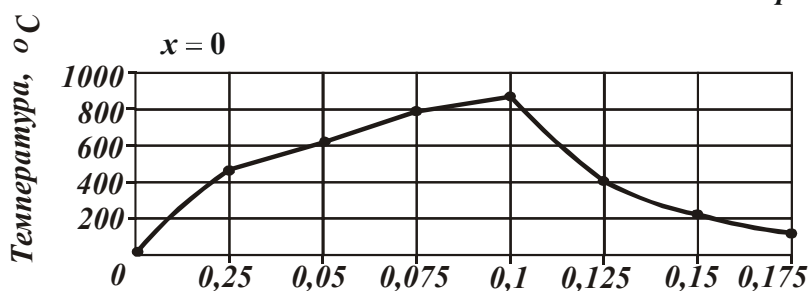
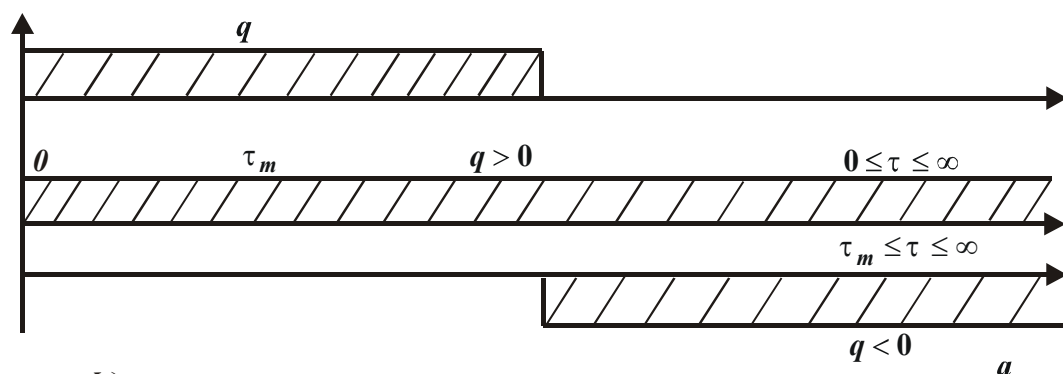


Рис.4.14.Суперпозиция плотности теплового потока (а) и изменение температурного поля в зависимости от времени действия теплового источника при расстоянии до рассматриваемой точки  $x=0$  (б),  $x=1000$  мкм (в) и  $x=1500$  мкм (г).

Из анализа графиков на рис 4.14 видно, что величина максимальной температуры практически не зависит от глубины  $x$  и имеет место при максимальном времени  $\tau = \tau_{max}$ , поэтому в качестве уравнения для расчета глубины дефектного слоя можно использовать уравнение (4.22). В то же время уравнение (4.21) позволяет исследовать скорость охлаждения по глубине поверхностного слоя (спадающая ветвь

кривой на рис.4.14, б,в,г) и тем самым предсказывать качественные изменения твердости материала по глубине поверхностного слоя. Характер изменения температуры во времени меняется в зависимости от глубины  $x$ . В крайних точках (на поверхности  $x=0$  и на глубине  $x=1500$  мкм) характер ветвей кривой меняется на противоположный: выпуклость изменяется на вогнутость при возрастании температуры, а вогнутость - на выпуклость при уменьшении температуры.

Для определения глубины, на которую распространяется любая фиксированная температура, необходимо с определенным шагом увеличивать координату  $x$  от начального значения  $x=0$  и для каждого принятого значения  $x$  подсчитывать температуру  $T(x, \tau_m)$ .

Следовательно, имея зависимость  $T(x, \tau_m)$  можно определить величину  $x$  при  $T(x, \tau_m) = T_{кр}$ . В качестве  $T_{фикс.}$  может быть выбрана, например, критическая температура  $T_{кр}$ , при которой в материале происходят структурно-фазовые превращения. В этом случае глубина  $x$ , на которую проникает критическая температура  $T_{кр}$  равна глубине образующегося при шлифовании дефектного слоя.

В математическом пакете MathCAD имеется возможность решения трансцендентного уравнения с одним неизвестным численным методом при условии, если рассматриваемую задачу определения глубины дефектного слоя представить в следующей канонической форме

$$T(x, \tau_m) - T_{кр} = 0. \quad (4.23)$$

В этом случае с помощью программы можно с требуемой точностью определить координату  $x$ , на которую распространяется критическая температура  $T_{кр}$ , т.е. в этом случае не требуется пошаговое изменение глубины  $x$  для определения глубины дефектного слоя в ручном режиме и время счета существенно (на два порядка) сокращается. Однако, прежде чем определять глубину дефектного слоя необходимо проверить условие бездефектной обработки, которое применительно к рассматриваемому случаю имеет вид

$$T(x, \tau_m) \leq T_{кр}. \quad (4.24)$$

Если условие бездефектной обработки при рассматриваемых условиях обработки нарушается, тогда можно определять глубину дефектного слоя.



Выполним расчет глубины дефектного слоя для примера, рассмотренного выше, приняв,  $T_{кр} = 550$  °С. Проверяем условие бездефектной обработки (4.24). Поскольку  $869,014$  °С  $> 550$  °С, можно использовать каноническую форму (4.23) для определения глубины дефектного слоя  $h_d$ . Фрагмент, показывающий оформление уравнения (4.22) для программы MathCAD, представлен на рис.4.15. Там же содержится результат определения глубины дефектного слоя  $h_d = 397,3$  мкм.

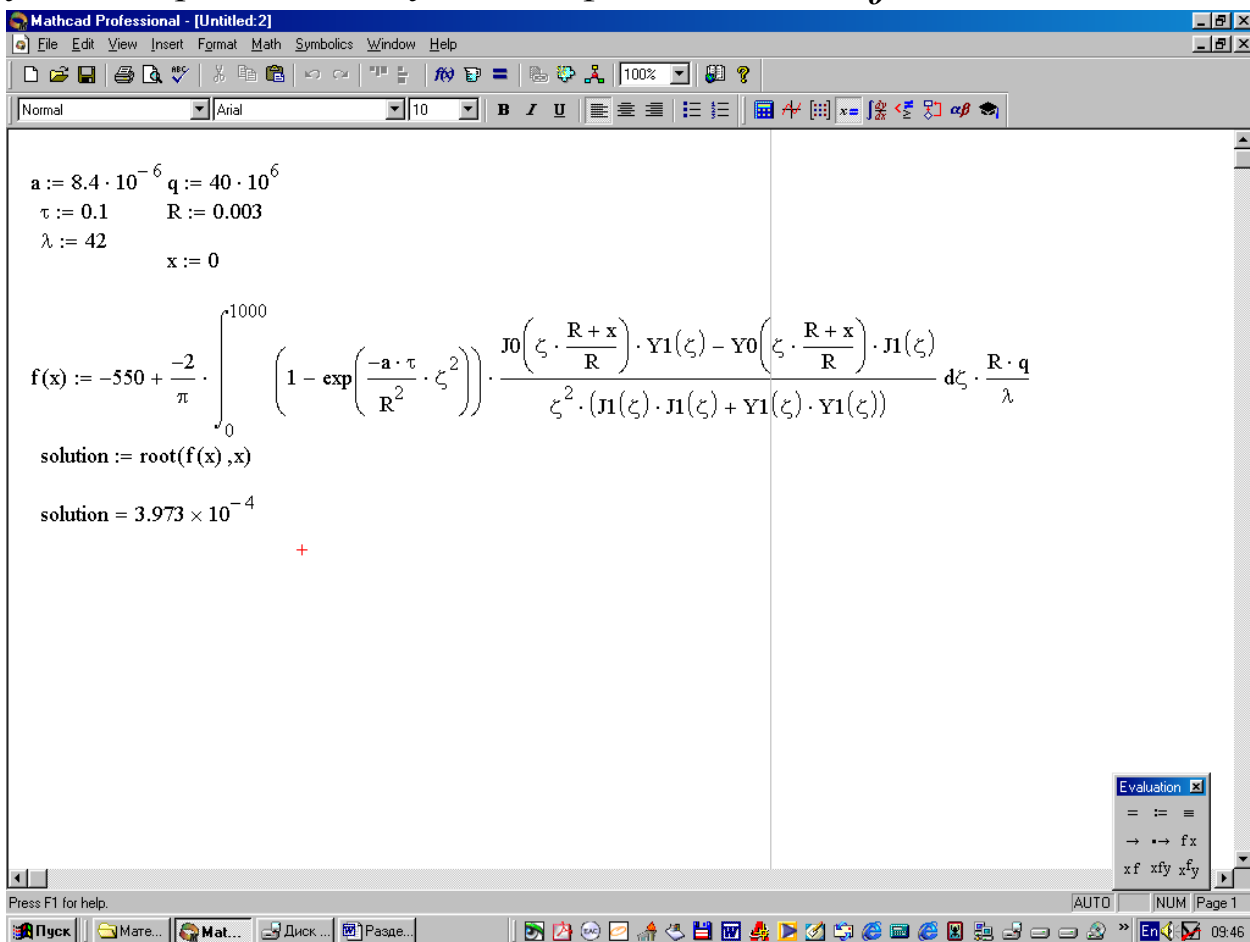


Рис.4.15. Стандартное окно в программе MathCAD при расчете глубины дефектного слоя.

Таким образом, описанная выше и проиллюстрированная на конкретном примере, методика определения температуры и глубины дефектного слоя при шлифовании с использованием пакета MathCAD может быть использована в качестве инструментария для диагностики технологической системы шлифования по критерию качества поверхностного слоя и последующего управления процессом.

Система компьютерной диагностики может быть выполнена на основе системы сбора данных, которая встроена в технологическую систему резьбошлифования и позволяет фиксировать режимные па-

раметры обработки, а также параметры, характеризующие теплонапряженность процесса, например, температуру в зоне резания, глубину дефектного слоя и т.п.

#### **4.5. АНАЛИЗ КОМПЬЮТЕРНЫХ САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

При всех успехах компьютерной индустрии (как в аппаратном, так и программном обеспечении) задача формализации технологического проектирования до сих пор относится к числу проблемных. Анализ известных технологических САПР, например, таких как Pro-engineer, T-flex, Master-CAM, TechCard (Техкарта), Компас-Автопроект, показывает, что эти системы работают, реализуя так называемый принцип заимствования. Другими словами, эффективная работа этих систем возможна лишь при наличии специализированных баз данных, в которых происходит накопление ранее принятых технологических решений. Научной основой принципа заимствования являются известные в технологии машиностроения принципы проектирования на основе типовых и групповых технологических процессов.

Несомненным преимуществом компьютерных технологий проектирования является освобождение технолога от рутинных, часто повторяющихся процедур: использование справочных данных по всем элементам технологической системы, оформление результатов проектирования в виде технологической документации и готовых управляющих программ для станков с ЧПУ и т.п. В этой связи системы САПР должны быть оснащены эффективными графическими редакторами и специальным математическим обеспечением, позволяющим выполнять технологические расчёты (расчёт размерных цепей, режимов резания и т.п.). В этой связи следует отметить, что технологические САПР должны быть построены по модульному принципу, причём каждый программный модуль должен быть функционально законченной единицей. При таком подходе возможно построение относительно самостоятельных подсистем САПР технологического назначения, например, подсистем расчёта режимов резания (в частности, режимов шлифования), подсистем САПР встроенного типа, работающих и принимающих решения во время функционирования технологических систем механообработки и сборки, например, технологических систем шлифования (плоского, круглого, резьбо-, зубошлифования и т.п.).

## 4.6. ПОДСИСТЕМЫ САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

### 4.6.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОДСИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

На протяжении длительного времени системы (подсистемы) проектирования технологии (САПР) и управления технологией (САУ) рассматривались как независимые (дополняющие друг друга) направления в автоматизации производства на его подготовительной и исполнительной фазе, соответственно. Первые системы (САПР) рассматривались, как системы планирования (этап разработки плана действий), а вторые (САУ) – как системы регулирования (этап осуществления плана и внесения в него соответствующих корректив). Учитывая, что любое планирование будущих действий является неотъемлемой частью управления, можно прийти к заключению: САПР и САУ относятся к системам управления производством на его подготовительной и исполнительной фазах. Здесь следует заметить, что на этапе проектирования технологии создают структуру и выбирают параметры будущего технологического процесса. После того как структура определена различие в двух видах указанных выше систем заключается в количестве управляемых параметров, режимах управления (рис.4.16) и в этой связи в способах получения и использования исходных данных (априорных для САПР и апостериорных для САУ). Например, при расчёте режимов резания на этапе ТПП пользуются априорными справочными данными, полученными гораздо раньше и для конкретных условий производства. Естественно, что эти данные только в определённой степени соответствуют буду-



Рис.4.16. Классификация систем проектирования и управления по принципу работы: САПР – система автоматизированного проектирования (технологии); САУ – система автоматического управления (технологией).

щим действиям, скорее всего они им частично (а иногда и полностью) не соответствуют. Однако, без результатов предварительного проектирования нельзя начинать технологический процесс. В этом смысле подбор параметров процесса на этапе его проектирования можно рассматривать как регулирование этого процесса по технологическим критериям (производительность, точность, качество), когда объектом регулирования является не реальный процесс, а его математическая модель.

#### **4.6.2. РЕЗЬБОШЛИФОВАНИЕ ХОДОВЫХ ВИНТОВ ПЕРЕДАЧ ВГК**

Шлифовальные операции, в отличие от операций лезвийной механической обработки, являются непредсказуемыми по своим последствиям с точки зрения влияния режимных параметров и условий шлифования на точность обработки и качество поверхностного слоя обрабатываемых деталей. Так, например, технические требования к качеству поверхностного слоя могут быть нарушены при непредсказуемом увеличении температуры в зоне контакта, что приводит к образованию шлифовочных прижогов и микротрещин. Эти шлифовочные дефекты резко снижают эксплуатационные свойства деталей, а в ряде случаев приводят к их поломке и, как следствие, к созданию аварийной ситуации при работе машины. Сказанное в полной мере относится и к таким ответственным деталям, как шариковые ходовые винты передач «винт – гайка качения». Если задача повышения точности шага резьбы при резьбошлифовании за последние 15-20 лет получила своё дальнейшее развитие в ряде защищённых диссертационных работ, то задача обеспечения бездефектного высокопроизводительного резьбошлифования до сих пор относится к числу проблемных. Это вызвано рядом причин, к числу которых относится, например, отсутствие средств активного контроля физико-механического состояния поверхностного слоя резьбы. Имеющиеся в распоряжении технолога методы микротвёрдости и металлографии неприемлемы для управления процессом резьбошлифования на этапе его выполнения, поскольку отличаются высокой трудоёмкостью, низкой точностью и, кроме того, являются разрушающими. В этой связи в работе сформулирована цель исследований: обеспечение бездефектного высокопроизводительного резьбошлифования за счёт встроенной компьютерной диагностики технологической системы и управления процессом резьбошлифования.

Рассмотрим структурную схему системы компьютерной диагностики и управления (СКДУ) (рис.4.17).

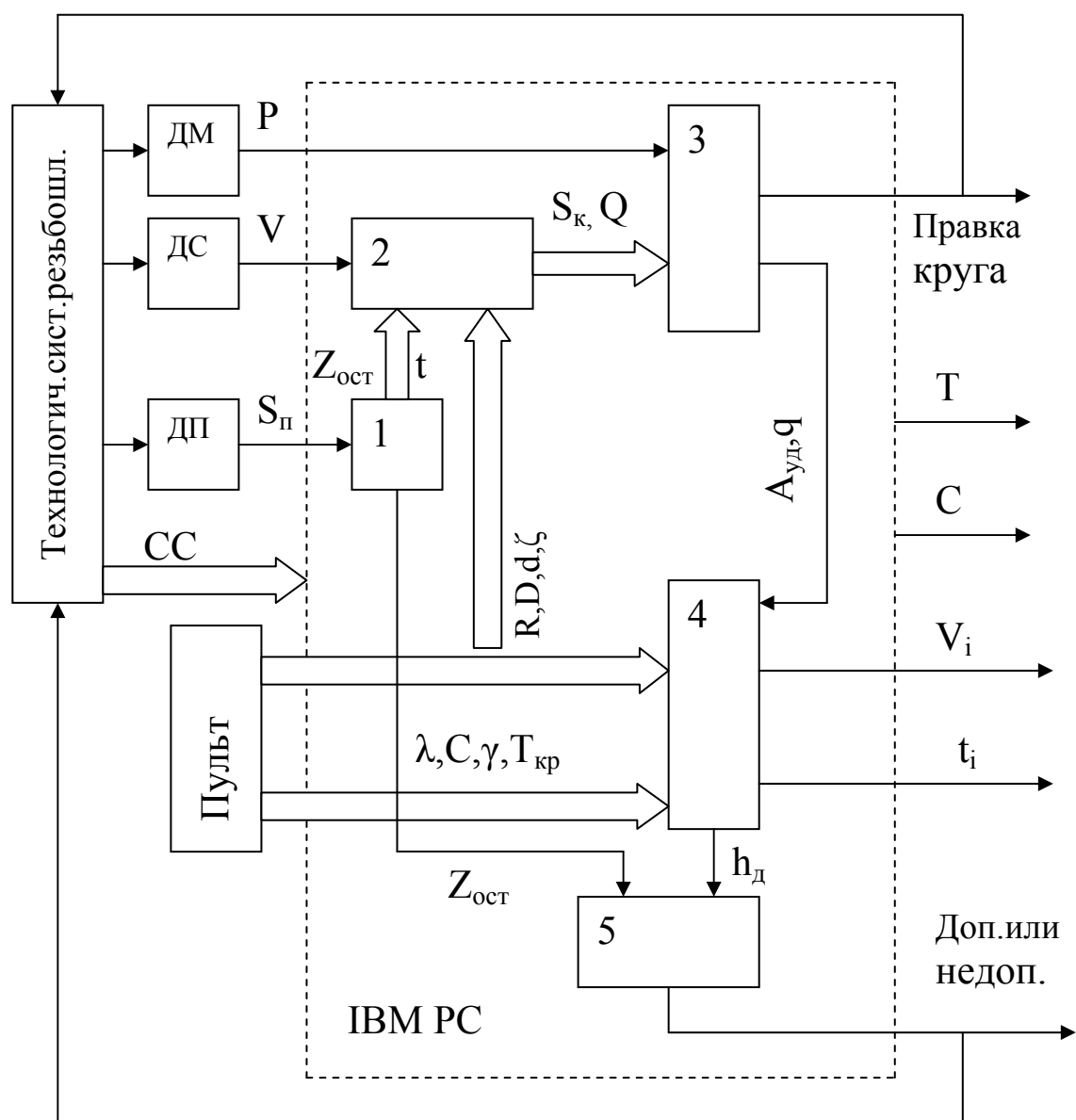


Рис.4.17. Структурная схема системы компьютерной диагностики процесса резбошлифования и управления этим процессом: 1, 2, 3, 4 - вычислительные блоки IBM PC.

Эта система является результатом выполнения научно-исследовательской работы, направленной на повышение эффективности процесса резбошлифования шариковых ходовых винтов передач “винт-гайка качения”. На рис.4.17 введены следующие обозначения: **IBM PC** – персональный компьютер; **ДМ** – датчик мощности шлифования; **ДС** – датчик скорости детали (датчик угловой скорости заготовки); **ДП** – датчик поперечной подачи; **P** – мощность резбошлифования; **V** – скорость детали; **S<sub>n</sub>** – поперечная подача (шлифовального круга на глубину резания); **СС** – синхронизирующие сигналы; **t** – глубина шлифования; **Z<sub>ост</sub>** – оставшийся на шлифование припуск; **h<sub>d</sub>** – глубина дефектного слоя; **A<sub>уд</sub>** – удельная работа шлифования; **q** –

плотность теплового потока;  $t_i, V_i$  – глубина шлифования и скорость детали, рекомендуемые на следующий ( $i$  –й) технологический переход;  $R, D, d, \zeta$  – геометрические параметры процесса (радиус профиля резьбы, диаметры шлифовального круга и заготовки, коэффициент запаса по прижогу);  $\lambda, C, \gamma, T_{кр}$  – теплофизические параметры процесса (теплопроводность, теплоёмкость, плотность обрабатываемого материала и критическая температура в зоне контакта);  $T, C$  – трудоёмкость и себестоимость операции резьбошлифования.

Система (рис.4.17) диагностирует текущее состояние технологической системы резьбошлифования (“Технологич.сист.резьбошл.” на рис.4.17) по температурному критерию: вырабатывает сигнал допустимого или недопустимого состояния (“Доп. или недоп.” на рис.4.17), а также сигнал на правку шлифовального круга (“Правка круга” на рис.4.17). Кроме того, система формирует управляющие сигналы в систему ЧПУ станка (на рис.4.17 не показана) для установки рекомендуемых режимов шлифования, обеспечивающих наивысшую производительность бездефектной обработки резьбы ходовых винтов ( $V_i, t_i$  на рис.4.17).

Из анализа рис.4.17 следуют следующие выводы.

1. Система в целом и каждый её блок могут быть охарактеризованы категориями: вход, выход, состояние.
2. Система в целом (рис.4.17) содержит подсистемы, каждая из которых также является целостным объектом и может содержать подсистемы и блоки разной физической природы (механические, электрические, электронные, гидравлические и т.п.). Указанные подсистемы и блоки являются элементами системы. Примеры подсистем: технологическая система резьбошлифования (объект диагностики и управления), подсистема диагностики процесса, подсистема управления, подсистема ЧПУ, подсистема сбора данных, подсистема IBM PC и т.п. Кроме того, систему в целом и её составляющие элементы можно разделить на аппаратную (hardware) и программную (software) части.

Система (СКДУ) работает по принципу «оценка - рекомендация» с одновременным протоколированием параметров состояния (режимы резьбошлифования и их оценки по температурному критерию). Протоколирование необходимо для последующего анализа данных в общезаводской системе обеспечения качества продукции (в соответствии с международными стандартами ISO 9000, ISO 9001).

Работа СКДУ предусматривает этап её обучения, на котором

корректируются коэффициенты уравнения математической модели температурного поля. Этот этап позволяет адаптировать математическое обеспечение СКДУ к конкретным (индивидуальным) условиям резбошлифования (эти условия не могут быть предусмотрены заранее). Такой системный подход к построению СКДУ является адекватным ответом на специфические особенности непредсказуемого по своим последствиям процесса резбошлифования.

СКДУ выполнена на основе использования принципа открытой архитектуры и предусматривает дальнейшее её расширение для увеличения технологических возможностей бездефектной высокопроизводительной обработки резьбы.

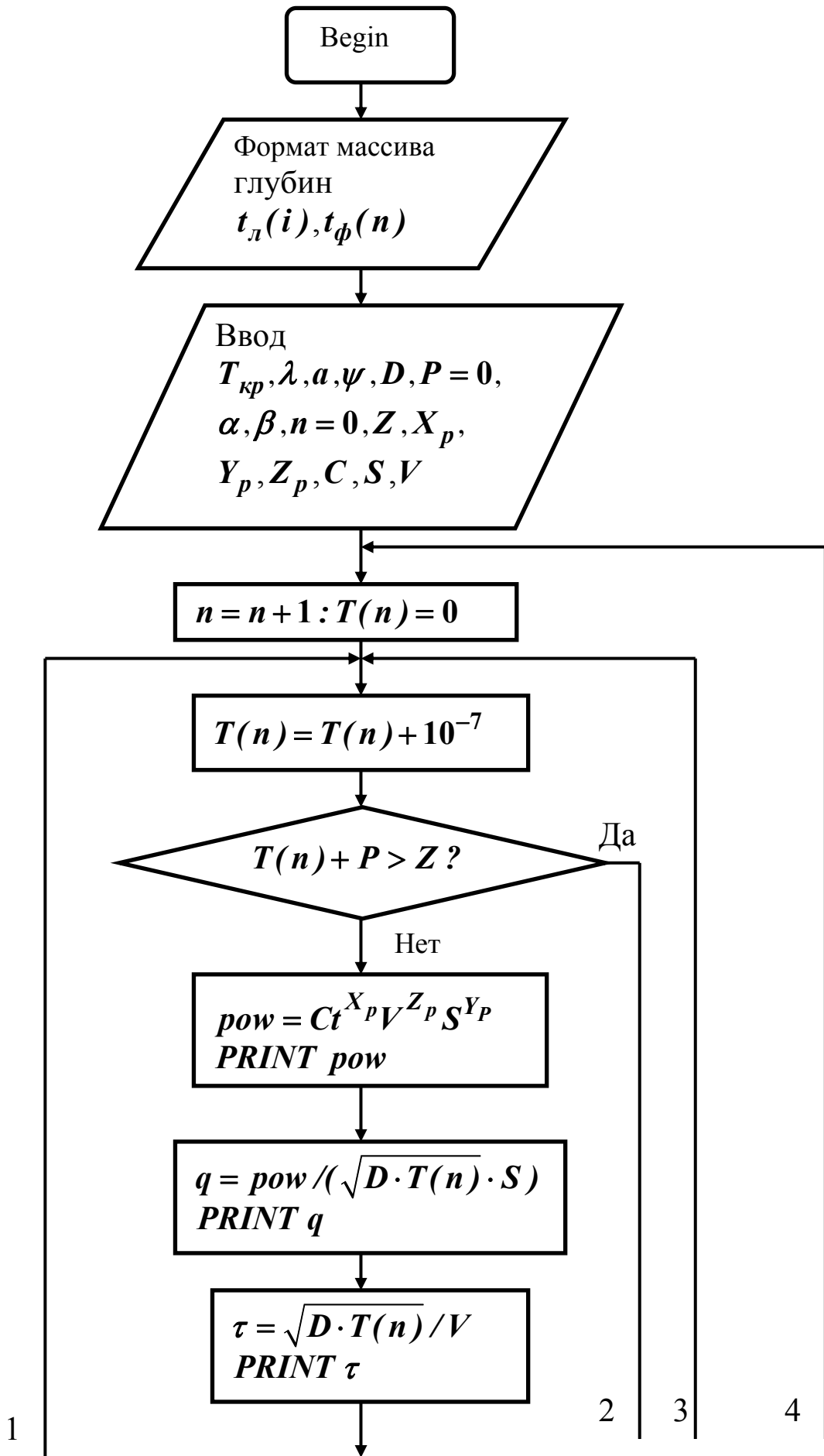
#### 4.6.3. ПЛОСКОЕ ШЛИФОВАНИЕ НА СТАНКАХ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ СТОЛОМ

Алгоритм компьютерной программы расчёта распределения припуска на переходы плоского шлифования (рис.4.18) реализован на алгоритмическом языке Q-Basic. Алгоритм построен на основе итерационных циклов автоматического поиска глубины шлифования (при фиксированной скорости детали) исходя из условия: глубина образующегося при шлифовании дефектного слоя не должна превышать припуска, остающегося на шлифование (или части его) [409, 410]. Работа алгоритма и его математическое обеспечение видны из прилагаемой блок-схемы (рис. 4.18). В качестве примера в табл.4.3 представлены результаты расчёта распределения припуска на переходы шлифования при удалении общего припуска  $Z=40$  мкм. В табл.4.3 введены следующие обозначения:  $Z_{ост\ i}$  – оставшийся после  $i$ -го перехода припуск на последующее шлифование;  $t_{i\phi}$  – фактическая глубина шлифования на  $i$ -ом переходе;  $t_{ил}$  – лимбовая (расчётная) глубина шлифования на  $i$ -ом переходе.

Таблица 4.3

Результаты расчёта

Переход $i$	$Z_{ост\ i}$ , мкм	$t_{i\phi}$ , мкм	$t_{ил}$ , мкм
1	31,39	8,61	12,00
2	23,26	8,13	11,39
3	15,58	7,68	10,80
4	8,31	7,27	10,30
5	1,41	6,90	9,85





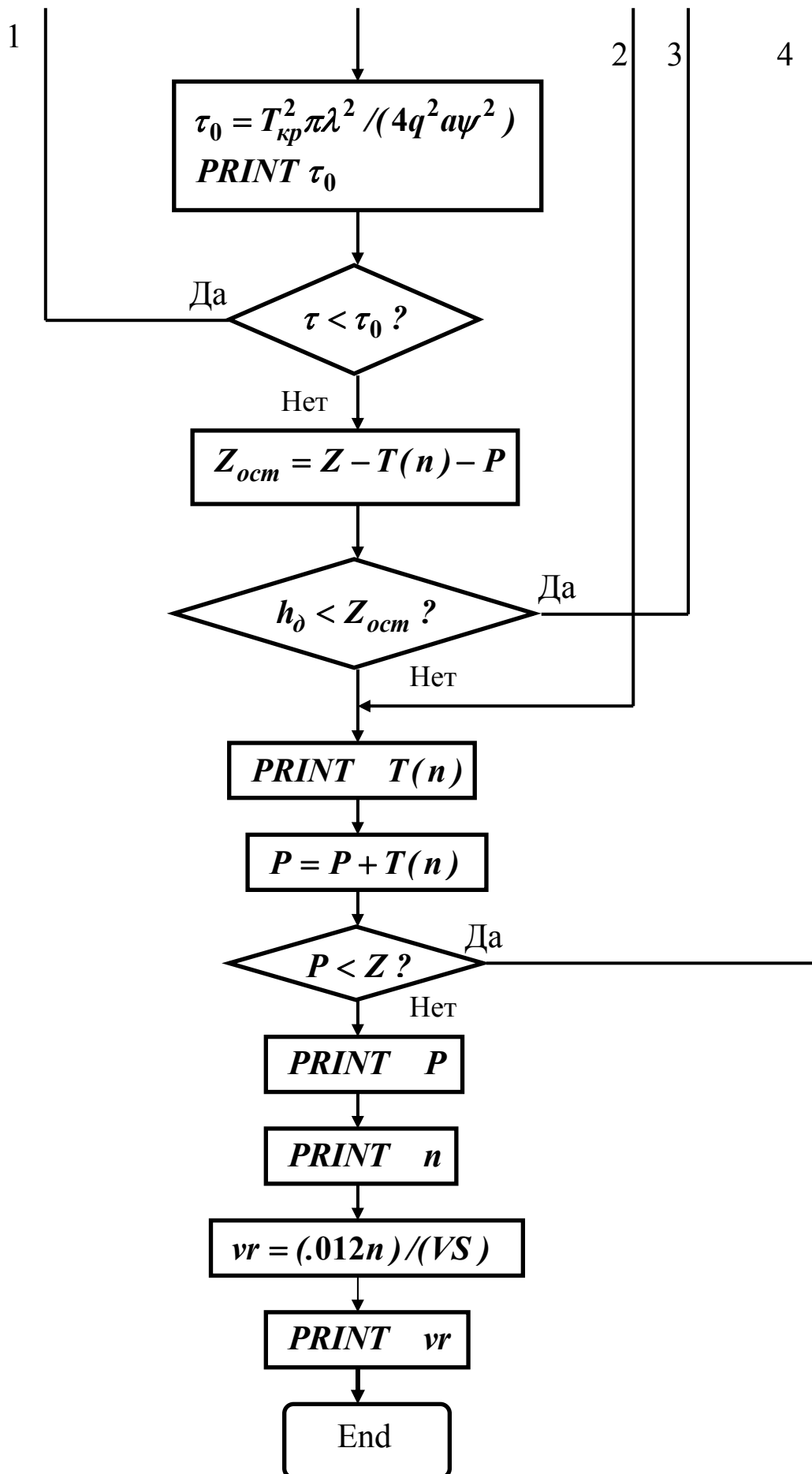


Рис.4.18. Блок-схема алгоритма расчёта распределения припуска.

Как следует из анализа результатов расчёта, глубина шлифования ( $t_{i\phi}$  и  $t_{il}$ ) уменьшается по мере увеличения номера перехода шлифования. Отличие между фактической ( $t_{i\phi}$ ) и лимбовой ( $t_{il}$ ) глубинами шлифования вызвано влиянием жёсткости плоскошлифовального станка: лимбовая глубина шлифования превышает фактическую глубину на величину упругого технологического отжатия.

## ГЛАВА 5

# ФОРМАЛИЗАЦИЯ ВЫБОРА МАРШРУТА ОБРАБОТКИ И ОБОСНОВАНИЕ РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### 5.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Между отдельными поверхностями машин в процессе ее работы действуют кинематические, динамические, механические, электрические, гидравлические и другие связи.

При проектировании машины конструктор предусматривает такие связи, благодаря которым она выполняет свое служебное назначение.

В изделии размеры всех деталей взаимосвязаны. Эти взаимосвязи образуют сборочные размерные цепи.

Размерная цепь представляет собой совокупность размеров, образующих замкнутый контур. Размеры, образующие размерную цепь, называются звеньями. Звеньями размерных цепей могут быть любые линейные или угловые размеры: диаметры,

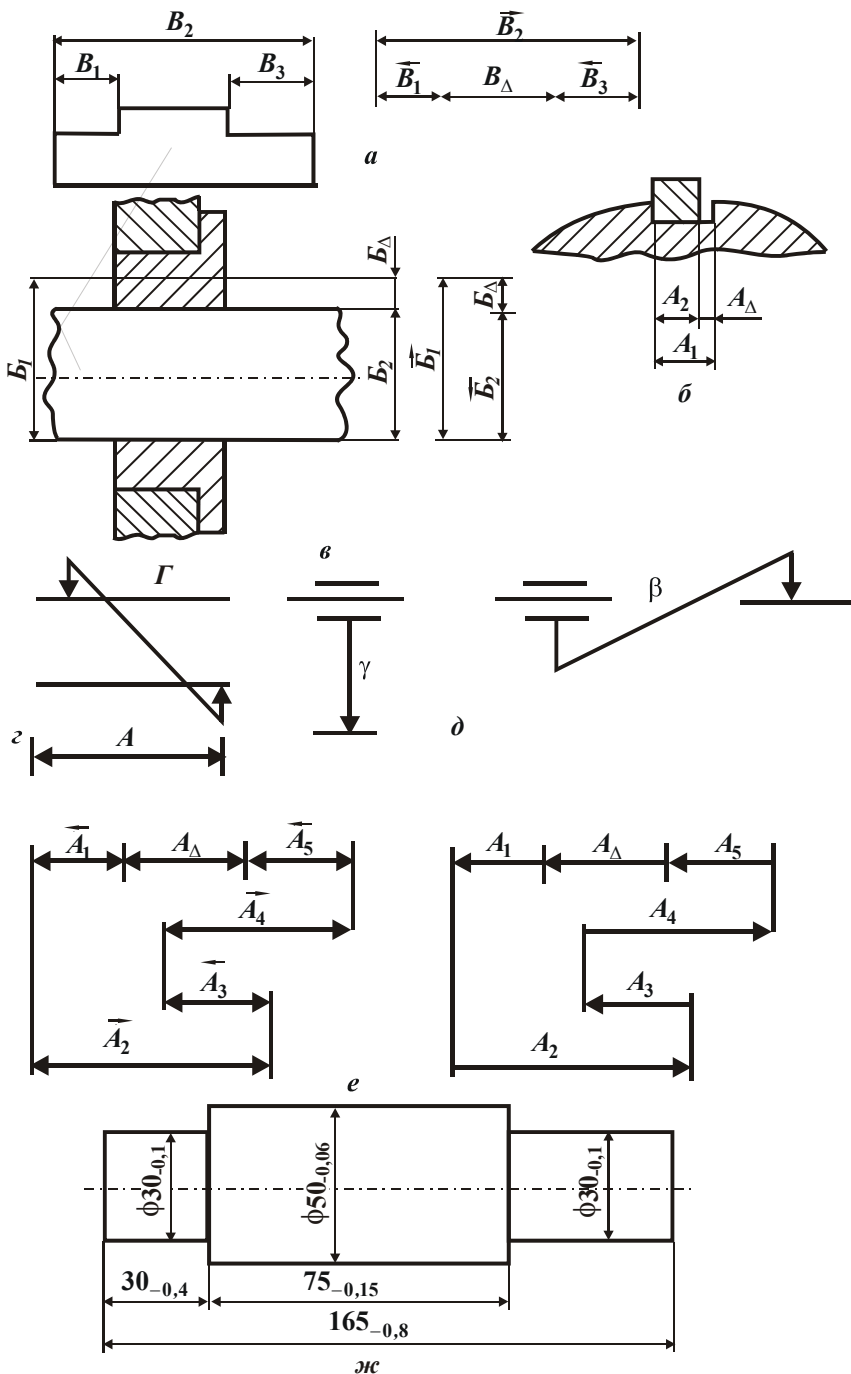


Рис. 5.1. Изображение размерных связей (а–е) и чертёж ступенчатого вала (ж).

расстояния между поверхностями или осями, зазоры, натяги и т.д. Размерные цепи изображаются в виде замкнутых схем (рис. 5.1,а-в), на которых линейные звенья условно обозначаются двухсторонней стрелкой (рис. 5.1,г), а параллельность и перпендикулярность звеньев – односторонней стрелкой, направленной острием к базе (рис. 5.1,д). Цепи с линейными размерами обозначаются прописными буквами русского алфавита (А, Б, В, Г, Д), а цепи с угловыми размерами – строчными буквами греческого алфавита ( $\alpha, \beta, \lambda$ ).

Любая размерная цепь состоит из замыкающего звена  $A_{\Delta}$  и составляющих звеньев  $A_i$ . Составляющие звенья разделяются на увеличивающие и уменьшающие.

Увеличивающим звеном размерной цепи называется такое звено, с увеличением которого увеличивается замыкающее звено. Например, в размерной цепи (рис. 5.1,б) увеличение ширины шпоночного паза  $A_1$  увеличивает зазор  $A_{\Delta}$ , поэтому звено  $A_1$  – увеличивающее.

Уменьшающее звено размерной цепи – это составляющее звено, с увеличением которого замыкающее звено уменьшается. Например, для размерной цепи (рис. 5.1,а) увеличение звеньев  $B_1$  и  $B_3$  уменьшает замыкающее звено  $B_{\Delta}$ , поэтому звенья  $B_1$  и  $B_3$  уменьшающие.

Для выявления увеличивающих и уменьшающих звеньев размерной цепи ее представляют совокупностью векторов, направленных в соответствии с правилом обхода по контуру (рис. 5.1,е).

Стрелки над прописными буквами русского алфавита указывают на принадлежность к увеличивающим или уменьшающим звеньям. В увеличивающих звеньях стрелка направлена вправо ( $\vec{A}$ ), а в уменьшающих – влево ( $\vec{A}$ ).

При конструировании изделий требуемая точность замыкающего звена устанавливается из условий эксплуатации изделия и его служебного назначения. В зависимости от объекта производства, характера продукции, а так же точности обработки детали, точность сборки достигается различными методами: полной, неполной (частичной) и групповой взаимозаменяемостью, пригонкой и регулированием.

Метод достижения точности замыкающего звена выбирается в зависимости от допуска и числа составляющих звеньев размерной цепи с учетом конструктивных и технологических особенностей изделия, его служебного назначения, себестоимости изготовления и других факторов.

Простановка размеров на чертежах деталей должна обеспечивать получение кратчайших сборочных размерных цепей. Количество размеров должно быть достаточным для изготовления и контроля детали. Каждый размер следует проставлять на чертеже только один раз.

Размерная цепь на чертеже не должна быть замкнутой. Замыкающий размер обеспечивается в результате выполнения всех технологических переходов. Простановка размеров должна быть такой, чтобы при изготовлении детали наиболее точный ее размер имел минимальную накопленную погрешность.

Размеры на чертежах проставляют цепным, координатным и комбинированными методами. При цепном методе размеры проставляют последовательно – цепью. При такой простановке погрешность получается по каждому размеру не зависящей от погрешностей предыдущих размеров. Этот метод применяют при простановке межосевых расстояний, а также при обработке ступенчатых валиков, когда необходимо получить точные размеры участков между уступами.

При координатном методе размеры проставляют от одной базы. Точность выполнения любого размера не зависит от точности выполнения других размеров. Этот метод обеспечивает точное расположение обрабатываемых поверхностей относительно одной установочной базы.

Комбинированный метод сочетает цепной и координатный методы простановки размеров на чертеже. При этом следует учитывать характер производства и технологию обработки детали. Размеры на чертежах следует проставлять с учетом возможности обработки детали без изменения баз и пересчета припусков.

Какими бы достоинствами не обладал технологический процесс, он считается неприемлемым для производства, если при изготовлении деталей не обеспечиваются требуемая точность обработки и качество поверхностного слоя.

Один из резервов повышения точности обработки и улучшения качества поверхностного слоя – использование метода размерного анализа при проектировании технологических процессов.

Размерный анализ позволяет научно обосновать предельные значения технологических размеров и операционные припуски, выявить наиболее технологичную (с позиции механической обработки) простановку размеров на заготовках и, в конечном итоге, минимизировать издержки производства.

К моменту выполнения размерного анализа должен быть разработан технологический процесс, который прошел стадию логической оценки и признан пригодным с позиции основных положений технологии машиностроения для дальнейшей проработки и уточнения.

В принятом плане обработки должно быть научно обосновано количество переходов, обеспечивающих согласно чертежу, требуемую точность размеров, формы и взаимное расположение поверхностей, а также качество поверхностного слоя.

План обработки следует оформить операционными эскизами, которые допускается выполнять упрощенно. Соблюдение масштаба не обязательно, но деталь должна быть изображена в рабочем положении. На эскизе проставляются только технологические размеры, которые непосредственно обеспечиваются и контролируются на данной операции или позиции, а также указываются технологические базы. Поверхности, обработанные на данной операции (позиции), следует изображать утолщенными линиями.

Обоснование оптимального плана обработки технологического процесса предусматривает определение количества операций или переходов, обеспечивающих требуемую точность и качество поверхностного слоя.

Важный параметр технологического процесса, характеризующий последовательное превращение заготовки в готовую деталь, – уточнение, под которым понимается отношение допуска заготовки к допуску готовой детали.

Уточнение поверхностей различаются по геометрическому размеру  $\epsilon d_0$ , шероховатости  $\epsilon R_{z0}$  и взаимному расположению поверхностей  $\epsilon \Delta_0$ :

$$\epsilon d_0 = \frac{Td_{заг}}{Td_{дет}}; \quad \epsilon R_{z0} = \frac{TR_{z_{заг}}}{TR_{z_{дет}}}; \quad \epsilon \Delta = \frac{T\Delta_{заг}}{T\Delta_{дет}}, \quad (5.1)$$

где  $Td_{заг}$ ,  $TR_{z_{заг}}$ ,  $T\Delta_{заг}$  – допуски соответственно на размер, шероховатость, геометрическую форму и взаимное расположение поверхностей заготовок;  $Td_{дет}$ ,  $TR_{z_{дет}}$ ,  $T\Delta_{дет}$  – допуски соответственно на размер, шероховатость, геометрическую форму и взаимное расположение поверхностей деталей.

Количество операций или переходов определяется [60]:

$$K_j = \frac{lg \epsilon_{0j}}{a}, \quad (5.2)$$

где  $a$  – коэффициент ( $a=0,45\dots0,5$ );  $j = d$ ,  $R_z$ ,  $\Delta$  – индекс, обозначающий параметр геометрического размера, параметр шероховатости, форму и взаимное расположение поверхностей.

Для обоснования точности обработки и шероховатости поверхности на каждом переходе технологического процесса разность квалитетов точности между заготовкой и готовой деталью распределяется между переходами по закону прогрессивного убывания.

Определение квалитетов точности по технологическим переходам – исходная предпосылка для разработки маршрута обработки и выполнения размерного анализа.

К началу выполнения размерного анализа разрабатывается вариант технологического процесса, который признан пригодным для дальнейшей проработки.

Вычерчивают совмещенный эскиз детали и заготовки. Выше эскиза проставляют размеры детали с допусками, заданными конструктором, ниже – размеры заготовки, подлежащие определению. В соответствии с предварительно разработанным технологическим процессом обработки заготовки на эскизе детали условно наносят припуски. Все поверхности нумеруют слева направо. Через пронумерованные поверхности проводят вертикальные линии. Между вертикальными линиями сверху вниз, согласно последовательности обработки, указывают технологические размеры, полученные в результате выполнения каждого технологического перехода.

Для определения технологических размеров выявляют размерные цепи и составляют их уравнения.

Выявление размерных цепей непосредственно из размерной схемы технологического процесса – сложная и трудоемкая задача, т.к. технологические размерные цепи часто взаимосвязанные и присутствуют на схеме в неявном виде.

Технологические размеры могут совпадать или не совпадать с конструкторскими размерами, т.к. конструктор, решая свои задачи, при простановке размеров на чертеже не всегда имеет возможности учитывать требования технологии. Между тем, технология обработки и применяемое оборудование накладывают определенные требования к простановке размеров в технологическом документе. Например, простановка линейных размеров ступенчатого вала отличается при его обработке на токарном, револьверном, многорезцовом и гидрокопировальном станках и на станках с числовым программным управлением.

В зависимости от типа станка производится соответствующая простановка размеров. В одних случаях размеры проставляют координатным методом от одной измерительной базы, в других – в виде цепочки от торца. Поэтому при разработке технологии часто вместо конструкторских размеров проставляют технологические размеры от других баз, но допуски на эти размеры назначают с таким расчетом, чтобы при обработке обеспечивались конструкторские размеры в пределах допусков, заданных на чертеже.

В процессе обработки детали обычно участвуют две поверхности. С одной поверхности удаляют припуск, а вторая служит базой, от которой выдерживают технологические размеры.

Размерный анализ технологического процесса позволяет определить операционные размеры и допуски на них. Значения допусков существенно зависят от принятой последовательности обработки.

Недостатки принятой последовательности обработки поверхностей обнаруживают только после выполнения размерного анализа. Полученные чрезмерно ужесточенные, трудновыполнимые допуски на технологические размеры часто вынуждают технологов пересмотреть последовательность обработки поверхностей деталей с целью максимально возможного совмещения технологических, настроечных и конструкторских баз.

Размерный анализ технологических процессов на основе выявления и расчета технологических размерных цепей позволяет не только установить технологические размеры и допуски на них, но и более обоснованно разделить процесс на операции и переходы.

Для выявления технологических размерных цепей необходимо предварительно разработать технологический процесс обработки и размерную схему процесса.

Технологические размерные цепи наиболее рационально выявлять с помощью теории графов. При этом деталь в процессе ее изготовления рассматривается как геометрическая структура, состоящая из множества поверхностей и связей (размеров) между ними [113, 116, 245]. Приоритет в области применения теории графов для расчета технологических размерных цепей принадлежит Мордвинову Б.С. [244].

При анализе технологических размерных цепей поверхности заготовки и детали принимают за вершины, а размеры, связывающие эти поверхности, – за ребра. В теории графов чертеж детали представляют в виде деревьев. Дерево с конструкторскими размерами и



размерами припусков называется исходным, а дерево с технологическими размерами – производственным или технологическим.

Если оба дерева совместить, то совмещенный граф будет представлять собой геометрическую структуру технологического процесса или математическую модель. В совмещенном графе размерные связи превращаются в явные размерные цепи, т.к. информация, которую несет граф, позволяет производить все необходимые расчеты.

Замкнутые контуры на совмещенном графе образуют технологические размерные цепи. В этих цепях ребра исходного дерева являются замыкающими, а ребра производного дерева – составляющими звеньями.

В каждой замкнутой размерной цепи должно быть ребро исходного дерева (конструкторский размер или припуск) и ребра производного дерева (технологические размеры). Ребра производного дерева изображают в виде прямых линий со стрелками, показывающими в какую вершину они входят. Вершины (поверхности) обозначают окружностью с указанием внутри соответствующего номера поверхности. Ребра исходного дерева изображают в виде дуг, если они – конструкторские размеры, или в виде волнистых линий, если они – размеры припусков. В качестве корня дерева выбирают вершину (поверхность, к которой на размерной схеме не подходит ни одна стрелка) и изображают ее в виде двух концентрических окружностей.

Технологическая размерная цепь состоит из уменьшающих или увеличивающих звеньев. Увеличивающим называется звено, при увеличении которого увеличивается замыкающий размер. Уменьшающим называется звено, с увеличением которого уменьшается замыкающий размер. Уравнение для расчета замыкающего звена имеет вид:

$$\Delta = \sum_{i=1}^k \bar{C}_i - \sum_{q=1}^n \bar{C}_q,$$

где  $\bar{C}_i$ ,  $\bar{C}_q$  – соответственно увеличивающие и уменьшающие звенья.

Если замыкающим звеном является припуск  $Z$  последующего технологического перехода, то сначала из Приложения 1 определяют минимальный размер припуска  $Z_{min}$ , а затем составляют исходное уравнение размерной цепи:

$$Z_{min} = \sum_{i=1}^k \bar{C}_{i_{min}} - \sum_{q=1}^n \bar{C}_{q_{max}},$$

где  $\bar{C}_{i_{min}}$  – минимальный предельный размер увеличивающего звена размерной цепи;  $\bar{C}_{q_{max}}$  – максимальный предельный размер уменьшающего звена размерной цепи;  $k$ ,  $n$  – число соответственно увеличивающих и уменьшающих звеньев размерной цепи.

В технологических размерных цепях обычно одно из звеньев – искомое неизвестное. Например, искомое замыкающее звено – уменьшающий размер  $\bar{C}_{q_x}$ , тогда расчетное уравнение для определения этого звена имеет вид:

$$\bar{C}_{x_{max}} = \sum_{i=1}^k \bar{C}_{i_{min}} - \sum_{q=1}^{n-1} \bar{C}_{q_{max}} - Z_{min}.$$

Если искомый размер – увеличивающее звено, то

$$\bar{C}_{x_{min}} = Z_{min} - \sum_{i=1}^{k-1} \bar{C}_{i_{min}} + \sum_{q=1}^n \bar{C}_{q_{max}}.$$

После определения  $\bar{C}_{x_{max}}$  и  $\bar{C}_{x_{min}}$  устанавливают допуск на размер  $C_x$ . С учетом вида операции (черновая, чистовая) назначают допуск на размер. Для черновой обработки допуск назначается по Приложению 13, по 14-тому или 12-тому качеству точности, для чистовой обработки – по 10-тому или 11-тому качеству точности. Предельные отклонения назначают по посадкам  $h$ ,  $H$  (СТ СЭВ 144-75).

## 5.2. ОБОСНОВАНИЕ МАРШРУТА ОБРАБОТКИ СТУПЕНЧАТОГО ВАЛА И ВЫПОЛНЕНИЯ РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА

### 5.2.1. ОБОСНОВАНИЕ МАРШРУТА ОБРАБОТКИ

На конкретном примере научно обоснуем выбор маршрута обработки детали (рис. 5.1) и на основании размерного анализа определим операционные размеры и припуски на обработку. Рассмотрим заготовку штамповки повышенной точности ( $jT16$ ). Допуск на диаметр  $d=50$  мм заготовки  $T=1,9$  мм; на линейный размер  $L=165$  мм заготовки  $T=2,2$  мм; на размер  $L=30$  мм заготовки  $T=1,6$  мм; на размер  $L=75$  мм заготовки  $T=1,9$  мм (табл. 5.1). Допуски на деталь указаны на эскизе (рис. 5.1).

Таблица 5.1

## Допуски на размеры заготовки

Метод получения заготовки	Квалитет						Точности					
	JT9	JT10	JT11	JT12	JT13	JT14	JT15	JT16	JT17	JT18	JT19	JT20
1 Литье в оболочковые формы, литье в кокиль, центробежное литье.				●	—	—	—	●				
2 Литье в землю							●	—	—	—	—	●
3 Штамповка						●	—	—	—	●		
4 Поковка										●	—	—
5 Калиброванный прокат	●	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6 Прокат повышенной точности							●	—	—	—		
7 Прокат обычной точности								●	—	—		

Общее уточнение диаметра и линейных размеров:

$$\varepsilon_{d=50} = \frac{1,9}{0,06} = 31,7; \quad \varepsilon_{L=165} = \frac{2,2}{0,8} = 2,75;$$

$$\varepsilon_{L=75} = \frac{1,9}{0,15} = 12,6; \quad \varepsilon_{L=30} = \frac{1,6}{0,4} = 4,0.$$

По наибольшему уточнению найдем количество проходов. Для обеспечения точности диаметра  $50_{-0,06}$  количество проходов равно:

$$k_{d=50} = \frac{\lg \varepsilon_{d=50}}{0,5} = \frac{1,5}{0,5} = 3$$

(принимаем число проходов 3).

Для обеспечения точности диаметра  $75_{-0,15}$  количество проходов равно:

$$k_{L=75} = \frac{\lg \varepsilon_{L=75}}{0,5} = \frac{1,1}{0,5} = 2,2$$

(принимаем число проходов 2 – последовательно черновая обработка с двух сторон и чистовая обработка торцов).

Разность квалитетов:

$$n_{кв.d=50} = jT_{заг} - jT_{дет} = 16 - 9 = 7;$$

$$n_{кв.L=75} = jT_{заг} - jT_{дет} = 16 - 10 = 6.$$

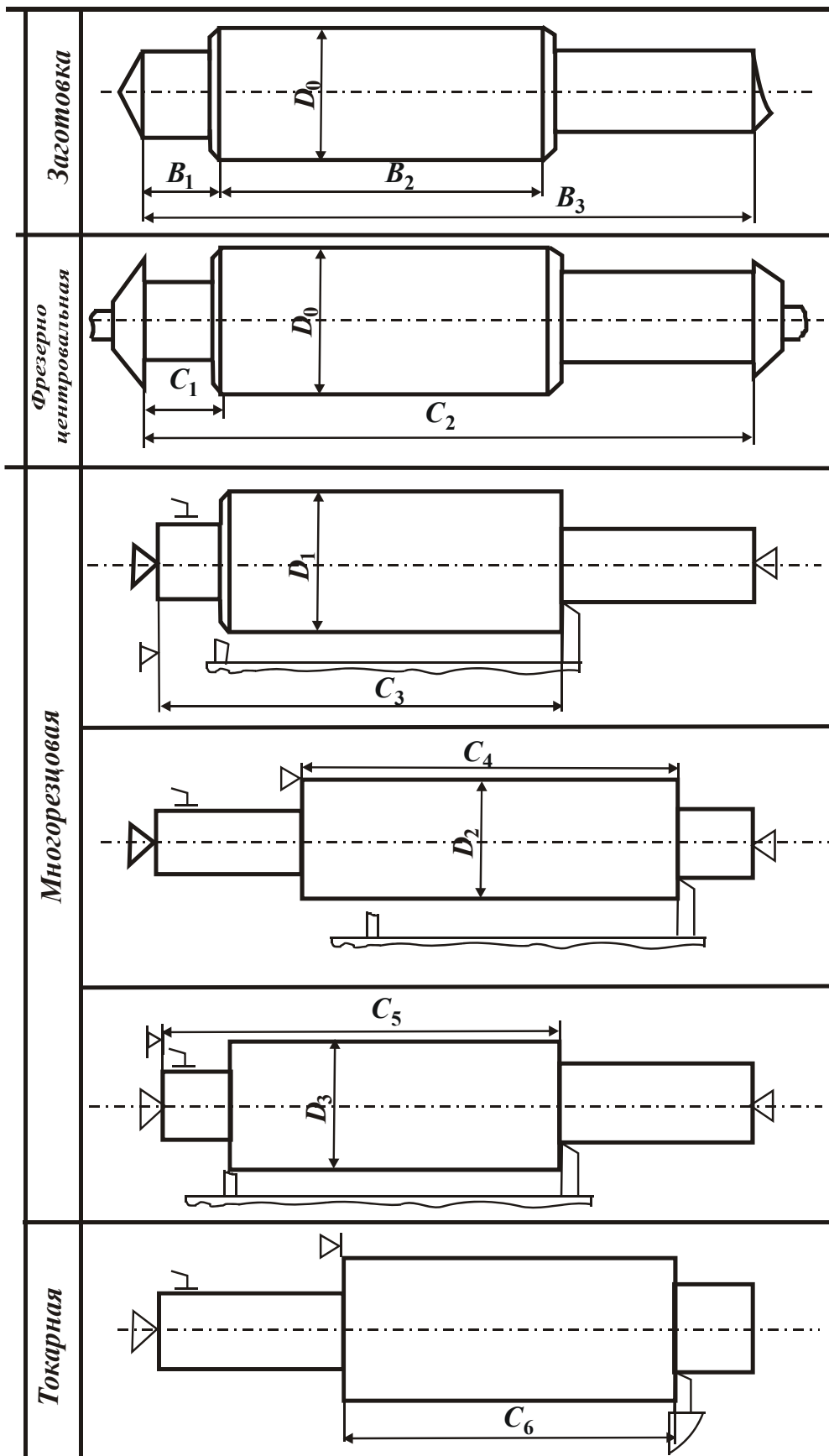


Рис. 5.2. Технологический процесс обработки ступенчатого вала.

Полученную разность квалитетов распределим по закону прогрессивного убывания:

- а) для диаметра  $\varnothing 50_{-0,06}$ :  $\Delta jT = 7 = 4 + 2 + 1$ ;
- б) для линейного размера  $75_{-0,15}$ :  $\Delta jT = 6 = 4 + 2$ .

Квалитеты точности по проходам:

- а) для диаметра  $\varnothing 50_{-0,06}$ :
  - 1) штамповка –  $jT 16$ ;
  - 2) механическая обработка:
    - I переход –  $h 12$ ,
    - II переход –  $h 10$ ,
    - III переход –  $h 9$ ;
- б) для линейного размера  $L = 75_{-0,15}$ :
  - 1) штамповка –  $jT 16$ ;
  - 2) механическая обработка:
    - I переход черновой –  $h 12$ ,
    - II переход чистовой –  $h 10$ .

На рис. 5.2 изображены эскизы технологического процесса обработки ступенчатого валика с указанием баз. Линейные размеры заготовки обозначены  $B_j$ , диаметры –  $D_0$ . Технологические размеры в направлении, параллельном оси детали, обозначены  $C_k$ , диаметральные –  $D_1, D_2, D_3$ .

Размерная схема технологического процесса обработки торцовых поверхностей показана на рис. 5.3. На последней, пятой операции, выдерживается размер  $C_6$ , который совпадает с конструкторским размером  $A_2$ . Его можно определить из двухзвенной размерной цепи. Технологические размеры  $C_5$  и  $C_6$  вместе с конструкторским размером  $A_1$  образуют размерную цепь (рис. 5.2), в которой размер  $C_6$  будет выполнен на пятой операции, а размер  $C_5$  – на четвертой. Размер  $A_1$  обеспечивается как замыкающий.

При назначении допусков на технологические размеры  $C_5$  и  $C_6$  следует иметь в виду, что допуск замыкающего звена равен сумме допусков составляющих звеньев. Технологический размер  $C_4$  определяется из размерной цепи замкнутого контура размеров  $C_5, C_6, C_4, C_3$  и  $Z_5$ . Минимальный припуск  $Z_5$  в рассматриваемой размерной цепи определяется по Приложению 9. В данную размерную цепь входит размер  $C_3$ , который определяется из размерной цепи второй операции, включающей размеры  $C_3, C_5$  и  $Z_5$ . Размер  $C_2$  совпадает с конструкторским размером  $A_3$  и определяется из двухзвенной раз-

мерной цепи. Для определения размера  $C_1$  используется размерная цепь из размеров  $C_4$ ,  $C_3$ ,  $C_1$  и  $Z_4$ .

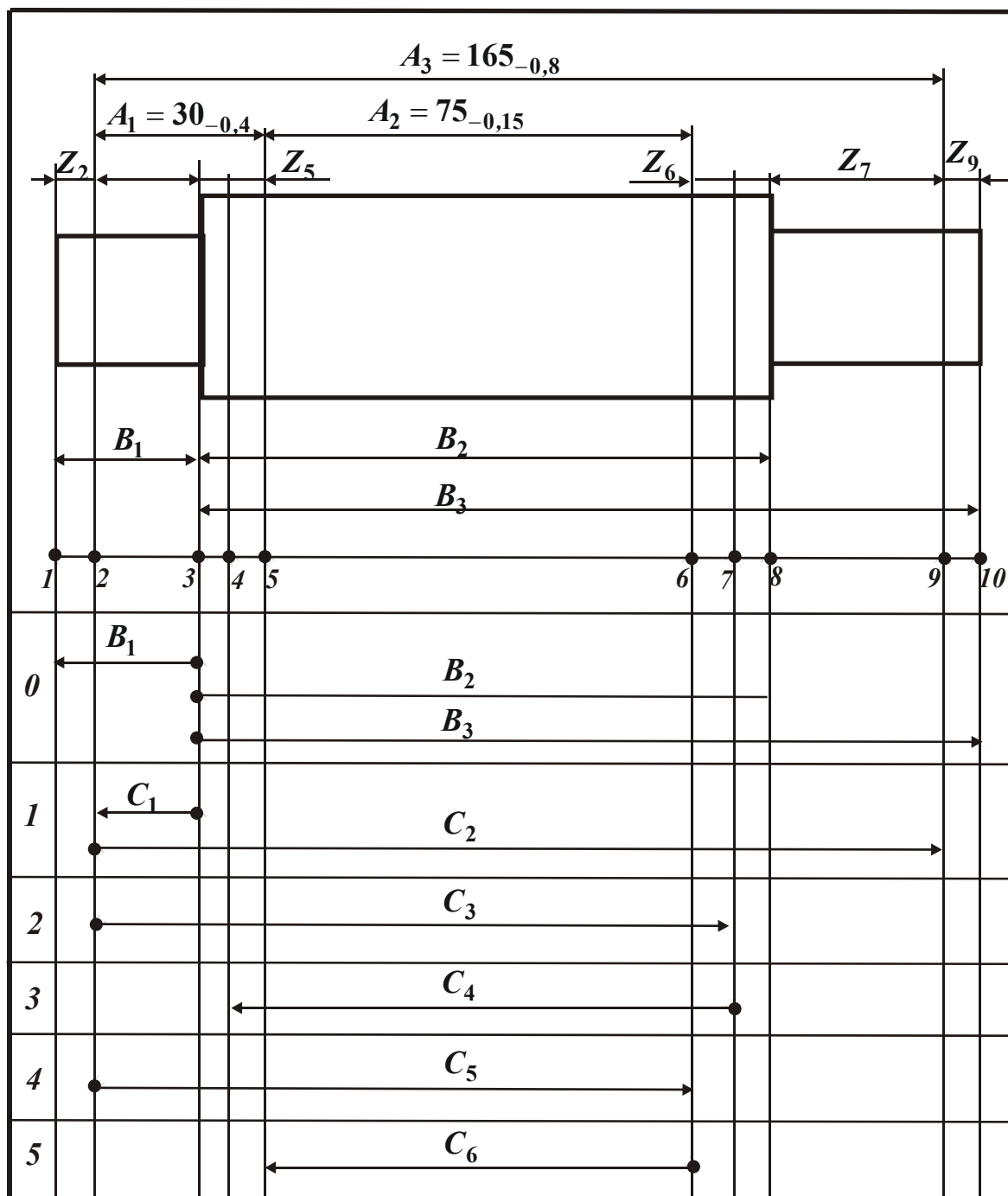


Рис. 5.3. Размерная схема технологического процесса обработки ступенчатого вала.

Как видно, расчет технологических размеров по размерной схеме – достаточно трудоемкая задача. Процесс расчета технологических размерных цепей значительно упрощается с применением теории графов.

## 5.2.2. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ РАЗМЕРОВ ВАЛА С ПОМОЩЬЮ ГРАФОВ

При изображении размерных цепей в виде графа, каждой поверхности заготовки и поверхности, возникающей при обработке, присваивается номер (рис. 5.3). Чертежные размеры и заранее назначенные значения минимальных припусков ( $Z_{min}$ ), приведенные в приложениях, выступают в роли заданных замыкающих звеньев в цепи, а все операционные размеры, включая размеры заготовки, - искомым составляющих звеньев.

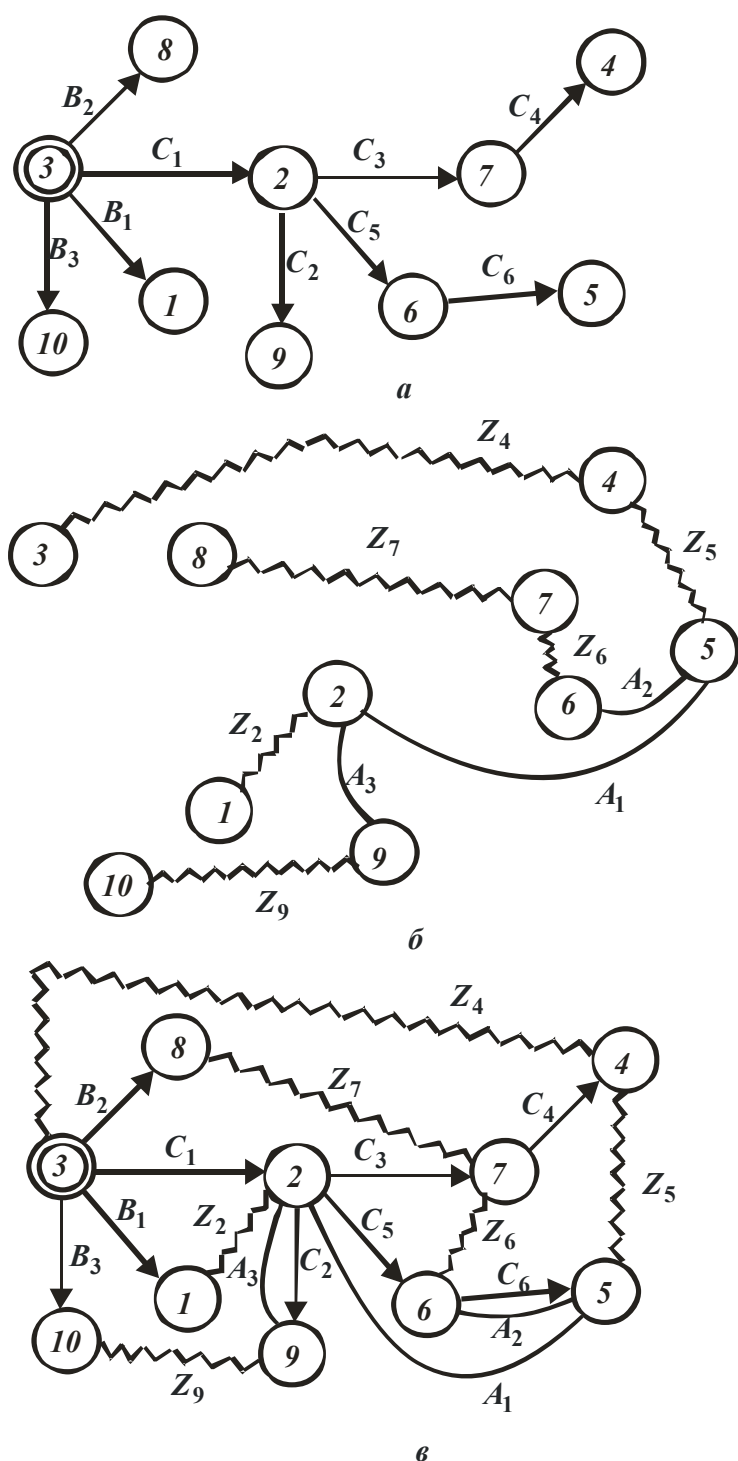


Рис. 5.4. Деревья графа размерных связей: а – технологическое, б – производное, в – совмещенное.

приложениях, выступают в роли заданных замыкающих звеньев в цепи, а все операционные размеры, включая размеры заготовки, - искомым составляющих звеньев.

Понятие “граф” проще всего определять через его символическую запись: граф – это точки, соединенные линиями. Точки (вершины графа) соответствуют поверхностям детали, линии (ребра графа) – размерам или допускам.

Если принять поверхность детали за вершины, а связи (размеры между ними) – за ребра, то чертеж детали с конструкторскими и технологическими размерами можно представить в виде двух деревьев. ДЕРЕ-

во с конструкторскими размерами и припусками называется исходным (рис. 5.4,б), дерево с технологическими размерами – производным (технологическим), рис. 5.4,а. Совмещенное дерево представляет собой структуру технологического процесса, рис. 5.4,в.

После построения исходного и производного деревьев необходимо проверить правильность построения графа, используя при этом следующие правила:

- число вершин у каждого дерева должно быть равно числу поверхностей по размерной схеме технологического процесса;
- число ребер у каждого дерева должно быть одинаковым и равно числу  $(n - 1)$ , где  $n$  – число вершин. К каждой вершине производного дерева, помимо корневой, должна подходить только одна дуга, а к корневой вершине – ни одной;
- деревья не должны иметь разрывов или замкнутых контуров.

В качестве корня дерева выбирают вершину (поверхность), к которой не подходит ни одна стрелка. Такая вершина на размерной схеме (рис. 5.3) – поверхность 3. Из нее выходят стрелки размером  $C_1$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$ , которые направлены к вершинам 2, 1, 8, 10. Из вершины 2 выходят стрелки (размеров)  $C_2$ ,  $C_3$  и  $C_5$  к вершинам 9, 7, 6, а из вершин 6 и 7 – стрелки (размеров)  $C_6$  и  $C_4$  к вершинам 5 и 4.

Для определения знаков составляющих звеньев пользуются таким правилом: при движении по замкнутому контуру от вершины с меньшим номером к вершине с большим номером ребру присваивается знак “+” и, наоборот, при движении от вершины большего номера к вершине меньшего номера – знак “–”.

Таблица 5.2

Уравнения для расчета технологических размеров

№ п/п	Расчетное уравнение	Исходное уравнение	Определяемый параметр
1	$-A_3 + C_2 = 0$	$A_3 = C_2$	$C_2$
2	$-A_2 + C_6 = 0$	$A_2 = C_6$	$C_6$
3	$-A_1 + C_5 - C_6 = 0$	$A_1 = C_5 - C_6$	$C_5$
4	$-Z_6 - C_5 + C_3 = 0$	$Z_6 = C_3 - C_5$	$C_3$
5	$-Z_5 + C_4 - C_3 + C_5 - C_6 = 0$	$Z_5 = C_4 + C_5 - C_3 - C_1$	$C_4$
6	$-Z_4 - C_1 + C_3 - C_4 = 0$	$Z_4 = C_3 - C_1 - C_4$	$C_1$
7	$-Z_2 + B_1 - C_1 = 0$	$Z_2 = B_1 - C_1$	$B_1$
8	$-Z_7 - C_3 + C_1 + B_2 = 0$	$Z_7 = B_2 + C_1 - C_3$	$B_2$
9	$-Z_9 - C_2 + C_1 + B_3 = 0$	$Z_9 = B_3 + C_1 - C_2$	$B_3$





ляют как среднее арифметическое величин  $Z_3$  и  $Z_5$ :

$$Z_4 = \frac{Z_3 + Z_5}{2} = \frac{0,6 + 2}{2} = 1,3 \text{ мм.}$$

Минимальный технологический размер  $D_2$  определяется из уравнения  $Z_{3min} = D_{2min} - D_{1max}$ , откуда

$$D_{2min} = Z_{3min} + D_{1max} = 50,6 \text{ мм.}$$

Минимальный технологический размер  $D_3$  определяется из уравнения  $Z_4 - D_3 + D_2 = 0$ , откуда  $Z_4 = D_3 - D_2$ ;

$$Z_{4min} = D_{3min} - D_{2max}; D_{3min} = Z_{4min} + D_{2max}.$$

Для определения максимального размера  $D_{2max}$  необходимо знать допуск  $TD_2$ . Из Приложения 13 устанавливаем допуск для 10-го качества точности  $TD_2 = 0,12$ .

Максимальный диаметр:

$$D_{2max} = D_{2min} + TD_2 = 50,6 + 0,12 = 50,72 \text{ мм.}$$

Минимальный диаметр  $D_3$ :  $D_{3min} = 1,3 + 50,72 = 52,02 \text{ мм.}$

Допуск на размер  $D_3$  выбираем из Приложения 13 (для 12-го качества точности  $TD_3 = 0,4$ ).

Минимальный размер заготовки  $D_0$ :  $Z_5 = D_0 - D_3 = 0$ ,  $Z_{5min} = D_{0min} - D_{3max}$ , откуда

$$D_{0min} = Z_{5min} + D_{3max} = 2,0 + 52,42 = 54,42 \text{ мм.}$$

Уравнения для расчета технологических размеров сведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Уравнения для расчета технологических размеров

№ п/п	Расчетное уравнение	Исходное уравнение	Определяемый параметр
1	$Z_3 = D_2 - D_1$	$D_{2min} = Z_{3min} + D_{1max}$	$D_2 = 50,72_{-0,12}$
2	$Z_4 = D_3 - D_2$	$D_{3min} = Z_{4min} + D_{2max}$	$D_3 = 52,42_{-0,4}$
3	$Z_5 = D_0 - D_3$	$D_{0min} = Z_{5min} + D_{3max}$	$D_0 = 56,42_{-2,0}$

Предлагаем читателю самостоятельно решить следующую задачу. В табл. 5.4 приведены различные виды валиков и деталей типа вал-шестерня, имеющих определенные посадочные диаметры и линейные размеры. Требуется: разработать чертеж детали, определить маршрут обработки, разработать операционную технологию с указа-

нием операционных размеров и баз, выполнить размерный анализ с применением теории графов.

Таблица 5.4

Характеристики заготовок

Номер варианта	Вид исходной заготовки и качество точности	Диаметр посадочных шеек вала	Основной линейный размер
1	Штамповка ( <i>jT</i> 15)	35 <i>h</i> 6	250 <i>h</i> 8
2	Поковка ( <i>jT</i> 16)	45 <i>h</i> 8	200 <i>h</i> 8
3	Калиброванный прокат ( <i>jT</i> 11)	20 <i>h</i> 7	150 <i>h</i> 8
4	Прокат повышенной точности ( <i>jT</i> 14)	27 <i>h</i> 8	100 <i>h</i> 8
5	Прокат обычной точности ( <i>jT</i> 15)	38 <i>h</i> 6	300 <i>h</i> 8
6	Поковка на горизонтально-ковачной машине ( <i>jT</i> 15)	35 <i>h</i> 7	350 <i>h</i> 8

### 5.3. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА

#### 5.3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАРШРУТА ОБРАБОТКИ

Исходные данные для анализа: заготовка – поковка (*jT* 17), сталь 12ХН4А HRC 60-62. Ширина зубчатого венца по чертежу (рис. 5.6) равна 40<sub>0,06</sub>, обеспечивается по 9-тому качеству точности *jT* 9.

Для проведения размерного анализа необходимо обосновать требуемый маршрут обработки, обеспечивающий получение нужной точности размера 40<sub>0,06</sub>.

$$\text{Общее уточнение: } \varepsilon_{L=40} = \frac{2,5}{0,06} = 41,7.$$

По величине уточнения определим количество проходов  $K_{L=40} = \frac{\lg \varepsilon_{L=40}}{0,5} = \frac{1,62}{0,5} = 3,2$ : (принимаем число проходов 3).

$$\text{Разность квалитетов: } n_{кв.L=40} = jT_{заг} - jT_{дет} = 17 - 9 = 8.$$

Полученную разность квалитетов распределим по закону прогрессивного убывания  $\Delta jT = 8 = 4 + 3 + 1$ .

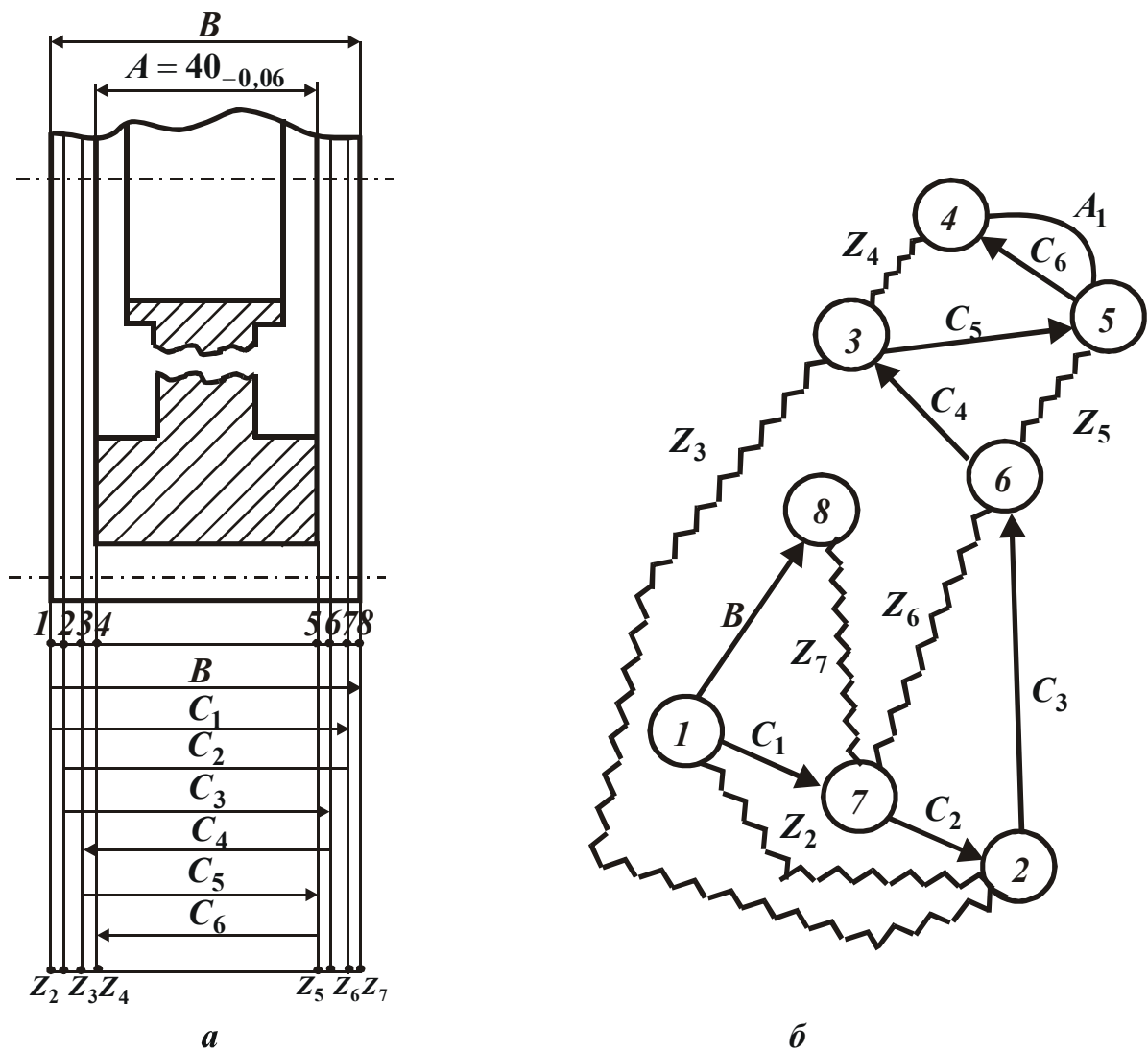


Рис. 5.6. Размерная схема (а) и граф размерных связей (б).

Квалитеты точности по проходам:

- а) поковка -  $jT 17$ ;
- б) механическая обработка:
  - І проход (точить начерно) –  $h 13$ ,
  - ІІ проход (точить начисто) –  $h 10$ ;
- в) шлифовать -  $h 9$ .

### 5.3.2. РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ОБРАБОТКИ ТОРЦЕВ

В качестве корня дерева (рис. 5.6) выбрана поверхность 1, от которой установлены две связи:  $B$  – размер заготовки и  $C_1$  – черновая обточка торца.

Расчет технологических размеров следует начинать с замкнутого контура, включающего чертежный размер  $A=40_{-0,06}$  и припуск  $Z_4$ .

Однако, для решения уравнений размерной цепи в замкнутых контурах графа необходимо знать минимальные припуски  $Z_2 = Z_7$  для черновой обработки,  $Z_3 = Z_6$  – для чистового точения,  $Z_4 = Z_5$  – для операции шлифования. Их находят соответственно так:  $Z_2 = Z_7 = 1,0$  мм;  $Z_3 = Z_6 = 0,4$  мм;  $Z_4 = Z_5 = 0,15$  мм.

Уравнение для расчета технологического расчета  $C_5$  имеет вид:  
 $C_5 - C_6 - Z_4 = 0$ , откуда  $Z_{4min} = C_{5min} - C_{6max}$  или  
 $C_{5min} = Z_{4min} + C_{6max}$ .

Допуски на технологические размеры находим из Приложения 13. Для операции чернового точения торца  $jT 12$  допуск  $T = 0,34$  мм. Для операции чистового точения торца  $jT 10$  допуск  $T = 0,10$  мм. Для шлифования  $jT 9$ , допуск  $T = 0,6$  мм.

Уравнения для расчета технологических размерных цепей, вывлеченных из совмещенного графа (рис. 5.6,б), приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Уравнения для расчета технологических размерных цепей

№ п/п	Расчетное уравнение	Исходное уравнение	Определяемый параметр
1	$-A_1 + C_6 = 0$	$A_1 = C_6$	$C_6 = 40_{-0,06}$
2	$-Z_4 + C_5 - C_6 = 0$	$Z_4 = C_5 - C_6$	$C_5 = 40,25_{-0,1}$
3	$-Z_5 - C_5 + C_4 = 0$	$Z_5 = C_4 - C_5$	$C_4 = 40,5_{-0,1}$
4	$-Z_3 + C_3 - C_4 = 0$	$Z_3 = C_3 - C_4$	$C_3 = 41,24_{-0,34}$
5	$-Z_6 - C_3 + C_2 = 0$	$Z_6 = C_2 - C_3$	$C_2 = 41,98_{-0,34}$
6	$-Z_2 + C_1 - C_2 = 0$	$Z_2 = C_1 - C_2$	$C_1 = 43,08_{-1,0}$
7	$-Z_7 + B - C_1 = 0$	$Z_7 = B - C_1$	$B = 46,58_{-2,5}$

*Примечание.* Выполненный размерный анализ позволил найти операционные размеры по ходу технологического процесса. Однако, он не учитывает дополнительные ограничения, которые связаны с наличием цементации. В технических условиях чертежа (рис. 5.6) оговаривают твердость материала и глубину цементированного слоя. Эти параметры должны быть обеспечены технологией механической обработки. Для всех видов химико-термической обработки твердость металла снижается по мере углубления от поверхности. Следовательно, с увеличением снимаемых припусков при шлифовании твердость термоупрочненных слоев на поверхности готовой детали будет уменьшаться. В связи с этим, при разработке технологического про-

цесса необходим размерный анализ для оценки выполнения технических условий, регламентируемых чертежом.

### 5.3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЦЕМЕНТИРОВАННОГО СЛОЯ НА ТОРЦАХ ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА

Торцы зубчатого колеса перед операцией плоского шлифования подвергаются цементации с последующей закалкой до HRC 58-60. Глубина цементированного слоя на готовой детали должна быть 0,7...0,8 мм.

На рис. 5.7 изображена размерная схема. Согласно технологическому процессу с торцов зубчатого колеса припуски снимаются шлифованием. С удалением припуска уменьшается толщина цементуемого слоя.

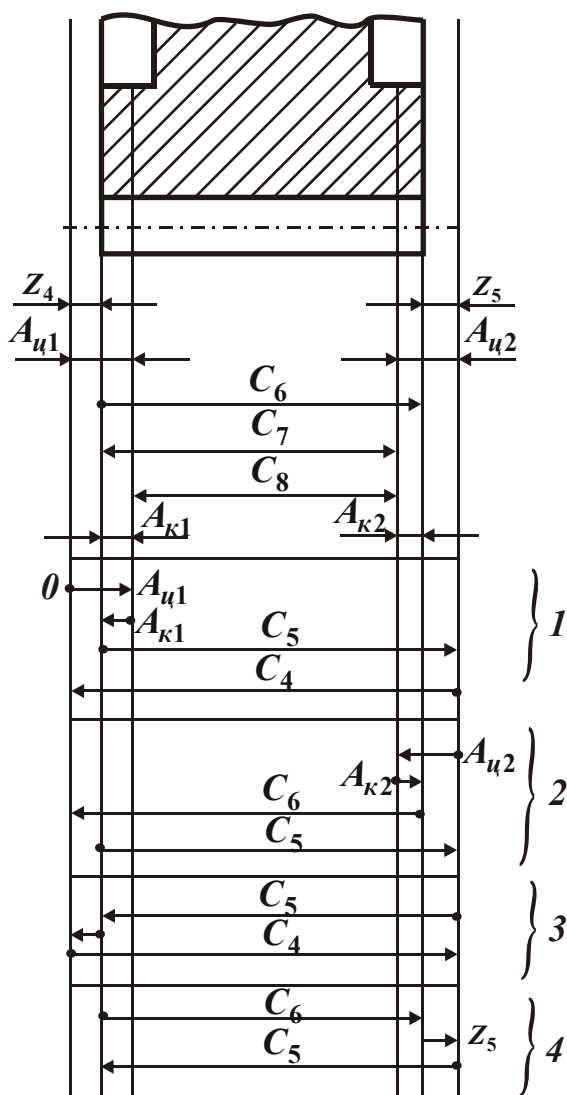


Рис. 5.7. Размерная схема для определения толщины цементированного слоя.

Для обеспечения технических условий, регламентируемых чертежом, необходимо определить требуемую глубину цементации, учитывая снимаемый припуск при шлифовании. Размерный анализ следует начинать с определения максимально допустимых припусков под шлифование  $Z_4$  и  $Z_5$ , при удалении которых на поверхности детали твердость будет не ниже HRC 50-60. Выполнение этого требования зависит от оставшейся толщины цементированного слоя  $A_{к1}$  и  $A_{к2}$  от глубины цементированного слоя  $A_{у1}$  и  $A_{у2}$ . Припуски под шлифование ранее были определены:  $Z_4 = Z_5 = 0,15$  мм. Технологические размеры  $C_4$ ,  $C_5$  и  $C_6$  приведены в табл. 5.5. Параметры  $A_{к1}$  и  $A_{к2}$  регламентированы технологическими условиями чертежа  $A_{к1} = A_{к2} = 0,7...0,8$

мм. Глубину цементированного слоя находят из системы уравнений размерных цепей 1 и 2, рис. 5.7. При написании уравнений размерных цепей выбирают, например, точку “0” и допускают, что размеры, расположенные слева направо, условно обозначаются со знаком “+”, а размеры, идущие в противоположном направлении, “-”. Исходя из этих условий, системы уравнений (5.1) и (5.2) размерных цепей имеют вид:

$$\begin{cases} A_{\text{ц1}} - A_{\text{к1}} + C_5 - C_4 = 0, \\ -A_{\text{ц2}} + A_{\text{к2}} - C_5 + C_4 = 0. \end{cases} \quad (5.3)$$

После подстановки известных величин получим:

$$\begin{aligned} A_{\text{ц1}} - 0,8 + 40,25 - 40,5 &= 0, \\ -A_{\text{ц2}} + 0,8 - 40 + 40,5 &= 0, \end{aligned}$$

откуда  $A_{\text{ц1}} = 1,05$  мм,  $A_{\text{ц2}} = 1,3$  мм.

Процесс шлифования сопровождается высокой теплонапряженностью. Под воздействием высоких температур в поверхностном слое на шлифуемых поверхностях могут возникать прижоги и трещины. Чтобы избежать появления дефектов, технологи обращают особое внимание на режимы шлифования. Размерный анализ основывается на обеспечении требуемой точности, но он не учитывает формирование физико-механических свойств поверхностного слоя.

Для обеспечения требуемого качества поверхностного слоя необходимо число проходов и режимы шлифования назначать исходя из следующего условия: глубина дефектного слоя не должна превышать оставшийся припуск на обработку.

#### 5.3.4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИПУСКА ПО ПРОХОДАМ ПРИ ЗУБОШЛИФОВАНИИ

Глубина проникновения высоких температур, вызывающих структурные превращения в поверхностном слое, описывается математической зависимостью

$$x_{\text{max}} = \alpha \cdot q \cdot (\tau - \tau_0)^\beta, \quad (5.4)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, зависят от безразмерной температуры  $\theta$ :

$$\theta = \frac{\pi \cdot T \cdot \lambda \cdot V_n}{2 \cdot q \cdot a}, \quad (5.5)$$

$(\tau - \tau_0)$  – приращение времени нагрева, пропорциональное ширине

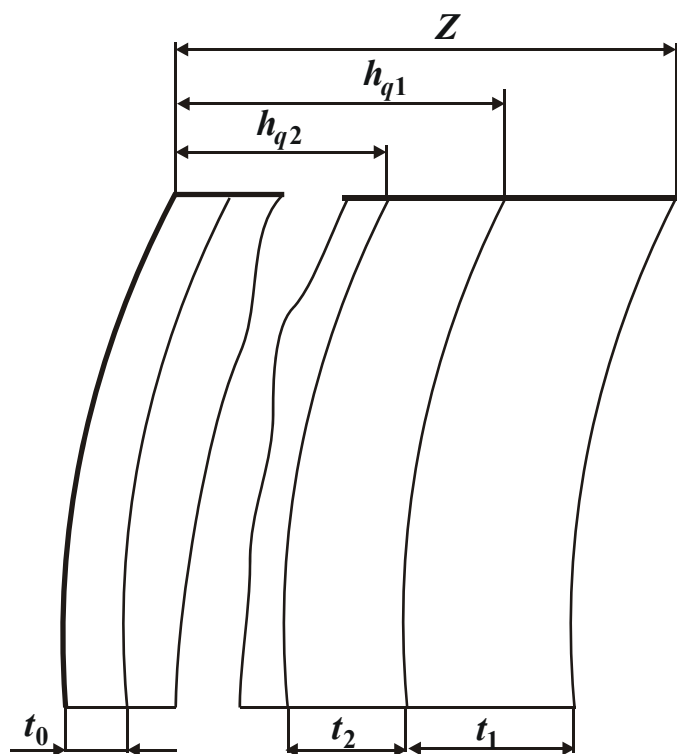


Рис. 5.8. Схема оптимального распределения припусков на проход при зубошлифовании.

образующегося при многопроходном зубошлифовании, уменьшается от прохода к проходу и остается равной оставшемуся припуску.

Указанное условие графически показано на рис. 5.8. Общий припуск  $Z$  снимается с профилей зубьев и равен сумме глубин резания по проходам, т.е.

$$Z = \sum_{i=1}^n t_i. \quad (5.6)$$

Например, при снятии оптимального припуска  $t_1$  образуется

дефектный слой глубиной  $h_{d1} = \sum_{i=2}^n t_i$ , при снятии следующего при-

пуска глубина дефектного слоя  $h_{d2} = \sum_{i=3}^n t_i$  и т.д.

#### 5.4. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСНОЙ ДЕТАЛИ И РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ

На рис. 5.9 изображен чертеж корпусной детали. Заготовка получена литьем в земляную форму.

теплового источника.

Таким образом, глубина проникновения дефектного слоя находится в нелинейной зависимости от времени воздействия теплового источника и пропорционально приращению плотности теплового потока  $q$ .

Для определения зубошлифования углеродистых сталей с достаточной для практики точностью можно принять  $\alpha=0,249$ ,  $\beta=0,932$ . Максимальная производительность достигается в том случае, когда глубина дефектного слоя,



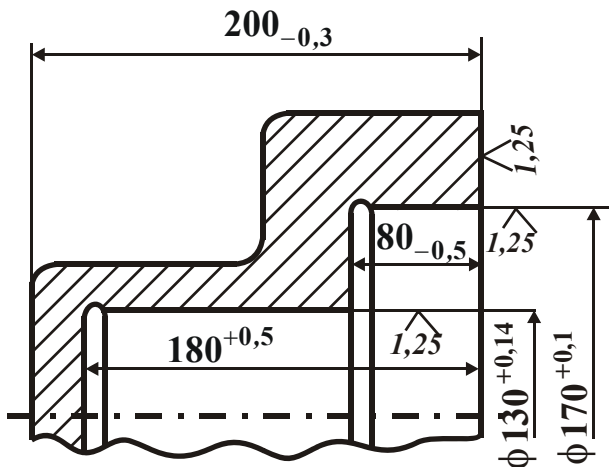


Рис. 5.9. Чертеж корпусной детали.

По табл. 5.1 определим точность заготовки ( $jT$  16).

Допуски на линейные размеры заготовки:  $L_1=200$  мм,  $T=2,2$  мм. Допуски на размеры детали и качества точности:  $L_1=200$  мм,  $T=0,3$  мм,  $jT=11$ ,  $L_2=180$  мм,  $T=0,5$  мм,  $jT=12$ ,  $L_3=170$  мм,  $T=0,1$  мм,  $jT=9$ ,  $D_2=130$  мм,  $T=0,14$  мм,  $jT=10$ .

Допуски на диаметральные размеры заготовки:  $D_{заг}=170$  мм,  $T=2,5$  мм,  $D_{заг}=130$  мм,  $T=2,5$  мм.

Общее уточнение на диаметры и линейные размеры:

$$\varepsilon_{d=170} = \frac{2,5}{0,1} = 25, \quad \varepsilon_{d=130} = \frac{2,5}{0,14} = 17,86,$$

$$\varepsilon_{L=180} = \frac{2,5}{0,5} = 5, \quad \varepsilon_{L=200} = \frac{2,9}{0,5} = 5,8, \quad \varepsilon_{L=80} = \frac{2,2}{0,5} = 4,4.$$

По величине уточнения найдем количество переходов, необходимое для получения требуемой точности:

$$а) K_{d=170} = \frac{\lg \varepsilon_{d=170}}{0,5} = \frac{1,39}{0,5} = 2,8$$

(принимаем  $K=3$ );

$$б) K_{d=130} = \frac{\lg \varepsilon_{d=130}}{0,5} = \frac{1,25}{0,5} = 2,4$$

(принимаем  $K=2$ );

$$в) K_{L=180} = \frac{\lg \varepsilon_{L=180}}{0,5} = \frac{0,7}{0,5} = 1,4$$

(принимаем  $K=1$ );

$$г) K_{L=200} = \frac{\lg \varepsilon_{L=200}}{0,5} = \frac{0,9}{0,5} = 1,8$$

(принимаем  $K=2$ );

$$д) K_{L=80} = \frac{\lg \varepsilon_{L=80}}{0,5} = \frac{0,64}{0,5} = 1,28$$

(принимаем  $K=1$ ).

Разность квалитетов:

$$n_{кв.d=170} = jT_{заг} - jT_{дем} = 16 - 9 = 7,$$

$$n_{кв.d=130} = jT_{заг} - jT_{дем} = 16 - 10 = 6,$$

$$n_{кв.L=180} = jT_{заг} - jT_{дем} = 16 - 12 = 4,$$

$$n_{кв.L=200} = jT_{заг} - jT_{дем} = 16 - 11 = 5,$$

$$n_{кв.L=80} = jT_{заг} - jT_{дем} = 16 - 13 = 3.$$

Полученную разность квалитетов распределим по закону прогрессивного убывания:

- а) для диаметра 170 мм:  $\Delta JT = 7 = 4 + 2 + 1$ ,
- б) для диаметра 130 мм:  $\Delta JT = 6 = 4 + 2$ ,
- в) для размера  $L = 200$  мм:  $\Delta JT = 5 = 3 + 2$ ,
- г) для размера  $L = 180$  мм:  $\Delta JT = 4 = 2 + 2$ ,
- д) для размера  $L = 80$  мм:  $\Delta JT = 3$ .

Установим квалитеты точности по проходам:

- а) для диаметра 170 мм
  - 1) литье в земляную форму  $JT = 16$ ,
  - 2) механическая обработка:
    - черновая обработка (точить начерно) –  $JT = 12$ ,
    - чистовая обработка (точить начисто) –  $JT = 10$ ,
    - отделочная обработка (шлифовать) –  $JT = 9$ ;
- б) для диаметра 130 мм
  - 1) заготовка  $JT = 16$ ,
  - 2) механическая обработка:
    - черновая обработка (точить начерно) –  $JT = 12$ ,
    - чистовая обработка (точить начисто) –  $JT = 10$ ;
- в) для размера  $L = 200$  мм
  - 1) заготовка  $JT = 16$ ,
  - 2) механическая обработка:
    - точить начерно –  $JT = 13$ ,
    - точить начисто –  $JT = 11$ ;
- г) для размера  $L = 180$  мм
  - 1) заготовка  $JT = 16$ ,
  - 2) механическая обработка:
    - точить начерно –  $JT = 14$ ,
    - точить начисто –  $JT = 12$ ;
- д) для размера  $L = 80$  мм
  - 1) заготовка  $JT = 16$ ,
  - 2) механическая обработка:
    - точить начисто –  $JT = 13$ .

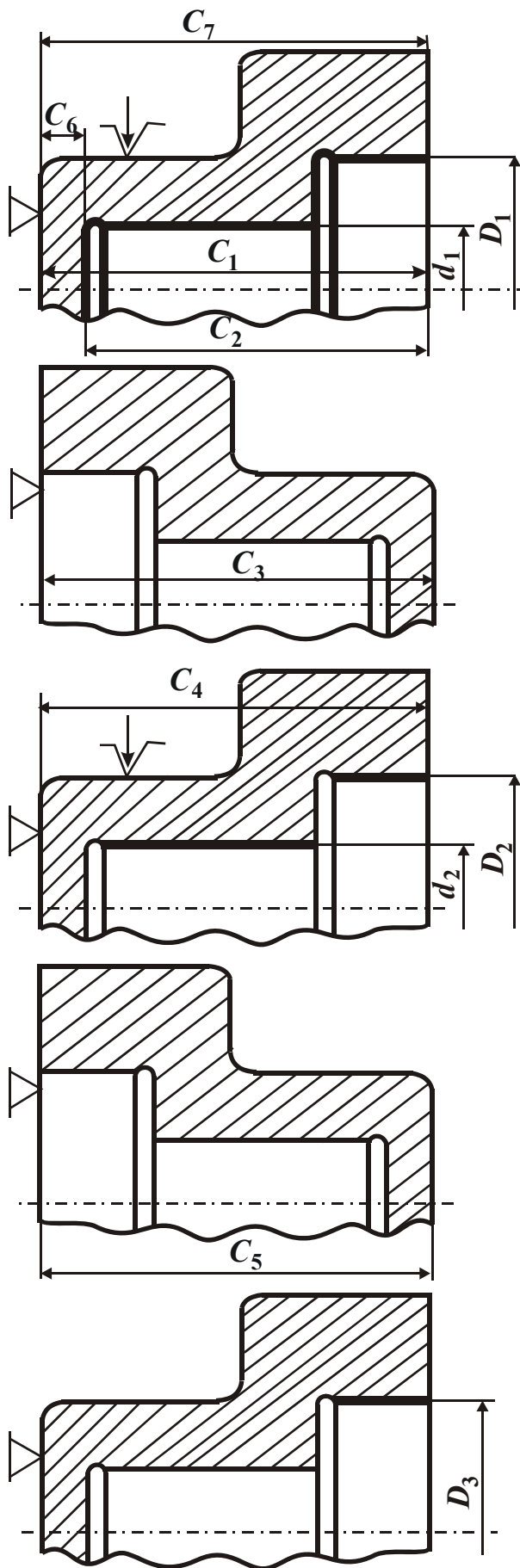


Рис. 5.10. Технология обработки корпусной детали.

На рис. 5.10 изображены эскизы технологического процесса обработки корпусной детали. Технологические размеры в направлении, параллельном оси детали, обозначены  $C_k$ , диаметральные –  $d_i$  и  $D_j$ .

Размерная схема технологического процесса обработки торцовых поверхностей показана на рис. 5.11. На рис. 5.12 изображены графы размерных связей линейных размеров (в направлении оси детали) и диаметральных размеров.

В качестве корня дерева выбрана вершина (поверхность) 1, к которой на размерной схеме технологического процесса не подходит ни одна стрелка. Из нее выходят размеры  $B_1$ ,  $C_1$  и  $C_7$ , которые направлены к вершинам соответственно 10, 9, 6. Каждый замкнутый контур совмещенного графа размерных связей образует размерную цепь, у которой конструкторские размеры и припуски являются замыкающими звеньями.

Начинать анализ технологических размерных цепей целесообразно с двухзвенных цепей, а затем

рассматривать замкнутые контуры в такой последовательности, чтобы в каждой цепи находилось только одно неизвестное звено. Остальные звенья должны быть определены в результате расчета предыдущих размерных связей.

Уравнения для расчета технологических размерных цепей, выявленных из замкнутых контуров графа (рис. 5.12), приведены в табл. 5.6. В уравнения (см. поз. 8 и 9) входят два неизвестных размера  $C_2$  и  $C_6$ . Поэтому они определяются из решения системы уравнения.

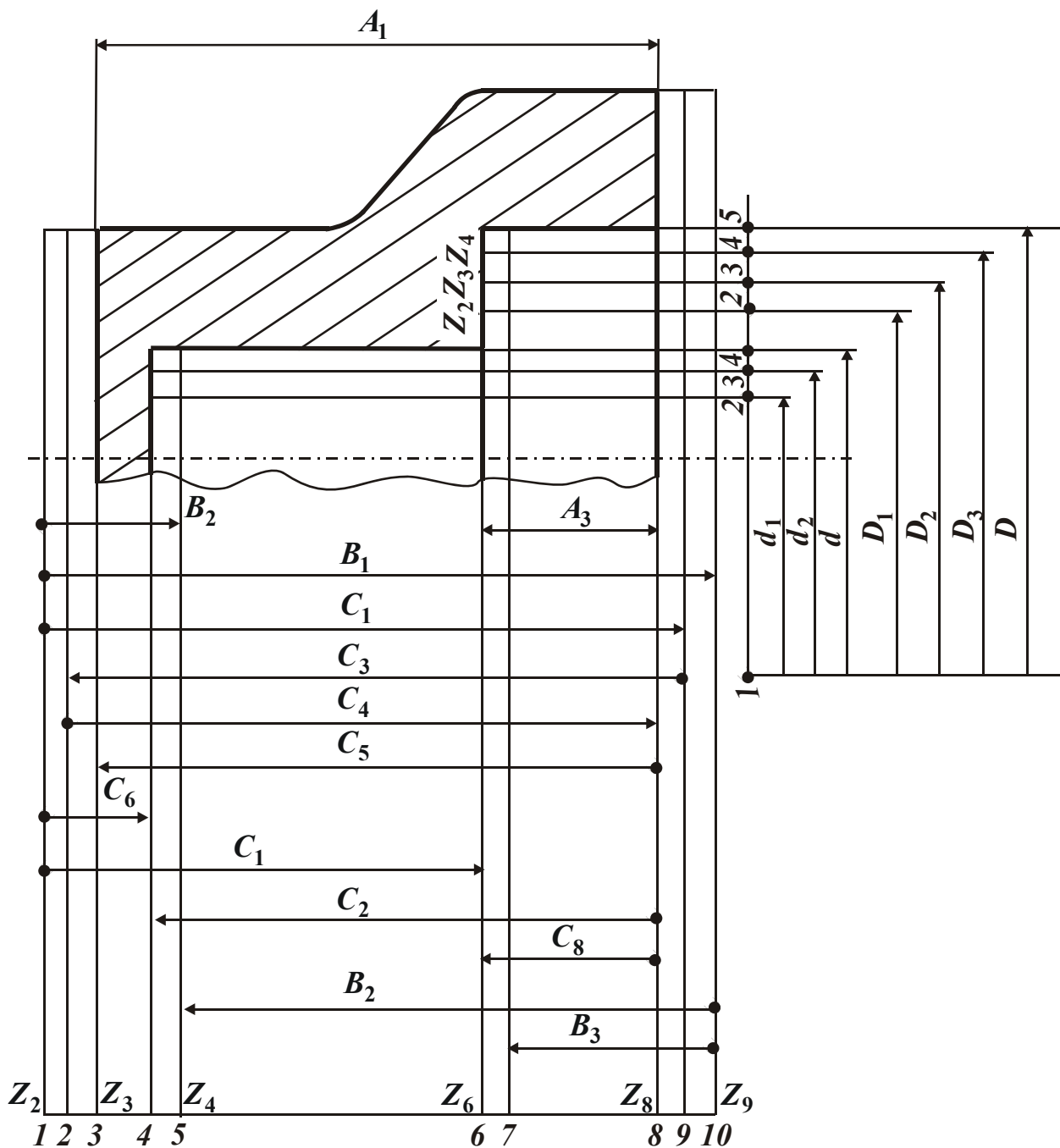


Рис. 5.11. Размерная схема технологического процесса обработки корпусной детали.

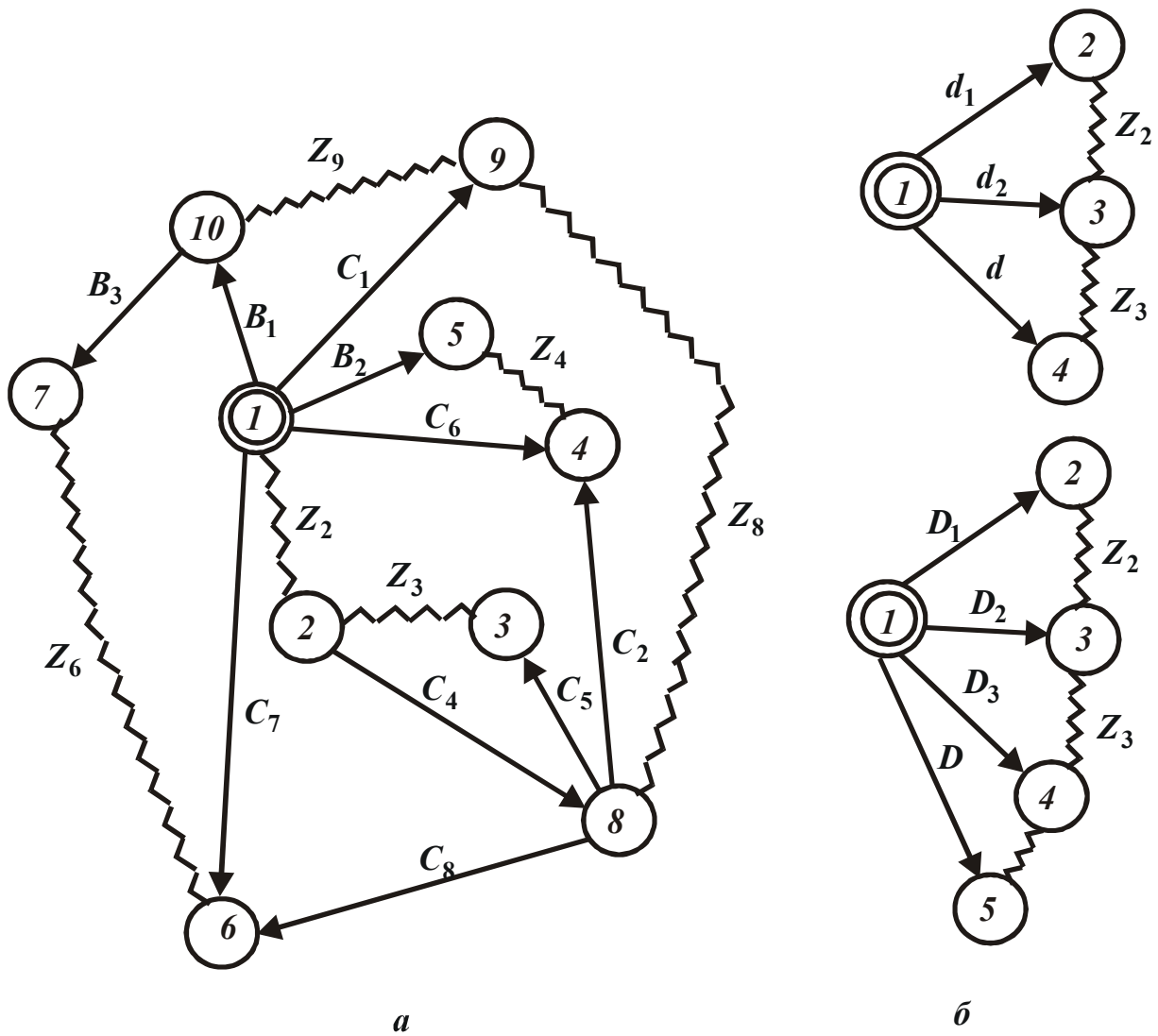


Рис. 5.12. Графы размерных связей: а – линейных, б – диаметральных размеров.

Таблица 5.6  
Уравнения для расчета технологических размерных цепей

№ п/п	Расчетное уравнение	Исходное уравнение	Определяемый параметр
1	$-A_1 + C_5 = 0$	$A_1 = C_5$	$C_5$
2	$-A_3 + C_8 = 0$	$A_3 = C_8$	$C_8$
3	$-Z_3 + C_4 - C_5 = 0$	$Z_3 = C_4 - C_5$	$C_4$
4	$-Z_2 + C_7 + C_8 - C_4 = 0$	$Z_2 = C_7 + C_8 + C_4$	$C_7$
5	$-Z_8 - C_8 - C_7 + C_1 = 0$	$Z_8 = C_1 - C_8 - C_7$	$C_1$
6	$-Z_9 - C_1 + B_1 = 0$	$Z_9 = B_1 - C_1$	$B_1$
7	$-Z_6 - C_7 + B_1 - B_3 = 0$	$Z_6 = B_1 - B_3 - C_7$	$B_3$
8	$-Z_6 + C_8 - C_2 - C_6 + B_1 + B_3 = 0$	$Z_6 = C_8 - C_2 - C_6 + B_1 - B_3$	$C_2, C_6$
9	$-Z_8 + C_2 - C_6 + C_1 = 0$	$Z_8 = C_2 - C_6 + C_1$	
10	$-Z_4 - C_6 - B_2 = 0$	$Z_4 = B_2 - C_6$	$B_2$

В табл. 5.7 приведены расчетные и исходные уравнения для расчета диаметральных технологических размеров корпусной детали.

Таблица 5.7

Уравнения для расчета диаметральных технологических размеров

№ п/п	Расчетное уравнение	Исходное уравнение	Определяемый параметр
1	$-Z_3 - d_2 + d = 0$	$Z_3 = d - d_2$	$d_2$
2	$-Z_2 - d_1 + d_2 = 0$	$Z_2 = d_2 - d_1$	$d_1$
3	$-Z_4 - D_3 + D = 0$	$Z_4 = D - D_3$	$D_3$
4	$-Z_3 - D_2 + D_3 = 0$	$Z_3 = D_3 - D_2$	$D_2$
5	$-Z_2 - D_1 + D_2 = 0$	$Z_2 = D_2 - D_1$	$D_1$

## 5.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИПУСКА ПОД РАСТОЧКУ ОТВЕРСТИЯ ДИАМЕТРОМ $40^{+0,07}$ КОРПУСНОЙ ДЕТАЛИ

### 5.5.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ АНАЛИЗА

Заготовка-литье в земляную форму. Материал – чугун СЧ15. Квалитет точности заготовки, согласно табл. 5.1, – *ЖТ* 16. Допуски на линейный размер заготовки:  $L_1 = 150^{+1}_{-1,5}$ ;  $L_2 = 80^{+1}_{-1,2}$ ;  $L_3 = 50^{+0,8}_{-1,2}$ .

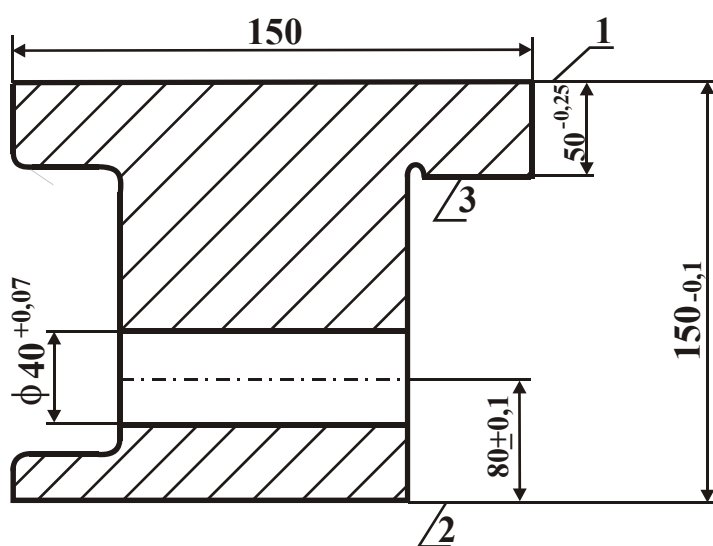


Рис. 5.13. Чертеж детали.

Из таблиц “Поля допусков и рекомендуемые посадки” СТ СЭВ 144-75 определены квалитеты точности изготовления поверхностей деталей, рис. 5.13. Размер  $L_1 = 150_{-0,1}$  выполняется по 9-тому (*ЖТ* 9), равно  $L_2 = 80^{+0,1}$  – по 11-тому (*ЖТ* 11), размер  $L_3 = 50_{-0,25}$  – по 12-тому квалитету точности (*ЖТ* 12).

Чтобы определить припуск под расточку отверстия  $40^{+0,07}$ , необходимо предварительно разработать последовательность обработки поверхностей и выполнить размерный анализ.

### 5.5.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАРШРУТА ОБРАБОТКИ КОРПУСНОЙ ДЕТАЛИ

Общее уточнение линейных размеров:

$$\varepsilon_{L=150} = \frac{2,5}{0,1} = 25, \quad \varepsilon_{L=80} = \frac{2,2}{0,2} = 11, \quad \varepsilon_{L=50} = \frac{2,0}{0,25} = 8.$$

По значению уточнения определим количество переходов, необходимое для получения требуемой точности:

$$K_{L=150} = \frac{\lg 25}{0,5} = \frac{1,39}{0,5} = 2,8$$

(принимаем =3);

$$K_{L=50} = \frac{\lg 8}{0,5} = \frac{0,9}{0,5} = 1,8$$

(принимаем =2);

$$K_{L=80} = \frac{\lg 11}{0,5} = \frac{1,04}{0,5} = 2,08$$

(принимаем =2).

Разность квалитетов:

$$n_{кв.L=150} = jT_{заг} - jT_{дет} = 16 - 9 = 7,$$

$$n_{кв.L=50} = jT_{заг} - jT_{дет} = 16 - 12 = 4,$$

$$n_{кв.L=80} = jT_{заг} - jT_{дет} = 16 - 11 = 5.$$

Полученную разность квалитетов распределим по закону прогрессивного убывания:

$$\Delta jT = 7 = 4 + 2 + 1, \quad \Delta jT = 5 = 3 + 2, \quad \Delta jT = 4 = 2 + 2.$$

Для определения требуемой точности обработки размеров, согласно чертежу, назначим следующий маршрут обработки:

1. Заготовка (литье в земляную форму).
2. Черновое фрезерование плоскости 1 (база – торец 2).
3. Черновое фрезерование торца 2 и площадки 3 (база – торец 1) ( $jT$  12).
4. Чистовое фрезерование торца 1 (база – торец 2).
5. Чистовое фрезерование торца 2 и площадки 3 (база – торец 1) ( $jT$  10).
6. Сверление и фрезерование отверстия  $\varnothing = x$ .
7. Шлифование торца 1.
8. Шлифование торца 2 ( $jT$  9).
9. Расточка отверстия  $\varnothing 40^{+0,07}$ .

### 5.5.3. РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛИ

На рис. 5.14 изображены операционные эскизы обработки детали с технологическими размерами и базами. Для проведения размерного анализа, оценки точности выполненного размера  $50_{-0,25}$  и опре-

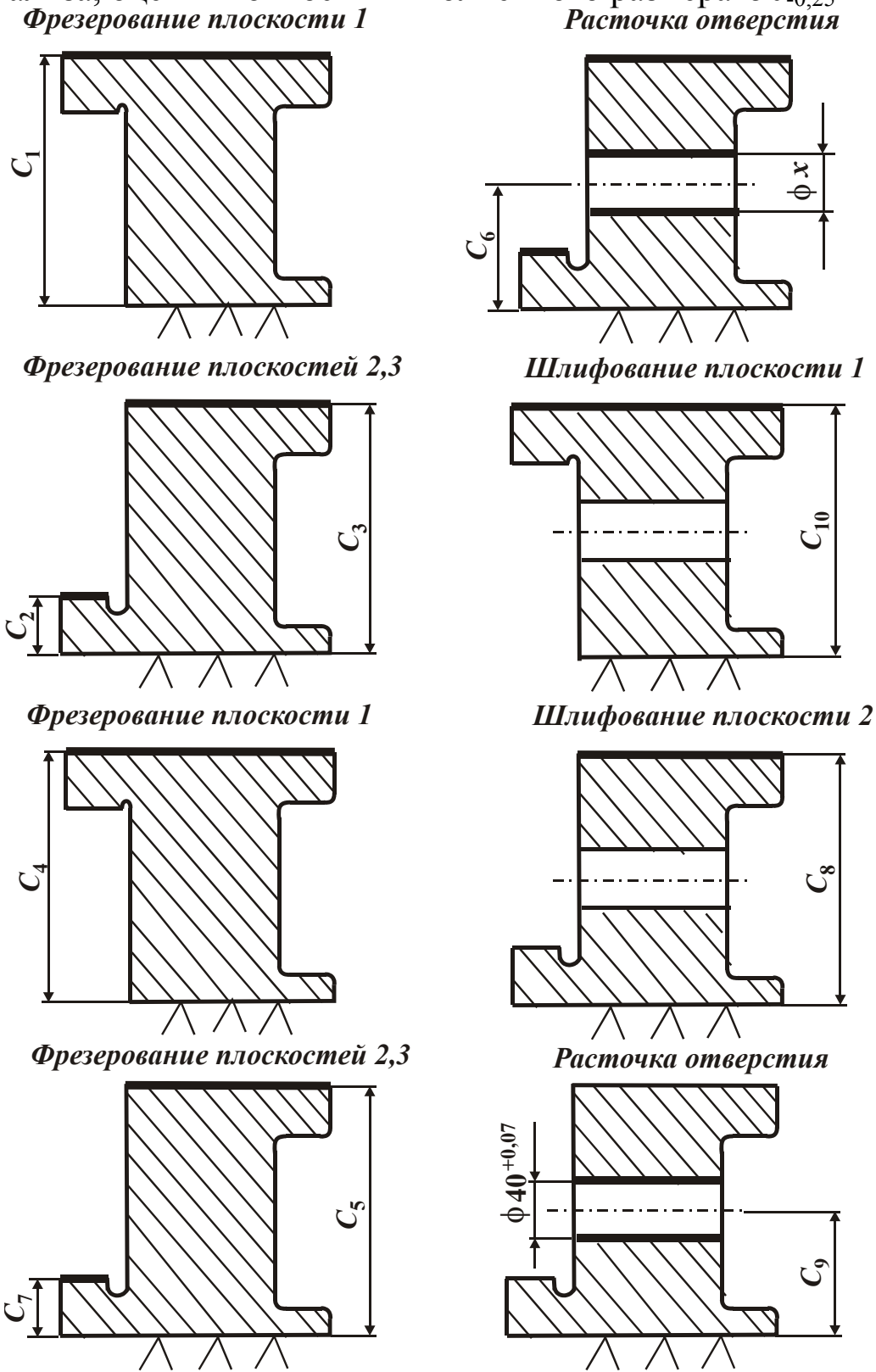


Рис. 5.14. Операционные эскизы обработки детали.



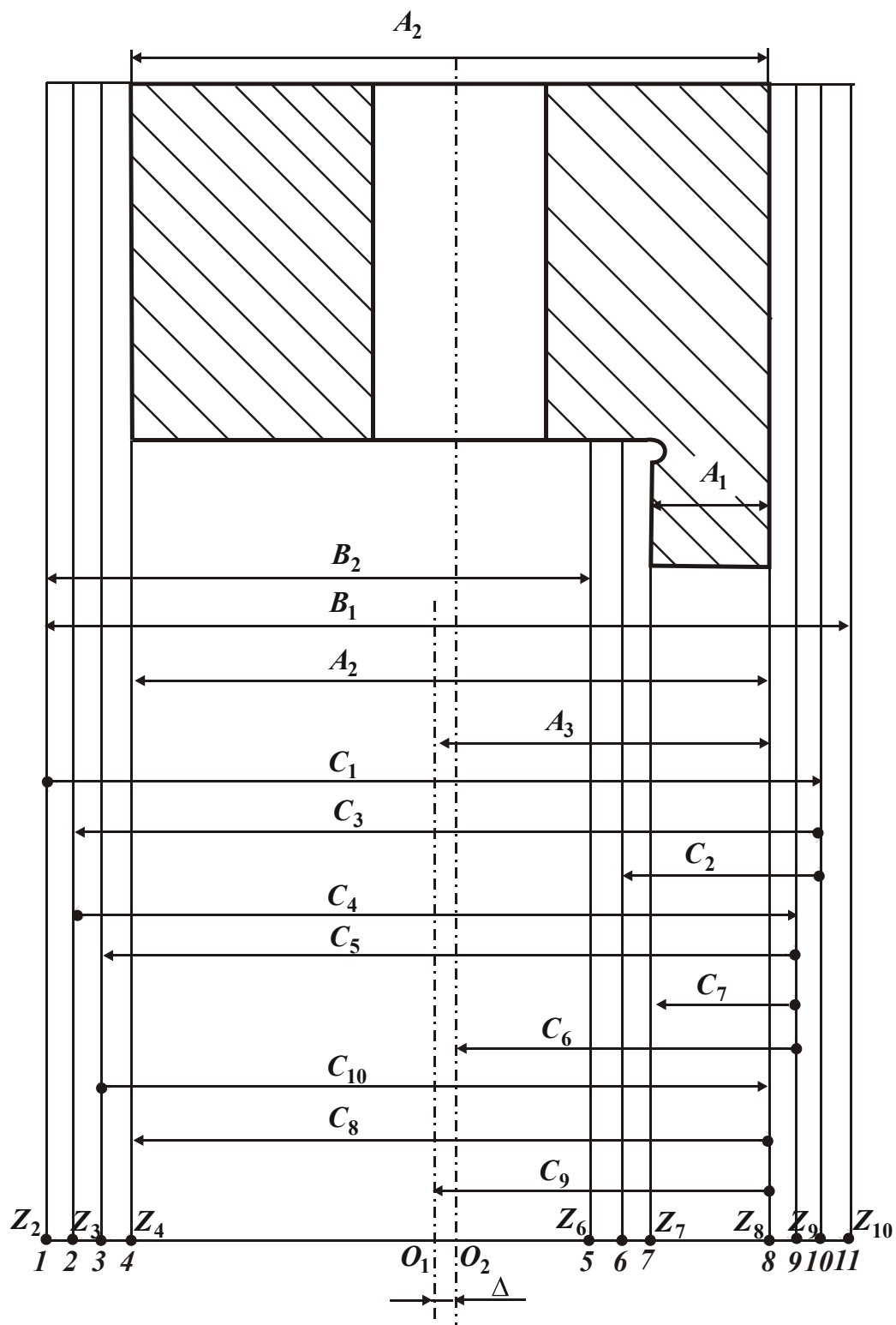


Рис. 5.15. Размерная схема линейных размеров.

деления припуска под окончательное растачивание отверстия  $40^{+0,07}$  используем размерную схему, показанную на рис. 5.15.

Согласно принятому технологическому процессу, после чистового фрезерования базирующей плоскости 1 сверлят и зенкуют отверстие. Размер диаметра на операционном эскизе определяется с учетом смещения центров при сверлении и окончательном растачи-

вании. Смещение центров отверстия на операциях сверления и растачивания находят из размерной цепи

$$C_6 + \Delta - C_9 - Z_{8min} = 0, \quad (5.7)$$

откуда

$$\Delta_{min} = Z_{8min} + C_{9min} - C_{6max}. \quad (5.8)$$

Неизвестные параметры  $Z_{8min}, C_{9min}, C_{6max}$  определяют из графа размерных связей обработки, рис. 5.16.

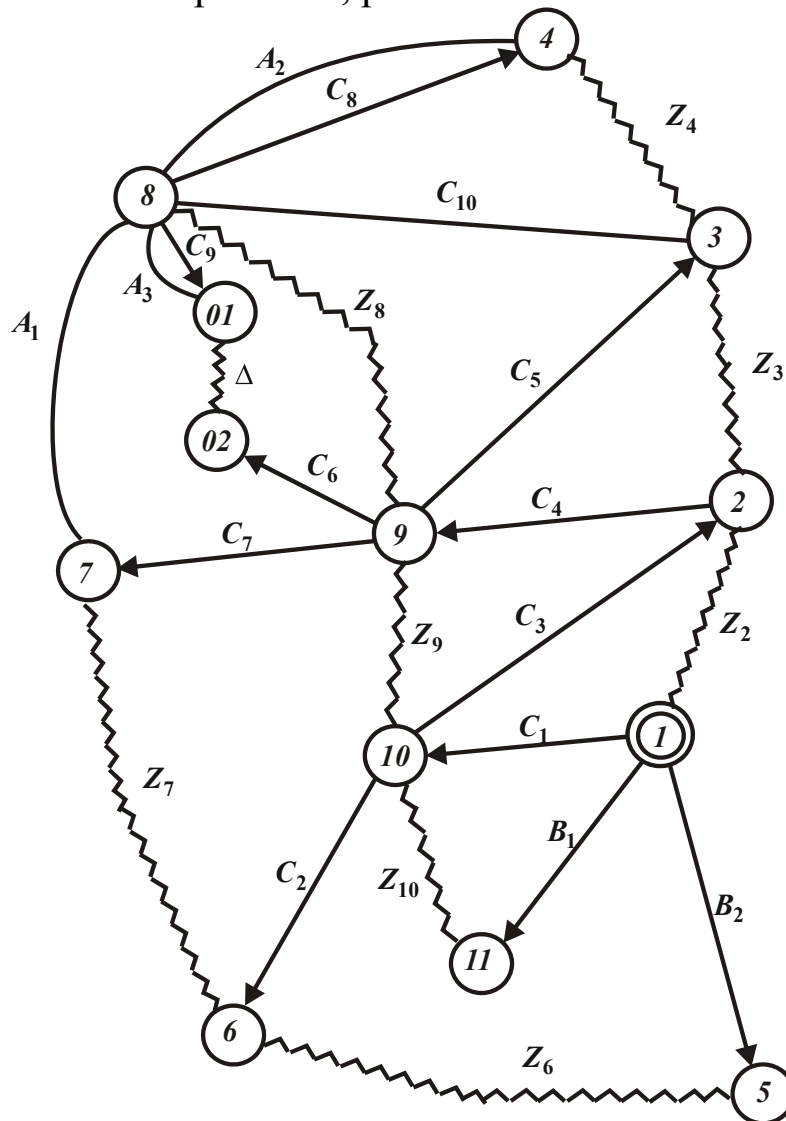


Рис. 5.16. Граф размерных связей.

Параметр  $C_9$  определяют из двухзвенного замкнутого контура:  
 $-A_3 + C_9 = 0, \quad C_{9min} = A_{3min} = 79,9 \text{ мм.}$

Смещение центров  $\Delta$  рассчитывают из системы уравнений двух замкнутых контуров:

$$\begin{cases} -Z_8 - C_9 + \Delta + C_6 = 0, \\ -Z_3 + C_4 - C_6 - \Delta + C_9 - C_{10} = 0. \end{cases} \quad (5.9)$$

Для решения системы уравнений относительно двух неизвестных  $\Delta$  и  $C_6$  необходимо предварительно определить технологические размеры  $C_{10}$  и  $C_4$ .

Для определения указанных технологических размеров следует рассмотреть четыре замкнутых контура:

1) из двухзвенного замкнутого контура

$$-A_2 + C_8 = 0, \quad C_{8min} = A_{2min} = 149,9 \text{ мм};$$

2) из замкнутого контура размеров

$$-Z_4 + C_{10} - C_8 = 0, \quad Z_{4min} = C_{10min} - C_{8max},$$

тогда технологический размер  $C_{10min} = Z_{4min} + C_{8max}$ .

По Приложению 11 найдем минимальный припуск на операцию шлифования торца ( $Z_{4min} = 0,15$  мм):  $C_{10min} = 0,15 + 150 = 150,15$  мм, а по Приложению 13 – допуск  $TC_{10} = 0,07$  мм;

3) из замкнутого контура размеров

$$-Z_8 - C_{10} + C_5 = 0, \quad Z_{8min} = C_{5min} - C_{10max},$$

технологический размер  $C_{5min} = Z_{8min} + C_{10max}$ .

По Приложению 11 найдем минимальный припуск на операцию шлифования второго торца ( $Z_{8min} = 0,15$  мм):

$$C_{5min} = 0,15 + 150,23 = 150,38 \text{ мм};$$

4) из замкнутого контура размеров

$$-Z_3 + C_4 - C_5 = 0, \quad Z_{3min} = C_{4min} - C_{5max}.$$

По Приложению 10  $Z_{3min} = 0,55$ , а по Приложению 13  $TC_5 = 0,16$  мм,  $C_{4min} = Z_{3min} + C_{5max} = 0,55 + 150,38 + 0,16 = 151,09$  мм.

Расчетные значения искомых параметров представлены в табл. 5.8.

Таблица 5.8

Расчетные значения искомых параметров

Размер	Минимальный размер $C_{i min}$	Допуск $TC_i$	Максимальный размер $C_{i max}$	Припуск $Z_i$
$C_4$	151,09	0,16	151,25	-
$C_5$	150,38	0,16	150,54	-
$C_{10}$	150,15	0,17	150,27	-
$C_8$	149,9	0,10	150,0	-
$Z_{3 min}$	-	-	-	0,55
$Z_{8 min}$	-	-	-	0,15
$C_9$	79,9	0,20	80,1	-
$C_6$	-	0,14	-	-

Смещение центров определяется из системы уравнений:

$$\begin{cases} Z_{8min} = \Delta_{min} + C_{6min} - C_{9max}, \\ Z_{3min} = C_{4min} + C_{9min} - (C_{6min} + TC_6) - \Delta_{max} - C_{10max}. \end{cases} \quad (5.10)$$

После подстановки неизвестных значений, получим

$$-80,25 = \Delta_{min} + C_{6max},$$

$$80,03 = \Delta_{max} + C_{6max},$$

$$-0,22 = \Delta_{max} - \Delta_{min}.$$

Припуск под операцию расточки отверстия  $\varnothing 40^{+0,07}$ :

$$Z_{отв} = 2 \cdot (\Delta_{max} - \Delta_{min}) = 0,44 \text{ мм.}$$

После зенкерования диаметр должен быть:  $40 - Z_{отв} = 39,56 \text{ мм.}$

Уравнения для расчета технологических размеров  $C_3, C_1, C_2, C_7, B_1$  и  $B_2$  составлены из замкнутых контуров графа (рис. 5.16), и представлены в табл. 5.9.

Таблица 5.9

Уравнения для расчета технологических размеров

№ п/п	Расчетное уравнение	Исходное уравнение	Определяемый параметр
1	$-Z_9 - C_4 + C_3 = 0$	$Z_9 = C_3 - C_4$	$C_3$
2	$-Z_2 + C_1 - C_3 = 0$	$Z_2 = C_1 - C_3$	$C_1$
3	$-Z_{10} - C_1 + B_1 = 0$	$Z_{10} = B_1 - C_1$	$B_1$
4	$-Z_7 + C_2 + C_4 - C_3 - C_9 = 0$	$Z_7 = C_2 - C_3 + C_4 - C_9$	$C_2$
5	$-Z_6 - B_2 + C_1 - C_2 = 0$	$Z_6 = C_1 - B_2 - C_2$	$B_2$
6	$-A_1 + C_7 - C_5 + C_{10} = 0$	$A_1 = C_7 - C_5 + C_{10}$	$C_7$

## 5.6. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА ВИЛКУ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ СКОРОСТЕЙ И ПРОВЕДЕНИЕ РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА

### 5.6.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Заготовка – литье в землю, точность заготовки – 16-тый квали-тет ( $jT 16$ ).

Точность выполняемых размеров  $A_3 = 18_{-0,2} (h 12)$ ,  $A_2 = 90_{-0,54} (h 13)$ ,  $A_1 = 53_{-0,46} (h 13)$ ,  $d = 30_{-0,05} (h 9)$ .

Количество проходов, необходимое для достижения требуемой точности размеров, указанных в чертеже и определенное по работе

[245], представлено в табл. 5.10.

Таблица 5.10

Значения параметров точности обработки

Размер	Квалитет точности	Количество проходов	Распределение разности квалитетов по проходам
$A_3=18_{-0,2}$	12	2	$\Delta IT=4=2+2$
$A_2=90_{-0,54}$	13	1	$\Delta IT=3$
$A_1=53_{-0,46}$	13	1	$\Delta IT=3$
$\varnothing 30^{+0,05}$	9	3	$\Delta IT=6=3+2+1$

### 5.6.2. РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ

На рис. 5.17 изображена размерная схема технологического процесса обработки вилки переключения скоростей. На рис. 5.18,а показан граф размерных цепей линейных размеров. В качестве корня дерева выбрана поверхность 1, от которой отходят четыре ребра (технологических размеров) –  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_1$  и  $C_2$ . На рис. 5.18,б показан граф размерных цепей диаметральных размеров.

В табл. 5.11 представлены расчетные и исходные уравнения замкнутых контуров графа линейных размеров.

Таблица 5.11

Уравнения для расчета технологических размеров

№ п/п	Расчетное уравнение	Исходное уравнение	Определяемый параметр
1	$-A_3 + C_6 = 0$	$A_3 = C_6$	$C_6$
2	$-Z_3 + C_5 - C_6 = 0$	$Z_3 = C_5 - C_6$	$C_5$
3	$-A_1 + C_3 = 0$	$A_1 = C_3$	$C_3$
4	$-A_2 - Z_3 + C_4 = 0$	$A_2 = C_4 - Z_3$	$C_4$
5	$-Z_2 + C_1 - C_4 = 0$	$Z_2 = C_1 + C_4$	$C_1$
6	$-Z_9 - C_1 + B_2 = 0$	$Z_9 = B_2 - C_1$	$B_2$
7	$-Z_5 - C_5 + C_4 - C_1 + C_2 = 0$	$Z_5 = C_4 - C_5 - C_1 + C_2$	$C_2$
8	$-Z_6 - C_2 + B_1 = 0$	$Z_6 = B_1 - C_2$	$B_1$
9	$-Z_8 + B_3 - B_2 + C_1 - C_3 = 0$	$Z_8 = B_3 - B_2 + C_1 - C_3$	$B_3$

В табл. 5.12 приведены расчетные и исходные уравнения замкнутых контуров графов диаметральных размеров.

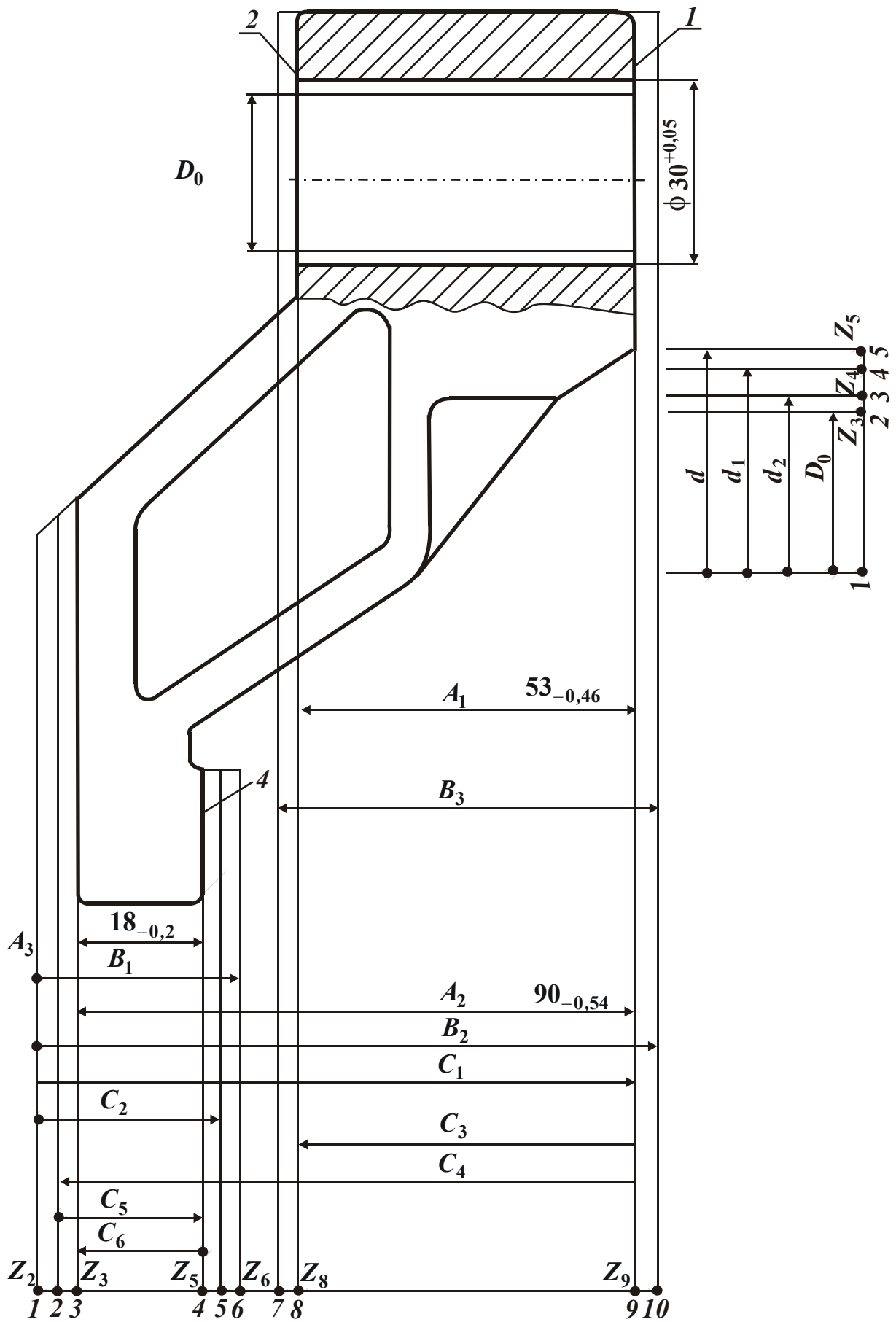


Рис. 5.17. Размерная схема технологического процесса обработки вилки переключения скоростей.

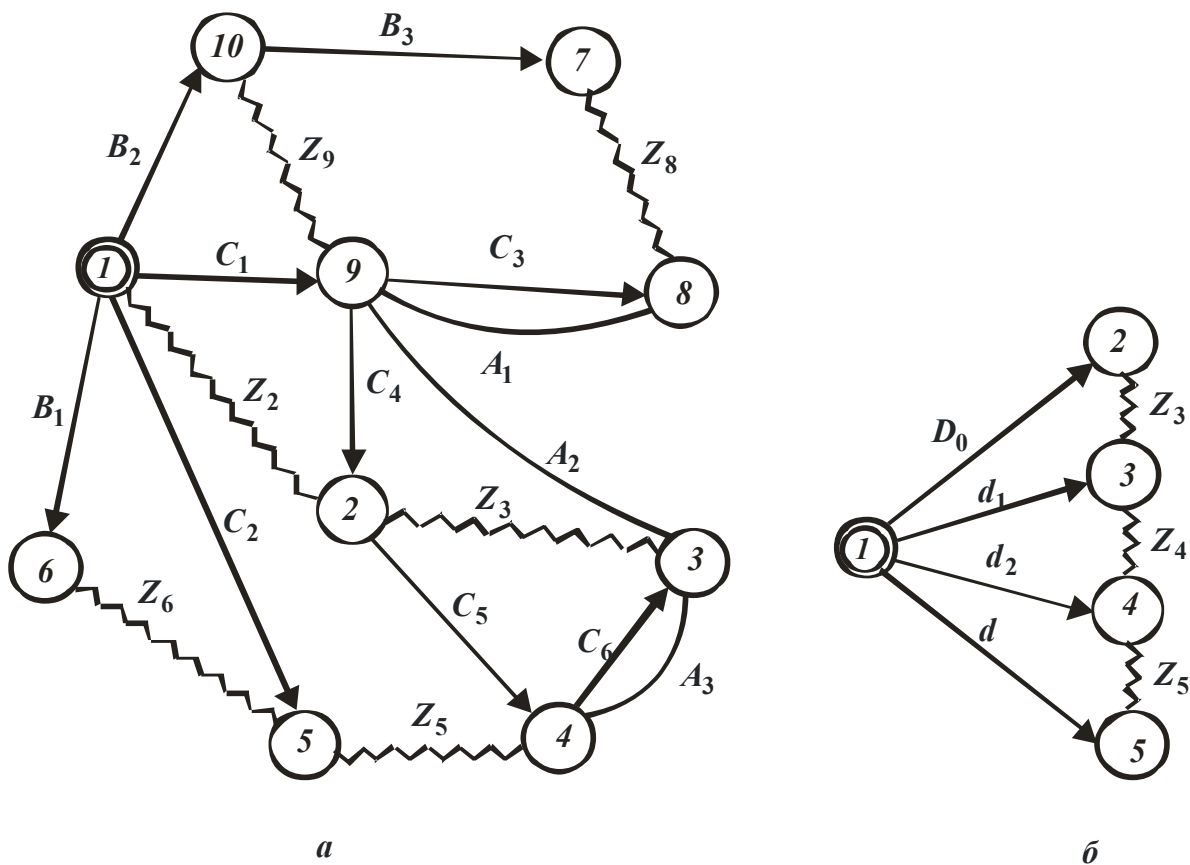


Рис. 5.18. Граф размерных связей: а – линейных, б – диаметральных размеров.

Таблица 5.12

Уравнения для расчета технологических размеров

№ п/п	Расчетное уравнение	Исходное уравнение	Определяемый параметр
1	$-Z_5 - d_2 + d = 0$	$Z_5 = d - d_2$	$d_2$
2	$-Z_4 - d_1 + d_2 = 0$	$Z_4 = d_2 - d_1$	$d_1$
3	$-Z_3 - D_0 + d_1 = 0$	$Z_3 = d_1 - D_0$	$D_0$

На первой операции фрезеруют торцы 1 и 4. Деталь устанавливают на торец 3 с подводом регулируемой опоры к торцу 2, рис. 5.17.

Припуски, удаляемые на данной операции, выбирают из Приложения 1. С первого торца удаляют припуск  $Z_9=2$  мм, с четвертого – припуск  $Z_6=1,7$  мм. На второй операции фрезеруют торцы 2 и 3. Деталь устанавливают в приспособление. Основная установочная база – торец 1, к торцу 4 подводится регулируемая опора. На третьей и четвертой операциях шлифуют торцы 3 и 4. Припуски  $Z_3 = Z_5 = 0,15$  мм.

## 5.7. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА ОБРАБОТКУ ДЕТАЛИ ВАЛ-ШЕСТЕРНЯ

### 5.7.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Заготовка – штамповка, материал – 12Х2Н4А. Чертеж детали изображен на рис. 5.19. При разработке технологического процесса необходимо предварительно обосновать маршрут обработки и назначить такие операционные размеры, которые обеспечат получение размеров, указанных на чертеже. Точность выполняемых размеров:  $A_1=150_{-0,24}$  (*jT* 11),  $A_2=20_{-0,1}$  (*jT* 10),  $A_3=95_{-0,09}$  (*jT* 9),  $A_4=25_{-0,09}$  (*jT* 10).

Количество переходов, необходимое для достижения требуемой точности линейных размеров на чертеже (рис. 5.19), определяемых по работе [245], представлено в табл. 5.13.

Таблица 5.13

Значения параметров точности обработки

Размер	Квалитет точности	Количество переходов	Распределение разности квалитетов по переходам
$A_1=150_{-0,24}$	11	2	$\Delta IT = 5 = 3 + 2$
$A_2=20_{-0,5}$	10	2	$\Delta IT = 6 = 3 + 3$
$A_3=95_{-0,09}$	9	3	$\Delta IT = 7 = 4 + 2 + 1$
$A_4=25_{-0,09}$	10	2	$\Delta IT = 6 = 3 + 3$

### 5.7.2. РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ

На рис. 5.19 показаны операционные эскизы обработки детали вал-шестерня.

1. Заготовку зажимают в трехкулачковый патрон. Протачивают начерно диаметры  $D_1, d'_1, d''_1$  и подрезают торцы, выдерживая размеры  $C_1$  и  $C_2$ , производя зацентровку.
2. Деталь зажимают в трехкулачковом патроне за диаметр с упором в торец. Протачивают начерно диаметры  $D_2, d_1, d'''_1$ . Выдерживают линейные размеры  $C_4$  и  $C_5$ . Производят зацентровку.
3. Заготовку зажимают в трехкулачковый патрон. Протачивают начерно диаметры  $D_1, d'_1, d''_1$  и подрезают торцы, выдерживая размеры  $C_3$  и  $C_4$ , производя зацентровку.



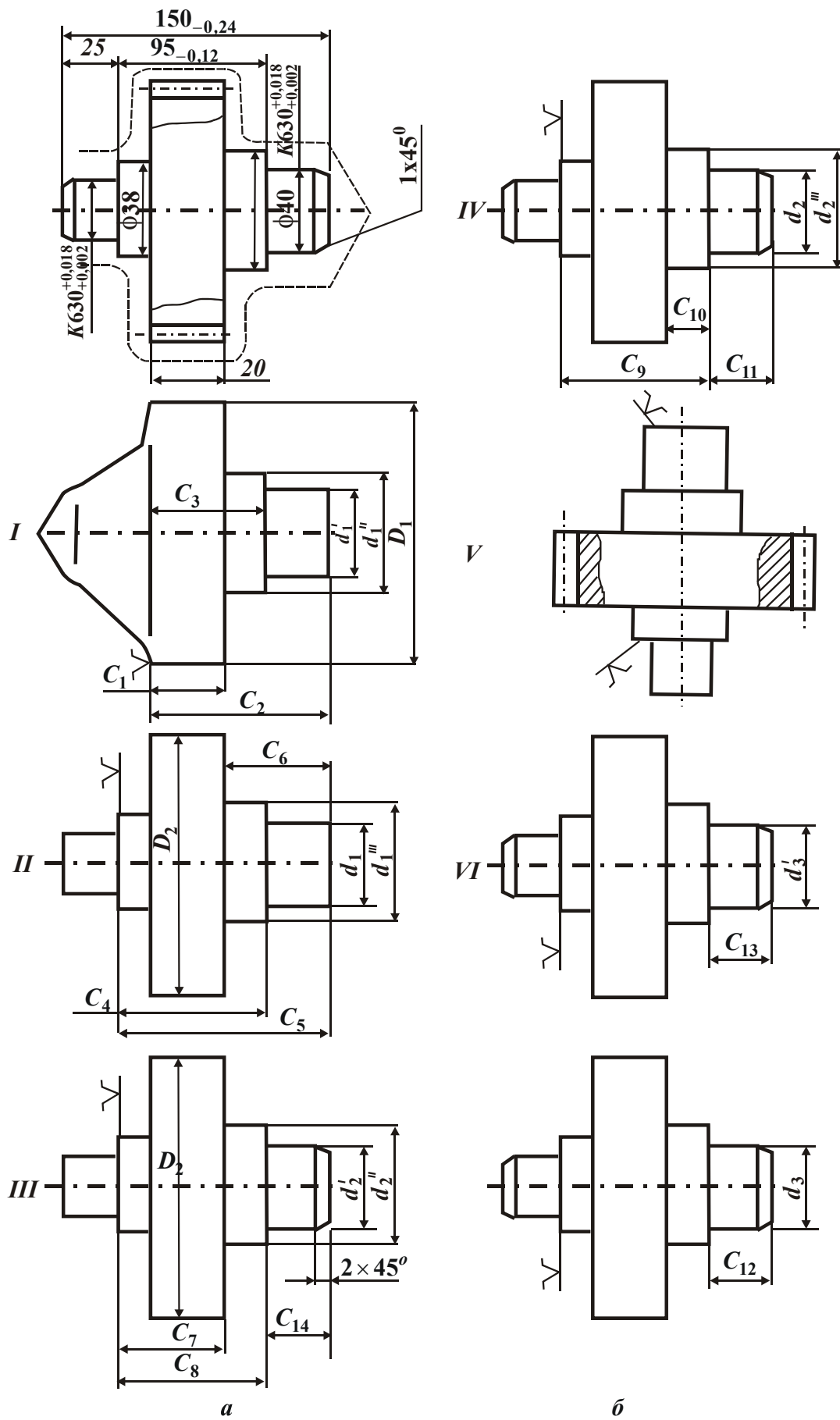


Рис. 5.19. Чертеж детали “вал–шестерня” (а) и технологический процесс обработки (б).

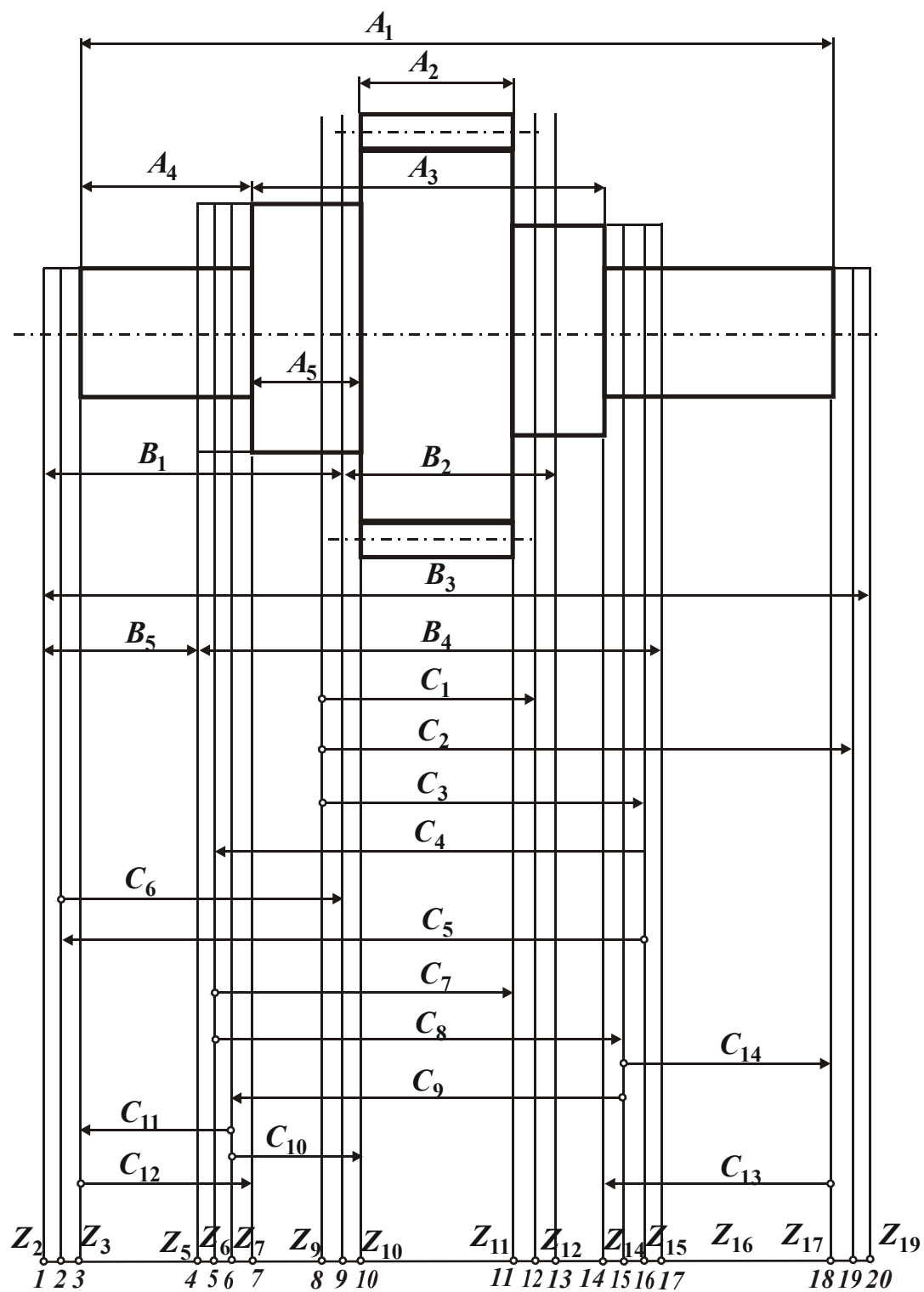


Рис. 5.20. Размерная схема технологического процесса.

4. Деталь зажимают в трехкулачковом патроне за диаметр с упором в торец. Протачивают начерно диаметры  $D_2, d_1, d_1'''$ . Выдерживают линейные размеры  $C_4$  и  $C_5$ . Производят зацентровку.
5. Деталь зажимают в трехкулачковом патроне за диаметр, выполняют чистовую обработку диаметров  $d_2'', d_2'$  и подрезают торцы на

размеры  $C_7, C_8, C_{14}$ .

6. Деталь зажимают в трехкулачковом патроне за диаметр и производят чистовую обработку диаметров  $d_2, d_2'''$ , подрезают торцы на размеры  $C_9, C_{10}, C_{11}$ .
7. На зубодолбежном станке 5A12 нарезают зубчатый венец.
8. Выполняют цементацию, закалку и низкотемпературный отпуск.
9. Шлифуют диаметр  $d_3'$  и торец на размер  $C_{13}$ .
10. Шлифуют диаметр  $d_3$  и торец на размер  $C_{12}$ .

На рис. 5.20 изображена размерная схема технологического процесса обработки детали вал-шестерня.

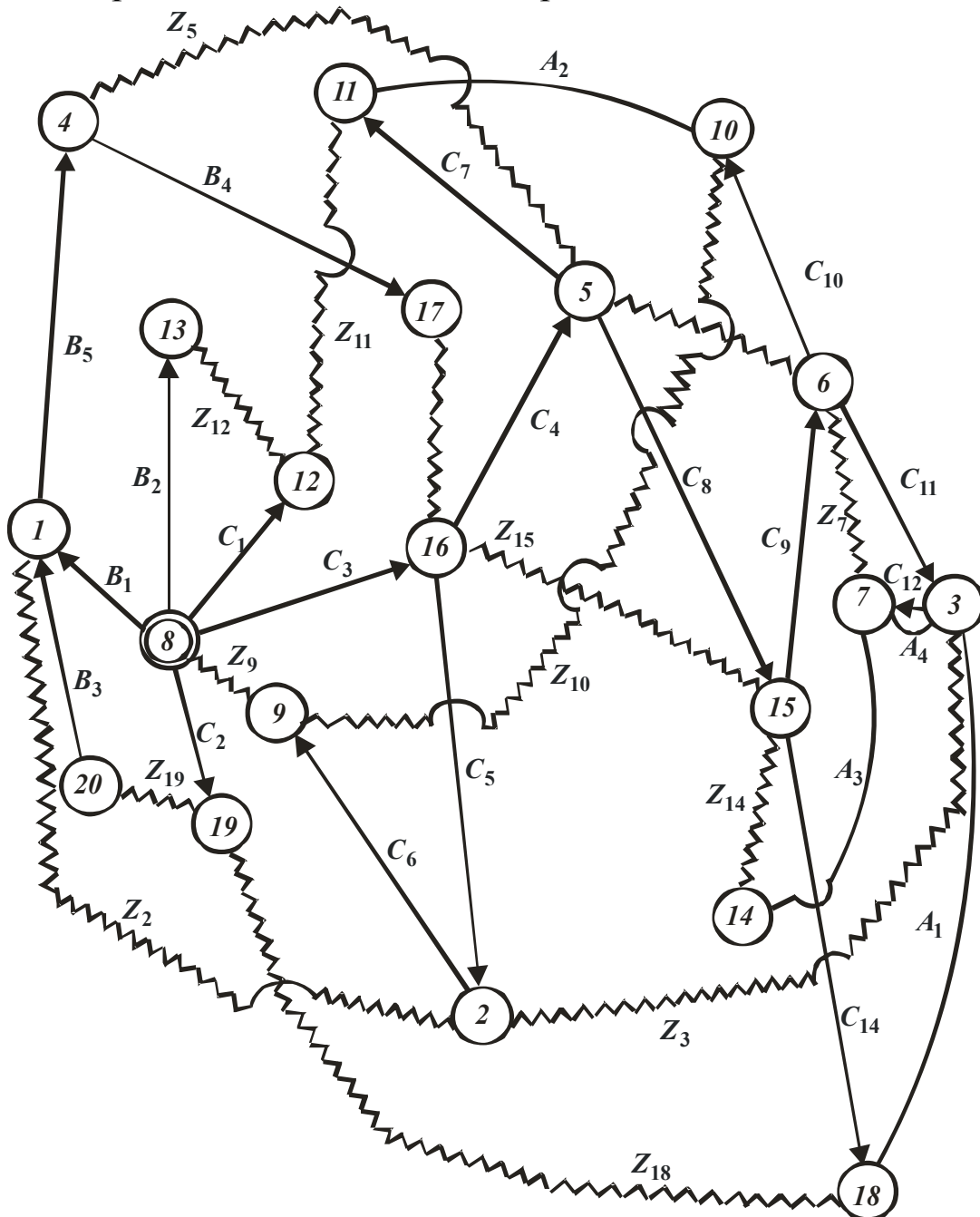


Рис. 5.21. Граф размерных связей линейных размеров.

Граф размерных цепей линейных размеров показан на рис. 5.21. В качестве корня дерева выбрана поверхность 8, от которой отходят пять ребер (технологических размеров)  $B_1, B_2, C_1, C_2, C_3$ .

В табл. 5.14 представлены расчетные и исходные уравнения замкнутых контуров графа линейных размеров.

Таблица 5.14

Уравнения для расчета технологических размеров

№ п/п	Расчетное уравнение	Исходное уравнение	Определяемый параметр
1	$-A_4 + C_{12} = 0$	$A_4 = C_{12}$	$C_{12}$
2	$-Z_7 - C_{11} + C_{12} = 0$	$Z_7 = C_{12} - C_{11}$	$C_{11}$
3	$-Z_{14} - A_3 - C_{12} +$ $+ C_{11} + C_9 = 0$	$Z_{14} = C_{11} + C_9 -$ $- C_{12} - A_3$	$C_9$
4	$-Z_6 + C_8 - C_9 = 0$	$Z_6 = C_8 - C_9$	$C_8$
5	$-Z_{15} - C_8 + C_4 = 0$	$Z_{15} = C_4 - C_8$	$C_4$
6	$-A_2 - C_{10} - Z_6 + C_7 = 0$	$A_2 = C_7 - C_{10} - Z_6$	$C_7$
7	$-A_1 + C_{11} + C_9 + C_{14} = 0$	$A_1 = C_{11} + C_9 + C_{14}$	$C_{14}$
8	$-Z_3 + C_5 - C_4 +$ $+ C_8 - C_9 - C_{11} = 0$	$Z_3 = C_5 - C_4 +$ $+ C_8 - C_9 - C_{11}$	$C_5$
9	$-Z_{10} - C_6 + C_5 - C_4 +$ $+ C_8 - C_9 + C_{10} = 0$	$Z_{10} = C_5 - C_4 + C_8 -$ $- C_9 + C_{10} - C_6$	$C_6$
10	$-Z_9 + C_3 - C_5 + C_6 = 0$	$Z_9 = C_3 - C_5 + C_6$	$C_3$
11	$-Z_{11} - C_7 + C_4 - C_3 + C_1 = 0$	$Z_{11} = C_4 - C_3 + C_1 - C_7$	$C_1$
12	$-Z_{12} - C_1 + B_2 = 0$	$Z_{12} = B_2 - C_1$	$B_2$
13	$-Z_2 + B_1 + C_3 - C_5 = 0$	$Z_2 = B_1 + C_3 - C_5$	$B_1$
14	$-Z_{18} - C_{14} - C_8 + C_4 -$ $- C_3 + B_1 + B_3 = 0$	$Z_{18} = B_3 - C_{14} - C_8 +$ $+ C_4 - C_3 - B_1$	$B_3$
15	$-Z_5 - B_5 + B_1 + C_3 - C_4 = 0$	$Z_5 = B_1 - B_5 + C_3 - C_4$	$B_5$

Предлагаем читателю решить самостоятельно следующие задачи.

1. Дана деталь – ступенчатый вал, рис. 5.22,а. Линейные размеры ступеней в чертеже проставлены цепным методом:  $A=60_{-0,12}$  мм,  $B=50_{-0,2}$  мм,  $C=50_{-0,2}$  мм. Деталь будет обрабатываться на много-резцовом станке. В связи с этим технолог при разработке много-резцовой операции в операционном эскизе проставил размеры координатным методом от торца детали:  $D=60$ ;  $E=110$ ;  $F=150$ .

Рассчитать размерные цепи и назначить допуски на технологи-

ческие размеры.

2. Дана деталь – ступенчатый вал, рис. 5.22,б. Конструктор проставил размеры координатным методом:  $A=60_{-0,1}$ ;  $B=110_{-0,05}$ ;  $C=160_{-0,15}$ .

Технолог при разработке технологии в операционном эскизе проставил размеры цепным методом:  $D=60$ ;  $E=50$ ;  $F=50$ .

Рассчитать размерные цепи и назначить допуски на технологические размеры.

3. Дана деталь – ступенчатый вал, рис. 5.22,в. Заготовка – штамповка на горизонтально-ковачной машине.

Обосновать маршрут обработки, определить операционные линейные и диаметральные размеры, а также размеры заготовки.

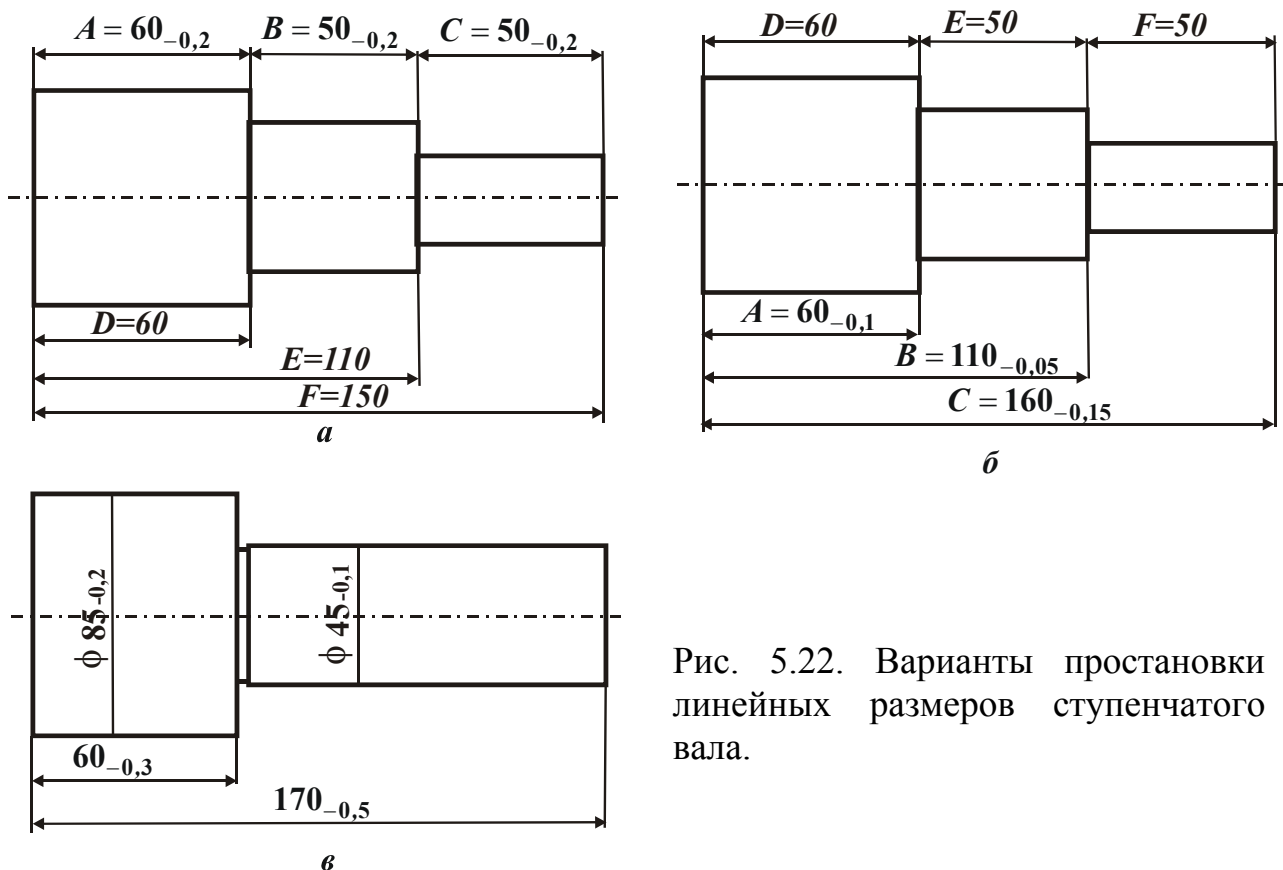


Рис. 5.22. Варианты простановки линейных размеров ступенчатого вала.

**Проверка выполнения чертежного размера  $A_2=195_{\pm 0,4}$ , непосредственно не выдерживаемого при обработке; определение неравномерности снимаемого припуска на операции расточки цилиндрической поверхности**

На рис. 5.23 изображены чертеж корпусной детали и размерная схема технологического процесса ее обработки.

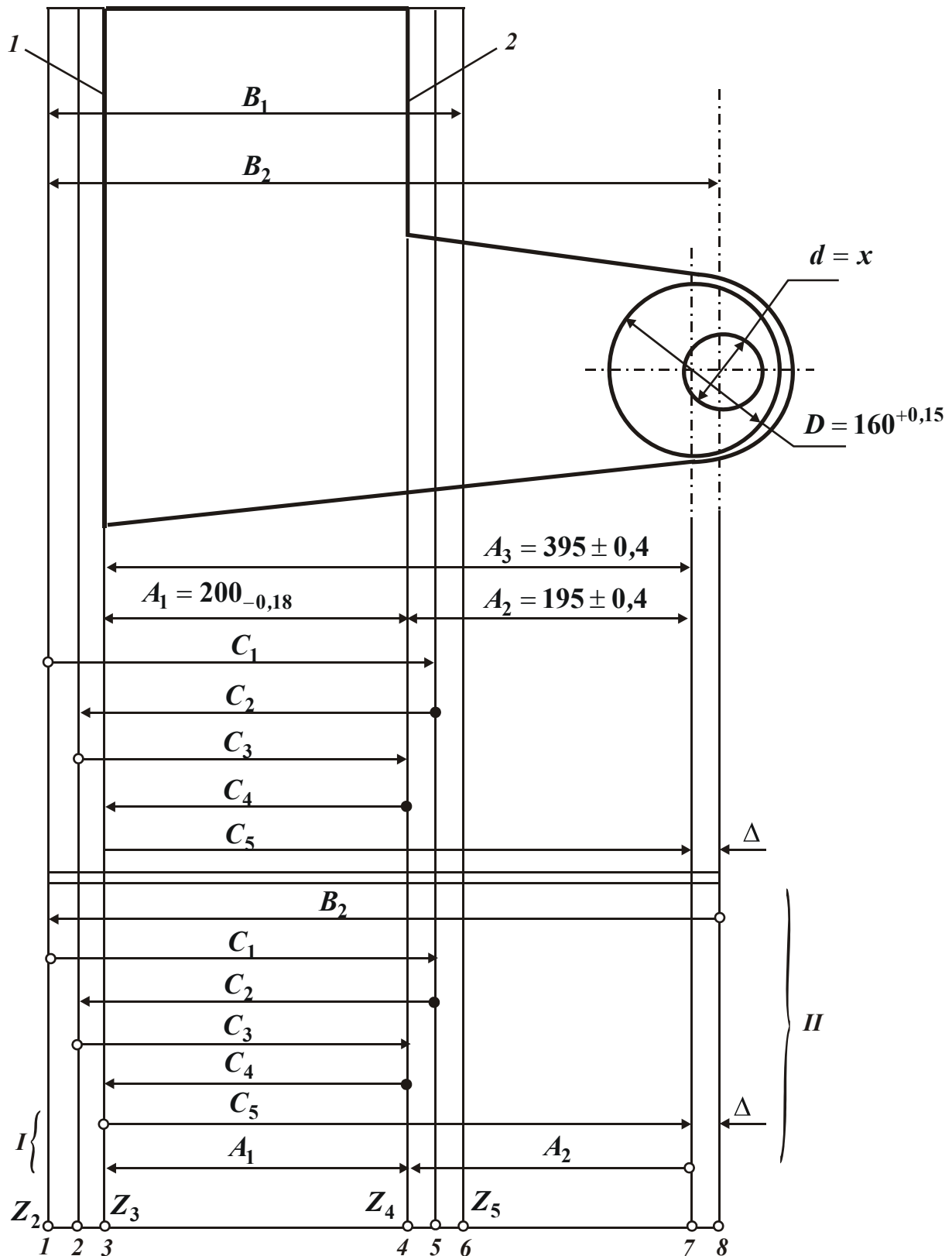


Рис. 5.23. Размерная схема технологического процесса обработки корпусной детали.

Заготовка – литье в земляную форму с пролитым отверстием  $d$ .  
 Материал – чугун СЧ-15-32. Точность изготовления отливки –  $jT 16$ .

На первой операции деталь устанавливается на приспособление

поверхностью 1 и с поверхности 2 на фрезерном станке удаляется припуск  $Z_5$  (для черного фрезерования минимальный припуск  $Z_{5min}=4,1$  мм) (см. Приложение 2).

Вторая операция заключается в установке детали на обработанную поверхность 2 и выполнении черного фрезерования поверхности 1. Минимальный припуск  $Z_{2min}=4,1$  мм (см. Приложение 2).

Третья операция – чистовое фрезерование поверхности 2, которое обеспечивает 10-тый квалитет точности. Минимальный припуск на операцию чистового фрезерования  $Z_{4min}=1,0$  мм (см. Приложение 3).

На четвертой операции деталь устанавливается на поверхность 2 и производится чистовое фрезерование поверхности 1. Минимальный припуск на операцию чистового фрезерования  $Z_{3min}=1,0$  мм.

Пятая операция – расточка отверстия  $\varnothing=160^{+0,15}$  производится за три прохода (черновая, получистовая и чистовая).

По Приложению 13 определяют допуски на размеры заготовки  $TB_1=2,9$  мм,  $TB_2=3,8$  мм. Для определения допусков на операционные размеры необходимо знать квалитеты точности на черновой и чистовой операциях:  $jT=16-10=6=3+3$ .

Черновое фрезерование обеспечивает 13-тый квалитет точности:  $jT=16-3=13$ . Чистовое фрезерование – 10-тый квалитет точности:  $jT=13-3=10$ .

Допуски на операционные размеры выбирают из Приложения 13:  $TC_1=0,88$  мм,  $TC_2=0,88$  мм,  $TC_3=0,18$  мм,  $TC_4=0,18$  мм,  $TC_5=\pm 0,14$  мм.

1. Определим точность получения чертежного размера  $A_2=195\pm 0,4$  в размерной цепи 1 (рис. 5.23):

$$A_1 + A_2 - C_5 = 0, \quad A_2 = C_5 - A_1.$$

Предельные размеры:

$$A_{2max} = C_{5max} - A_{1min} = 395,4 - 199,82 = 195,58 \text{ мм};$$

$$A_{2min} = C_{5min} - A_{1max} = 394,6 - 200,0 = 194,6 \text{ мм}.$$

Разработанный технологический процесс не обеспечивает получения точности размера  $A_2$ . Полученный размер  $A_2=195_{-0,4}^{+0,58}$  больше размера, указанного на чертеже  $A_2=195\pm 0,4$ .

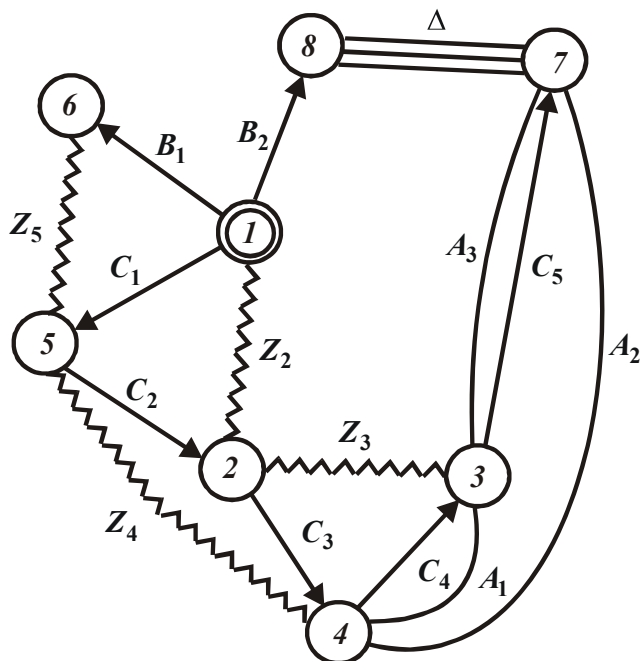
2. Определим неравномерность снимаемого припуска на операции расточки цилиндрического отверстия. Для этого на операции расточки отверстия  $\varnothing=160^{+0,15}$  необходимо найти линейные разме-

ры, координирующие центры отверстий на детали и на заготовке.

Смещение центров отверстий  $\Delta$  определяется из уравнения размерной II цепи (рис. 5.23):  $B_2 - C_1 + C_2 - C_3 + C_4 - C_5 - \Delta = 0$ ,

откуда  $\Delta = B_2 - C_1 + C_2 - C_3 + C_4 - C_5$ .

Предельные значения параметра  $\Delta$ , как видно, зависят от технологических размеров  $C_i$  и размера заготовки  $B_2$ :



$$\Delta_{max} = B_{2max} - C_{1min} + C_{2max} - C_{3min} + C_{4max} - C_{5min}$$

$$\Delta_{min} = B_{2min} - C_{1max} + C_{2min} - C_{3max} + C_{4min} - C_{5max}$$

Технологические размеры  $C_i$  определялись из размерного анализа с использованием теории графов. Из замкнутых контуров размерных связей (рис. 5.24) находят технологические размеры  $C_1 = C_5$ . В табл. 5.15 представлены расчетные уравнения размерных связей искомых параметров.

Рис. 5.24. Граф размерных связей.

Таблица 5.15

Расчетные уравнения размерных связей искомых параметров

№ п/п	Расчетное уравнение	Исходное уравнение	$C_{i min}$ , мм	$C_i$ , мм
1	$-A_1 + C_4 = 0$	$A_1 = C_4$	$C_{4min} = 199,82$	$C_4 = 200_{-0,18}$
2	$-Z_3 + C_3 - C_4 = 0$	$Z_3 = C_3 - C_4$	$C_{3min} = 201$	$C_3 = 201,19_{-0,18}$
3	$-A_3 + C_5 = 0$	$A_3 = C_5$	$C_{5min} = 394,6$	$C_5 = 395,4_{-0,8}$
4	$-Z_4 - C_3 + C_2 = 0$	$Z_4 = C_2 - C_3$	$C_{2min} = 205,29$	$C_2 = 206,17_{-0,88}$
5	$-Z_2 + C_1 - C_2 = 0$	$Z_2 = C_1 - C_2$	$C_{1min} = 210,27$	$C_1 = 211,15_{-0,88}$

Размер заготовки  $B_2$  определяется из уравнения замыкающего звена:  $B_2 - C_1 + C_2 - C_3 + C_4 - C_5 = 0$ .

Номинал замыкающего звена:

$$B_2 = 211,15 - 206,17 - 200,0 + 201,19 + 395,4 = 401,57 \text{ мм.}$$

Допуск замыкающего звена равен сумме допусков составляющих звеньев:



$$TB_2 = TC_1 + TC_2 + TC_3 + TC_4 + TC_5 = 0,88 + 0,88 + 0,18 + 0,18 + 0,8 = 2,9 \text{ мм.}$$

Координата середины поля допуска замыкающего звена рассчитывается так:

$$\Delta_{0B_2} = \sum_{i=1}^n \bar{\Delta}_{0i} - \sum_{i=1}^n \bar{\Delta}_{0i}, \quad (5.11)$$

где  $\Delta_{0i} = \frac{T_i}{2}$ .

Координаты середины полей допусков технологических размеров  $C_i$ , приведенных в табл. 5.15, имеют следующие значения:  $\Delta_{0C_1} = -0,44$  мм,  $\Delta_{0C_2} = -0,44$  мм,  $\Delta_{0C_3} = -0,09$  мм,  $\Delta_{0C_4} = -0,09$  мм,  $\Delta_{0C_5} = -0,4$  мм. Тогда

$$\Delta_{0B_2} = [(-0,44) + (-0,09) + (-0,4)] - [(-0,44) + (-0,09)] = -0,4 \text{ мм.}$$

Предельные отклонения замыкающего звена  $B_2$ :

$$\begin{aligned} \bar{\Delta}_{B_2} &= \Delta_{0B_2} + \frac{\sum T_i}{2}, \\ \bar{\Delta}_{B_2} &= \Delta_{0B_2} - \frac{\sum T_i}{2}. \end{aligned} \quad (5.12)$$

После подстановки данных в выражение (5.12), получим: верхнее отклонение размера  $B_2$

$$\bar{\Delta}_{B_2} = 0,4 + 1,45 = +1,85 \text{ мм;}$$

нижнее отклонение размера

$$\bar{\Delta}_{B_2} = 0,4 - 1,45 = -1,05 \text{ мм.}$$

Таким образом,  $B_2 = 401,57_{-1,05}^{+1,85}$  мм.

Полученные данные позволяют определить смещение центров  $\Delta$ :

$$\Delta_{max} = 403,32 - 210,27 + 206,17 - 201,01 + 200,0 - 394,6 = 3,61 \text{ мм;}$$

$$\Delta_{min} = 400,52 - 211,15 + 205,29 - 201,19 + 199,82 - 395,4 = -2,11 \text{ мм;}$$

$$\Delta = 0_{-2,11}^{+3,61}.$$

Таким образом, возможны два крайних положения. В первом случае ось заготовки находится правее оси детали на 3,61 мм, во втором случае – левее на 2,11 мм. Для определения припуска следует принять наихудший случай, т.е.  $Z = \Delta_{max} = 3,61$  мм.

**Проверка выполнения линейных размеров  $9^{\pm 0,2}$  и  $9,5^{\pm 0,2}$ ,  
указанных на чертеже**

На рис. 5.25 показаны рабочий чертеж детали и три операции технологического процесса обработки. После чистовой обточки, как видно из технологического процесса, деталь подвергается закалке на твердость HRC 50–55 с последующим шлифованием торцов 1 и 2. Основное внимание здесь уделяется обеспечению размера  $40_{-0,05}$ . Размеры  $9_{-0,2}$  и  $9,5_{-0,2}$  на операциях 50 и 55 непосредственно не выполняются. Точность обработки этих размеров зависит от снимаемых припусков на операциях шлифования торцов 1 и 2.

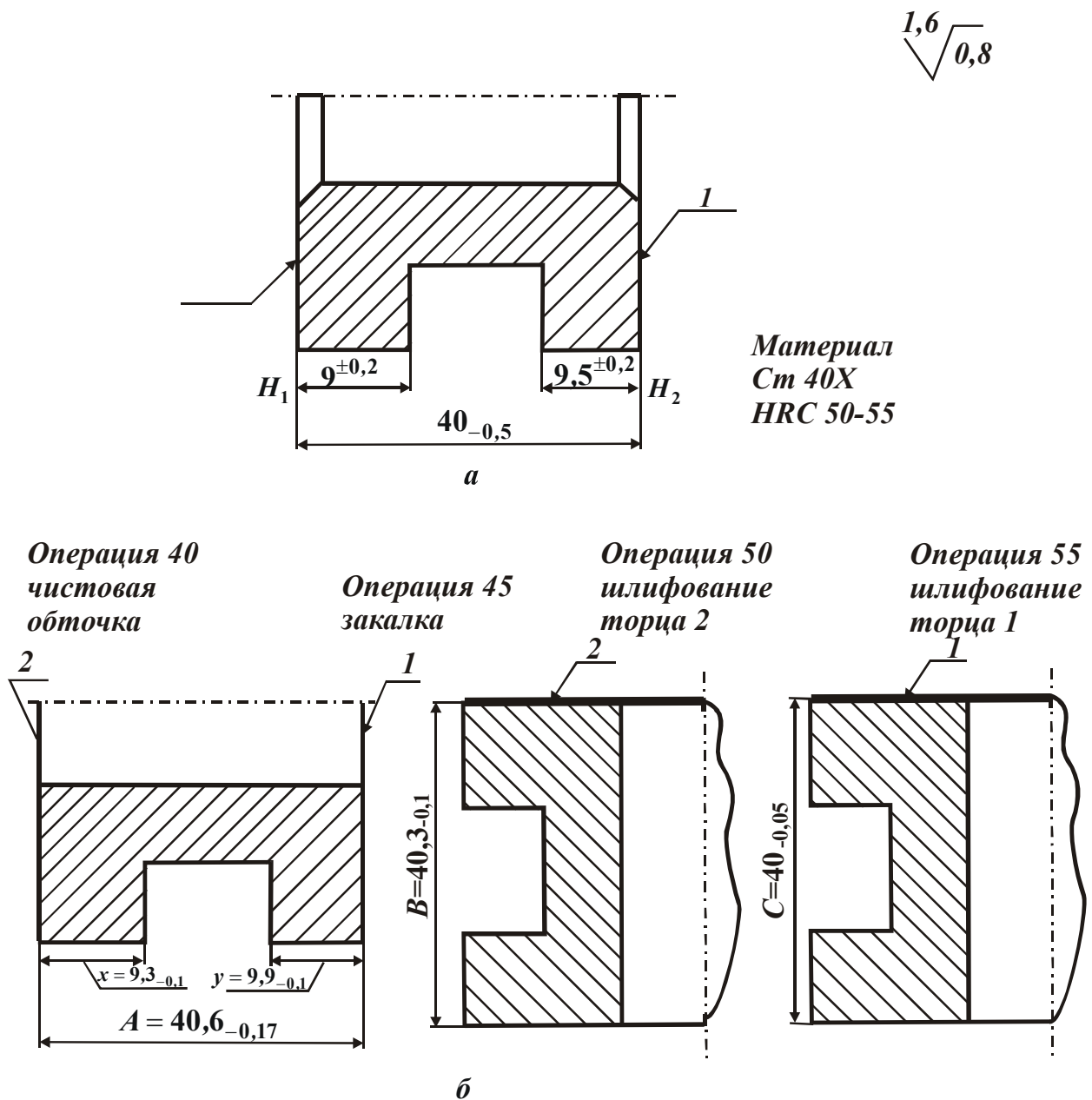


Рис. 5.25. Чертеж детали (а) и технологический процесс ее обработки (б).

*Решение.* 1. Из сопоставления линейных размеров между торцами 1 и 2 на операциях 40 и 50 определяются предельные значения припуска, удаляемого с торца 2:

$$Z_{2max} = A_{max} - B_{min} = 40,6 - 40,2 = 0,4 \text{ мм};$$

$$Z_{2min} = A_{min} - B_{max} = 40,43 - 40,3 = 0,13 \text{ мм}.$$

От значения снимаемого припуска с торца 2 зависит размер  $H_1 = 9 \pm 0,2$  мм:

$$H_{1max} = x_{max} - Z_{2min} = 9,3 - 0,13 = 9,17 \text{ мм};$$

$$H_{1min} = x_{min} - Z_{2max} = 9,2 - 0,4 = 8,8 \text{ мм}.$$

Получаемый размер (в процессе обработки)  $H_1 = 9_{-0,2}^{+0,17}$  находится в пределах допуска, регламентируемого чертежом  $H_1 = 9 \pm 0,2$  мм.

2. Из сопоставления линейных размеров между торцами 1 и 2 на операциях 50 и 55 определяют предельные значения припуска, удаляемого с торца 1:

$$Z_{1max} = B_{max} - C_{min} = 40,3 - 39,95 = 0,35 \text{ мм};$$

$$Z_{1min} = B_{min} - C_{max} = 40,2 - 40,0 = 0,2 \text{ мм}.$$

Снимаемый припуск с торца I определяет колебания размера:

$$H_{2max} = y_{max} - Z_{2min} = 9,9 - 0,2 = 9,7 \text{ мм};$$

$$H_{2min} = y_{min} - Z_{2max} = 9,8 - 0,35 = 9,45 \text{ мм}.$$

Полученный в процессе обработки размер  $H_2 = 9,5_{-0,05}^{+0,2}$  находится в пределах допуска, регламентируемого чертежом  $H_2 = 9,5 \pm 0,2$  мм.

### Определение допусков на операционные размеры

На рис. 5.26 изображены чертеж детали и технологический процесс обработки. Рассчитаем операционные размеры.

*Решение.* 1. Согласно приведенной размерной схеме, уравнение размерной цепи имеет вид:

$$H_3 - h + H_2 - H_1 = 0 . \quad (5.13)$$

Звено  $h$  на чертеже ограничен допуском  $Th = \pm 0,1$ , поэтому при определении допусков на технологические размеры  $TH_1$ ,  $TH_2$  и  $TH_3$  допуск  $Th$  следует принимать в качестве замыкающего. Из анализа рабочего чертежа видно, что размер  $H_1$  имеет допуск  $TH_1 = 0,3$  мм.

Имея ввиду, что допуск замыкающего звена равен сумме допусков составляющих звеньев ( $Th = 0,2$  мм), необходимо проверить возможность выполнения этого условия без ужесточения допусков раз-

меров, входящих в данную размерную цепь. В противном случае необходимо произвести ужесточение размеров.

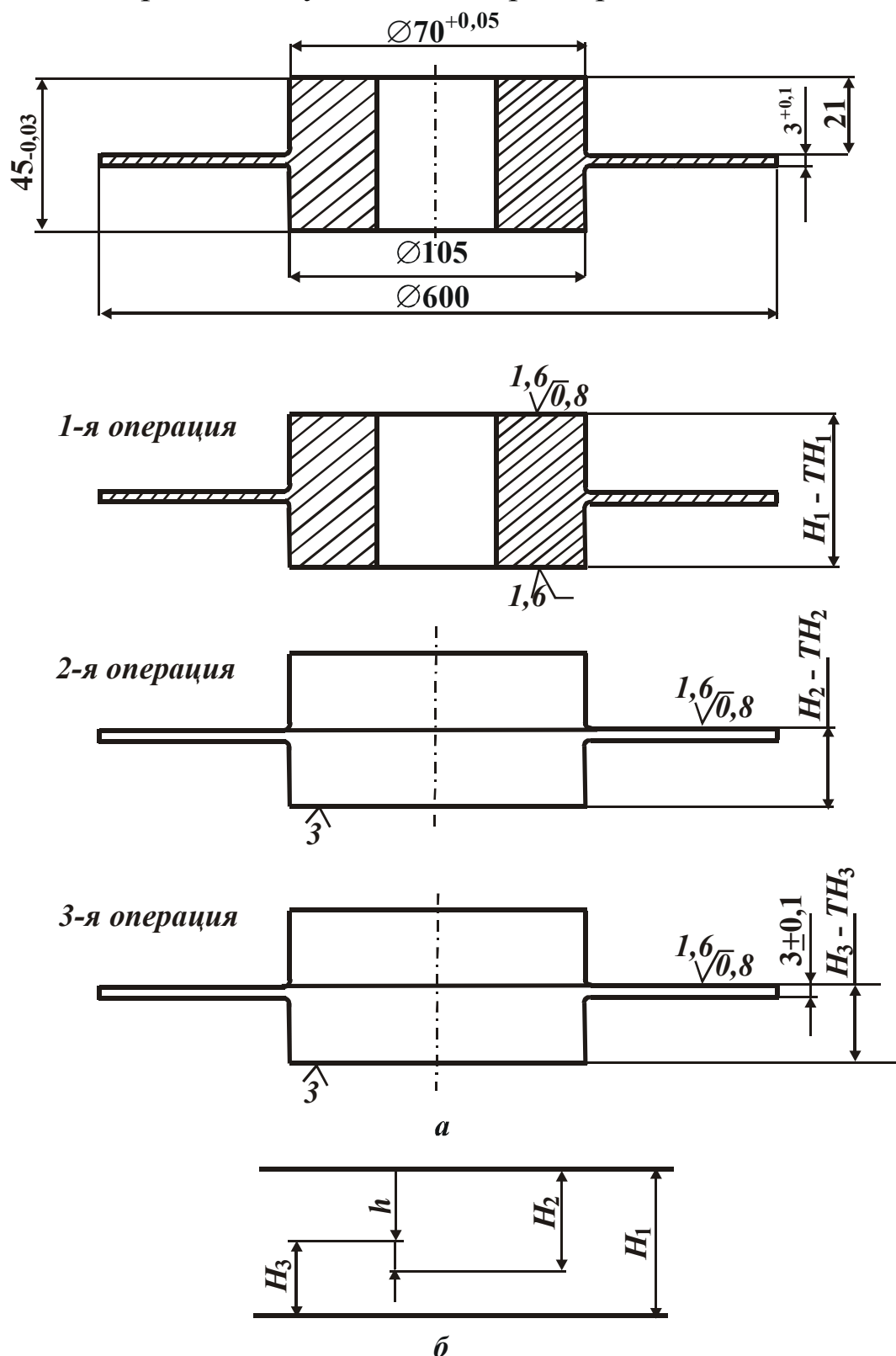


Рис. 5.26. Чертеж детали диска (а) и технологический процесс ее обработки (б).

Согласно чертежу, допуск на размер  $TH_1=0,3$  мм больше допуска замыкающего размера. Следовательно, возникает необходимость

его ужесточения до  $TH_1=0,07$  мм ( $H_1=45_{-0,07}$ ).

Предельные значения размера замыкающего звена:

$$h_{max} = H_{2max} + H_{3max} - H_{1min};$$

$$h_{min} = H_{2min} + H_{3min} - H_{1max}.$$

Известно, что  $h_{max}=3^{+0,1}=3,1$  мм;  $h_{min}=3_{-0,1}=2,9$  мм.

Симметричное расположение фасонных поверхностей диска позволяет приравнять технологические размеры  $H_2 = H_3$ . Тогда

$$2H_{2,3max}=3,1+44,93=48,03; \quad 2H_{2,3min}=2,9+45,0=47,9, \quad \text{откуда}$$

$$H_{2max} = H_{3max}=24,015; \quad H_{2min} = H_{3min}=23,95; \quad TH_{2,3} =$$

$$= H_{2,3max} - H_{2,3min}=0,065.$$

### Технологические размерные цепи с параллельными замкнутыми контурами составляющих звеньев

Совместное влияние двух замкнутых контуров упругой системы станка на точность замыкающего размера рассмотрим на примере шлифования детали, рис. 5.27.

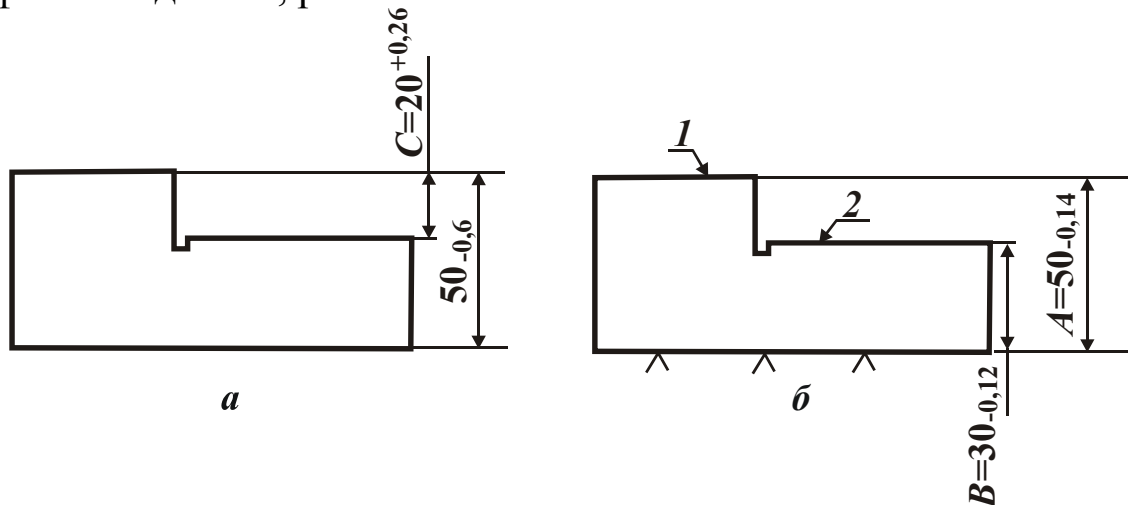


Рис. 5.27. Чертеж детали (а) и операционный эскиз (б).

Технологические размеры  $A=50_{-0,14}$  и  $B=30_{-0,12}$  координируют обрабатываемые поверхности от установочной базы. Конструкторский размер, который указан на чертеже, как наиболее важный, непосредственно не выполняется. В технологической размерной цепи он является замыкающим звеном. По схеме технологической размерной цепи его можно найти так:

$$C_{\Delta} = A - B. \quad (5.14)$$

Допуск замыкающего размера равен сумме допусков состав-

ляющих звеньев:

$$TC = TA + TB = 0,14 + 0,12 = 0,26 \text{ мм.}$$

Операционные размеры  $A$  и  $B$  рассматриваемой технологической размерной цепи являются в то же время замыкающими звеньями размерных цепей упругой системы станка, рис. 5.28.

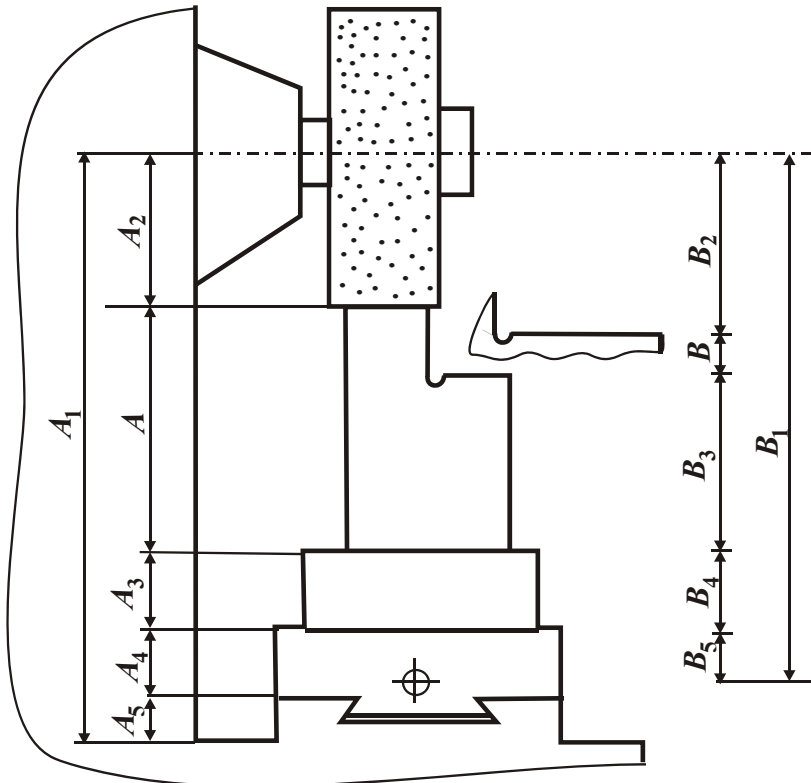


Рис. 5.28. Схема обработки поверхностей и размерные цепи наладок.

Если эти цепи не связаны между собой, то и допуск замыкающего звена технологической цепи равен сумме допусков составляющих звеньев. Если размерная цепь упругой системы параллельна общим составляющим звеньям, то погрешность замыкающего звена технологической размерной цепи меньше суммарной.

На рис. 5.28 изображена схема обработки двух плоскостей

и размерные цепи наладок станка. Технологическая размерная цепь упругой системы станка, обеспечивающая получение размера  $A = 50_{-0,14}$ , который является на данной операции обработки замыкающим звеном, имеет вид:

$$A = A_1 - A_2 - A_3 - A_4 - A_5. \quad (5.15)$$

Операционный размер  $B$ , являющийся замыкающим звеном второй размерной цепи, определяется так:

$$B = B_1 - B_2 - B_3 - B_4 - B_5. \quad (5.16)$$

Совместное решение технологических размерных цепей, включающих элементы упругой системы станка, можно представить в виде:

$$C_{\Delta} = A_1 - A_2 - A_3 - A_4 - A_5 - B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5.$$

Погрешность замыкающего звена:

$$\delta C_{\Delta} = \sum_{i=1}^n \delta A_i - \sum_{i=1}^k \delta B_i. \quad (5.17)$$

Для обеспечения обработки без брака необходимо выполнить следующие условия:  $\delta C_{\Delta} < TC_{\Delta}$ ;  $\sum_i \delta A_i < TA$ ;  $\sum_i \delta B_i < TB$ .

Следовательно, размерные цепи, включающие упругие элементы системы станка и не имеющие общих звеньев, при заданном допуске замыкающего звена требуют значительного ужесточения допусков составляющих звеньев.

Погрешность замыкающего звена можно уменьшить, если поверхности 1 и 2 обрабатывать в одну операцию одним режущим инструментом. При данной схеме обработки ряд технологических звеньев размерных цепей  $A_i$  и  $B_i$  будут общими. Например, звенья  $A_3$  и  $B_3$  характеризуют положения установочной базы. Погрешности этих звеньев определяют погрешность установки  $\delta A_3 = \delta B_3 = \delta y$ .

Погрешности звеньев  $A_2$  и  $B_2$ , представляющих собой радиусы шлифовальных кругов, определяют износ инструментов  $\delta A_2$  и  $\delta B_2$ .

Поскольку износ шлифовальных кругов за время обработки одной детали незначителен, то разность износов одновременно работающих кругов можно приравнять нулю:

$$|\delta A_2 - \delta B_2| \approx 0, \quad \delta A_2 - \delta B_2 = \delta_{уз}$$

и считать звенья  $A_2$  и  $B_2$  общими для параллельно связанных размерных цепей упругой системы станка.

Наличие параллельных связей изменяет структуру уравнения для расчета замыкающего звена технологической размерной цепи

$$C_{\Delta} = A_1 - A_4 - A_5 - B_1 + B_4 + B_5. \quad (5.18)$$

Погрешность замыкающего звена технологической размерной цепи

$$\delta C_{\Delta} = \delta A_1 - \delta A_4 - \delta A_5 - \delta B_1 + \delta B_4 + \delta B_5. \quad (5.19)$$

Из сопоставления выражений (5.17) и (5.19) следует, что погрешность замыкающего звена технологической размерной цепи, имеющей параллельные связи, меньше на удвоенную сумму погрешностей общих звеньев параллельно связанных цепей. Установленная связь позволяет рассчитать допуск замыкающего звена технологической размерной цепи с параллельными цепями

$$TC_{\Delta} = TA + TB - 2 \cdot (T_y - T_{уз}). \quad (5.20)$$

Если допуск замыкающего звена задан конструктором, то при расчете допусков на операционные размеры  $A$  и  $B$  следует исходить не из соотношения, а из неравенства

$$TA + TB \leq TC_{\Delta} + 2 \cdot (T_y - T_{из}), \quad (5.21)$$

вытекающего из (5.20) и учитывающего параллельный вид связи размерных цепей упругой системы.

*Пример.* Определить допуски на технологические размеры  $A$  и  $B$ , обеспечивающие получение требуемой точности замыкающего звена  $C = 20^{+0,26}$ .

Технологические размеры проставлены от установочной базы, рис. 5.27. Принцип единства баз нарушен. При этих условиях допуск замыкающего звена должен быть равен сумме допусков составляющих звеньев.

При наличии параллельной связи в размерной цепи упругой технологической системы допуск замыкающего звена рассчитывают по зависимости (5.20). Допуски на погрешность установки детали и износ шлифовальных кругов рекомендуется принимать в соответствии с работой [116]:

$$T_y = 0,05 \cdot TA_i ; \quad T_{из} = 0,5 \cdot \delta A_i. \quad (5.22)$$

Тогда из неравенства (5.21) вытекает:

$$TA + TB \leq 0,26 + 2 \cdot (0,075 + 0,0075) = 0,425 \text{ мм};$$

$$TA + TB = 0,216 \text{ мм}.$$

Результаты расчета свидетельствуют о том, что размерные цепи с параллельными замкнутыми контурами составляющих звеньев позволяют увеличить допуск на 35...40% по сравнению с допуском, указанным на технологическом эскизе, рис. 5.27,б. Полученный результат кажется парадоксальным, в действительности это явление закономерное.

Эффективность параллельных размерных связей упругой технологической системы зависит от значения компенсации погрешностей параллельно связанных звеньев в цепи упругой системы.

## 5.8. ВЛИЯНИЕ БАЗИРОВАНИЯ НА РАЗМЕРНЫЕ СВЯЗИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Назначению технологических баз предшествует анализ размерных связей, в результате которого назначают установочные базы. От правильного выбора технологических баз в значительной степени зависит фактическая точность выполнения размеров, заданных чертежом, сложность конструкций установочных и измерительных приспособлений, точность взаимного расположения поверхностей и



трудоемкость изготовления детали. В качестве технологических баз рекомендуется принимать поверхности, которые одновременно являются конструкторскими и измерительными базами, т.е. применять принцип совмещения баз.

При использовании этого принципа заготовку обрабатывают с использованием всего поля допуска на размер, назначенный конструктором. При этом технологические базы должны обеспечивать надежную установку заготовки, свободный подвод инструментов к обрабатываемым поверхностям и выполнение технических требований, регламентируемых чертежом.

Принцип совмещения баз может быть реализован при разработке технологических процессов в том случае, если конструктор при простановке размеров на чертеже предусмотрел эту возможность.

В ряде случаев применение принципа единства баз приводит к неоправданному усложнению технологической оснастки. Отказ от принципа единства баз приводит к образованию дополнительных технологических размерных связей и ужесточению допусков на некоторые размеры, проставленные в чертеже.

На рис. 5.29,а показан чертеж детали, а на рис. 5.29,б – операционный эскиз на обработку паза и сверления отверстия.

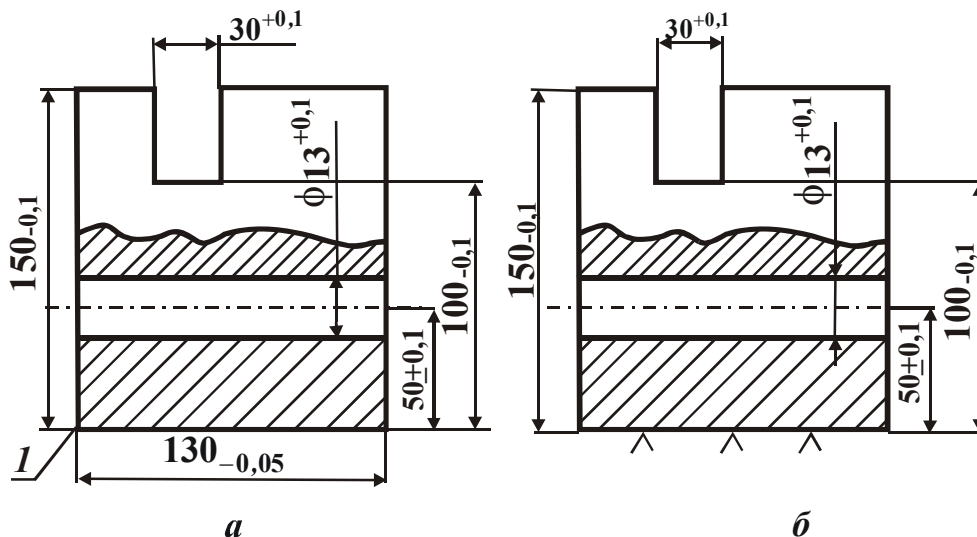


Рис. 5.29. Чертеж детали (а) и операционный эскиз на обработку паза и сверления отверстия (б).

Поверхность 1, от которой координируются на чертеже обрабатываемые поверхности, – наиболее удобная установочная база.

На технологических эскизах размеры проставляют от установочной базы. Следовательно, в данном случае можно реализовать принцип совмещения баз. При этих условиях обработки ужесточать

технологический размер не требуется.

На рис. 5.30,а показан чертеж детали, а на рис. 5.30,б – операционный эскиз на обработку паза и сверления отверстия.

Размеры, координирующие глубину паза и расположение отверстия  $\varnothing 20^{+0,1}$ , проставлены от поверхности 2, которая имеет малую площадь и не может быть использована в качестве установочной базы. Надежную установку и базирование детали при обработке обеспечивает поверхность 1.

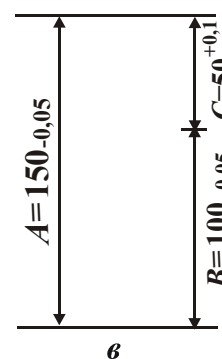
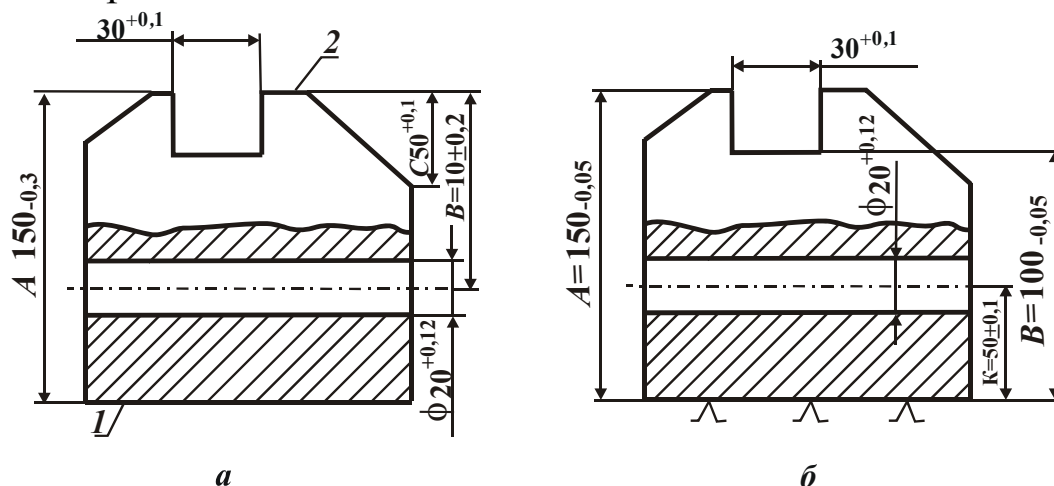


Рис. 5.30. Чертеж детали (а), операционный эскиз на обработку паза и сверления отверстия (б) и размерная цепь (в).

На операционном эскизе размеры проставляют от установочной базы. Следовательно, здесь реализовать принцип единства баз невозможно.

При этих условиях обработки точность размеров, указанных в чертеже, обеспечивается ужесточением допусков операционных размеров. Действительно, в чертеже допуск на размер  $A$  равен 0,3 мм. На технологическом эскизе этот допуск уменьшается в 6 раз до 0,05 мм.

Размер на чертеже, координирующий глубину паза,  $C=50^{+0,1}$ , – замыкающее звено технологической размерной цепи (рис. 5.30,в), а размеры  $B=100$  и  $A=150$  на технологическом эскизе – составляющие звенья. Допуск замыкающего звена равен сумме допусков состав-

ляющих звеньев:

$$TC = TA + TB. \quad (5.23)$$

Если простановка размеров на чертеже не позволяет реализовать принцип единства баз, то при разработке технологических процессов необходимо выбрать такой комплект технологических баз, который, во-первых, обеспечит надежное придание заготовке нужного положения относительно выбранной системы координат на всех операциях изготовления; во-вторых, сократит длину размерных цепей и обеспечит требуемую точность.

Такой принцип базирования, дополняющий принцип единства баз, называется принципом постоянства. Смена технологических баз по ходу технологического процесса увеличивает длину технологических размерных цепей, а, следовательно, и суммарную погрешность размерной связи. Принцип постоянства баз реализуется при условии, если на протяжении всего технологического процесса используются одни технологические базы.

На рис. 5.31,а изображен чертеж детали, а на рис. 5.31,б,в показаны два варианта технологических процессов обработки. В первом варианте (рис. 5.31,б) расточка отверстия производится от установочной базы 2, а фрезерование площадки – от установочной базы 1. Здесь принцип постоянства баз не соблюдается. Во втором варианте расточка отверстия и фрезерование площадки (рис. 5.31,в) выполняются от одной установочной базы – поверхности 1.

В рассматриваемых вариантах обработки произведено следующее ужесточение допусков, например, на размер  $C=30_{-0,2}$  допуск ужесточен с 0,2 мм до 0,05 мм – в четыре раза. На операцию расточки отверстия допуск назначен 0,05 мм.

Необходимость резкого ужесточения допусков на операционные размеры связано с тем, что нарушен принцип единства баз. При такой постановке размеров на чертеже совместить конструкторские, технологические и измерительные базы не возможно.

В первом варианте обработки, когда не обеспечивается принцип постоянства баз, допуск замыкающего звена равен сумме допусков составляющих звеньев следующей размерной цепи:

$$TB = TD + TC + TA = 0,1 + 0,05 + 0,3 = 0,45 \text{ мм.}$$

Несмотря на резкое ужесточение допусков на составляющие звенья размерной цепи ( $TC=0,05$  и  $TD=\pm 0,05$ ) (рис. 5.31,б), полученное значение допуска замыкающего размера более чем в два раза превысило значение допуска, регламентируемое чертежом ( $0,45 > 0,2$ ).

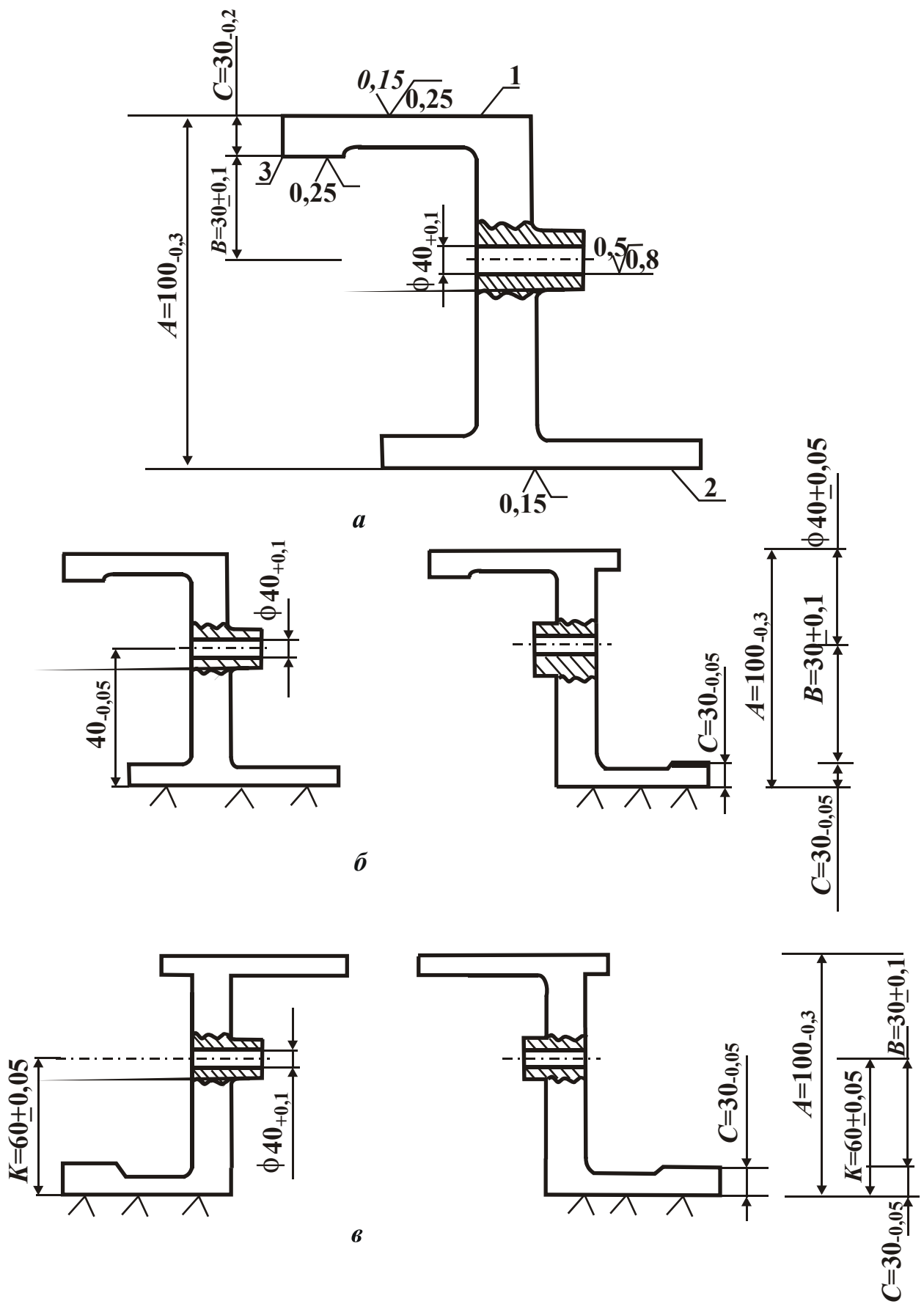


Рис. 5.31. Чертеж детали (а) и варианты технологических процессов обработки (б, в).

Обеспечение принципа постоянства баз значительно сокращает размерную цепь для расчета допуска замыкающего звена за счет исключения размера, соединяющего поверхности 1 и 2:

$$TB = TK + TC = 0,1 + 0,05 = 0,15 \text{ мм.}$$

Точность размеров, регламентируемых чертежом, равна  $A=100_{0,3}$  ( $jT 12$ ),  $C=30_{-0,2}$  ( $jT 12$ ), может быть обеспечена операцией фрезерования. Однако, учитывая ужесточение допусков операционных размеров, технологический процесс значительно усложняется. Например, технологический размер  $C=30_{-0,05}$  соответствует 8-мому качеству точности. Поэтому, если учесть, что заготовка – отливка в землю – изготовлена по 16-тому качеству точности ( $C 16$ ), то для обеспечения 8-мого качества требуется следующее количество операций:

$$K = \frac{\lg \varepsilon}{0,5} = \frac{\lg \frac{1,3}{0,5}}{0,5} = 2,8. \quad (5.24)$$

С другой стороны, при определении методов обработки нужно учитывать шероховатость поверхности. Операция – черновое фрезерование – обеспечивает шероховатость поверхности  $R_z=20 \dots 40$  мкм ( $R_a=2 \dots 4$  мкм). Необходимо получить после окончательной обработки  $R_a=0,125$  мкм.

Требуемое количество переходов:

$$K = \frac{\lg \varepsilon R_z}{0,5} = \frac{\lg \frac{4,0}{0,125}}{0,5} = 2,8 \approx 3.$$

На основании выполненного анализа устанавливается следующий маршрут обработки (рис. 5.32):

I операция – фрезерование поверхности 1 при обеспечении размера  $C_1$ . База – поверхность 2.

II операция – фрезерование поверхностей 2 и 3 при обеспечении размеров  $C_2$  и  $C_3$ . База – поверхность 1.

III операция – фрезерование поверхности 1 при обеспечении размера  $C_4$ . База – поверхность 2.

IV операция – фрезерование поверхностей 2 и 3 при обеспечении размеров  $C_5$  и  $C_6$ . База – поверхность 1.

V операция – сверление отверстия диаметром  $d=30^{+0,3}$ , выдерживая размер  $C_7$ . База – поверхность 1.

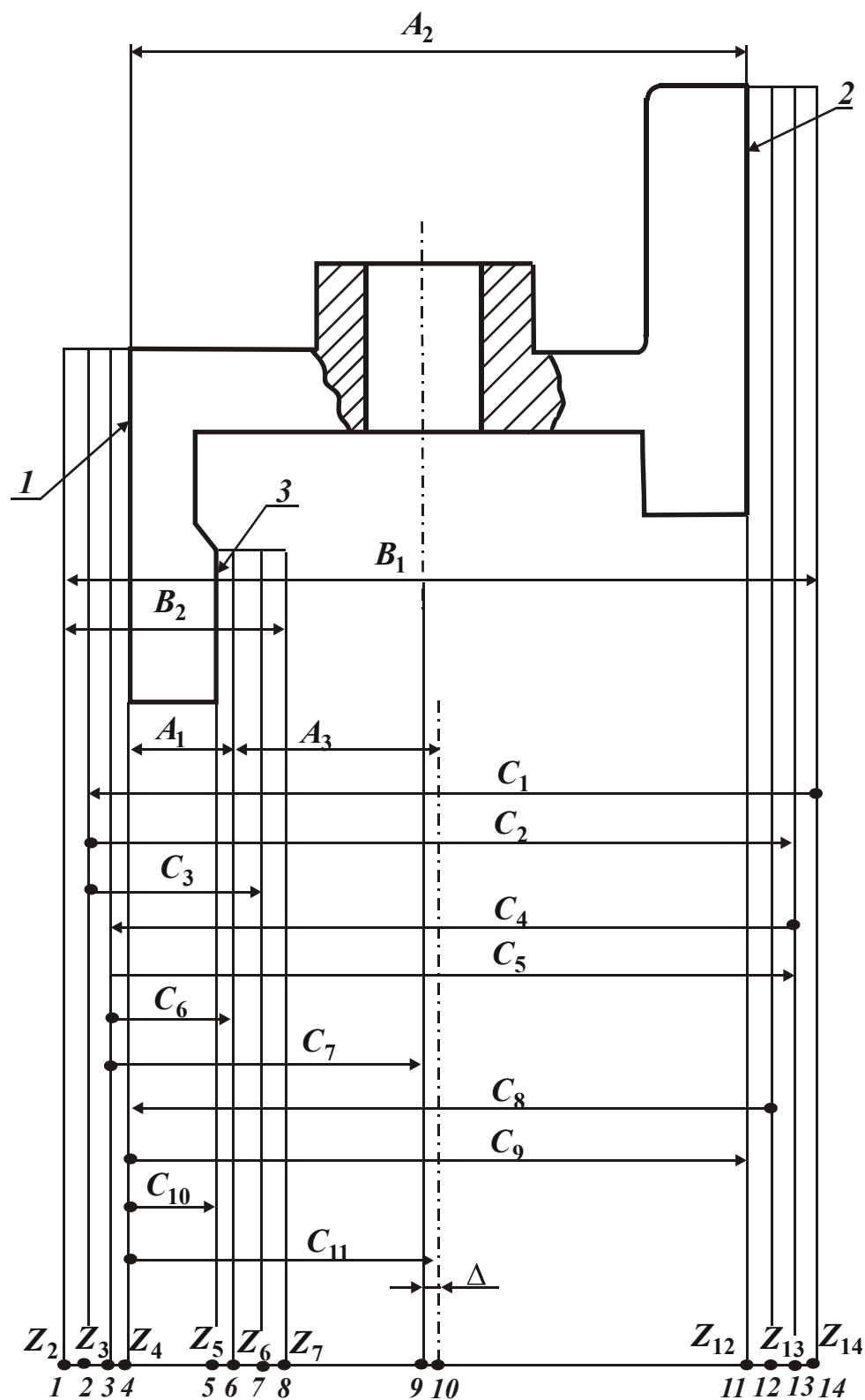


Рис. 5.32. Размерная схема технологического процесса обработки кронштейна.

VI операция – шлифование поверхности 1 при обеспечении размера  $C_8$ . База – поверхность 2.

VII операция – шлифование поверхностей 2 и 3 при обеспечении размеров  $C_9$  и  $C_{10}$ . База – поверхность 1.



$$C_{10}=30_{-0,05};$$

$$C_{11}=30 \pm 0,1 \text{ – замыкающее звено};$$

$$C_9=100_{-0,3}.$$

Параметр  $\Delta$  находят из системы уравнений:

$$\begin{cases} Z_4 = C_7 + \Delta - C_{11} \\ Z_{12} = C_{11} - C_9 - \Delta - C_7 + C_5 \end{cases}$$

Для определения технологического размера  $C_7$  принимают  $\Delta=0$ , тогда  $C_5 - C_7 - C_8 + C_{11} = 0$ ;  $C_7 = C_5 - C_8 + C_{11}$ .

Таблица 5.16

Уравнения для расчета технологических размеров

№ п/п	Расчетное уравнение	Исходное уравнение	Определяемый параметр
1	$-A_1 + C_{10} = 0$	$A_1 = C_{10}$	$C_{10}$
2	$-A_2 + C_9 = 0$	$A_2 = C_9$	$C_9$
3	$-Z_{12} - C_9 + C_8 = 0$	$Z_{12} = C_8 - C_9 = 0$	$C_8$
4	$-A_3 + C_{11} = 0$	$A_3 = C_{11}$	$C_{11}$
5	$-Z_4 + C_5 - C_8 = 0$	$Z_4 = C_5 - C_8$	$C_5$
6	$-Z_{13} - C_5 + C_4 = 0$	$Z_{13} = C_4 - C_5$	$C_4$
7	$-Z_3 + C_2 - C_4 = 0$	$Z_3 = C_2 - C_4$	$C_2$
8	$-Z_{14} - C_2 + C_1 = 0$	$Z_{14} = C_1 - C_2$	$C_1$
9	$-Z_2 + B_1 - C_1 = 0$	$Z_2 = B_1 - C_1$	$B_1$
10	$-Z_4 + C_7 + \Delta - C_{11} = 0,$ $-\Delta - C_7 + C_5 - C_8 + C_{11} = 0$	$Z_4 = C_7 + \Delta - C_{11},$ $\Delta = C_5 - C_7 - C_8 + C_{11}$	$C_7$ $\Delta$
11	$-Z_5 - C_{10} + C_8 - C_5 + C_6 = 0$	$Z_5 = C_8 - C_{10} - C_5 + C_6$	$C_6$

Технологический размер  $C_8$  определяют из расчетного уравнения 3, табл. 5.16:  $Z_{12min} = C_{8min} - C_{9max}$ .

Припуск  $Z_{12min}$  выбирают из Приложения 11 ( $Z_{12min}=0,15$  мм), тогда  $C_{8min} = Z_{12min} + C_{9max} = 0,15 + 100 = 100,15$  мм.

Технологический размер  $C_8$  обеспечивается по 8-мому качеству точности при допуске  $TC_8=0,054$  мм (Приложение 13). Следова-



тельно,  $C_{8max} = 100,204_{-0,054}$  мм.

Технологический размер  $C_5$  определяют по исходному уравнению 5, табл. 5.16:  $Z_{4min} = C_{5min} - C_{8max}$

Припуск  $Z_{4min} = 0,15$  мм (Приложение 11), тогда

$$C_{5min} = Z_{4min} + C_{8max} = 0,15 + 100,204 = 100,354 \text{ мм.}$$

Предельные значения технологического размера  $C_7$ :

$$C_{7min} = C_{5min} - C_{8max} + C_{11min} = 100,354 - 100,204 + 29,9 = 30,05 \text{ мм;}$$

$$C_{7max} = C_{5max} - C_{8min} + C_{11max} = 100,427 - 100,15 + 30,1 = 30,377 \text{ мм.}$$

Полученные данные позволяют рассмотреть замкнутый контур размерной цепи для определения смещения центров:

$$\Delta = C_8 - C_{11} - C_5 + C_7.$$

Предельные значения  $\Delta$ :

$$\Delta_{min} = C_{8min} - C_{11max} - C_{5max} + C_{7min};$$

$$\Delta_{max} = C_{8max} - C_{11min} - C_{5min} + C_{7max};$$

$$\Delta_{min} = 100,15 - 30,1 - 100,427 + 30,05 = -0,327 \text{ мм;}$$

$$\Delta_{max} = 100,204 - 29,9 - 100,354 + 30,377 = +0,327 \text{ мм;}$$

$$\Delta = 0 \pm 0,327 \text{ мм.}$$

Смещение центров  $\Delta$  получено в результате переустановки детали, т.е. смены установочной базы. Эта погрешность не позволяет обеспечить размер замыкающего звена в пределах заданного допуска  $A = 30 \pm 0,1$  мм.

Для достижения точности замыкающего размера следует исключить возникновение погрешностей, связанных с переустановкой детали, т.е. обеспечить принцип постоянства баз.

Однако необходимо рассмотреть вариант обработки детали, когда невозможно обеспечить не только принцип единства баз, но и принцип постоянства баз. Этот вариант обработки требует ужесточения допусков на все составляющие звенья размерной цепи, чтобы их сумма укладывалась в пределах допуска замыкающего звена.

Например, допуск замыкающего звена  $TB$  (рис. 5.31,б) равен сумме допусков  $TA$ ,  $TC$ ,  $TD$  составляющих звеньев размерной цепи. Допуск на размер необходимо уменьшить с 0,3 мм до 0,05 мм:

$$TB = \pm 0,1 = TA + TC + TD = 0,05 + 0,05 + 0,1 = 0,2 \text{ мм.}$$

Ужесточение допусков на размеры  $C$  и  $D$  – это следствие того, что был нарушен принцип единства баз, а ужесточение допуска на размер  $A$  – того, что нарушен принцип постоянства баз.

## 5.9. ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ УСТАНОВОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ТОЧНОСТЬ ЗАМЫКАЮЩЕГО ЗВЕНА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ЦЕПИ

### 5.9.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ УСТАНОВКИ ДЕТАЛИ ПО ОДНОМУ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМУ ОТВЕРСТИЮ

Обрабатываемую деталь по цилиндрическому отверстию устанавливают с гарантированным зазором  $\Delta$  между установочной базой на приспособлении и поверхностью детали. Номинальный диаметр установочной поверхности приспособления должен учитывать гарантированный зазор: для гнезда  $D_y = D_\delta + \Delta$ , для пальца  $D_y = D_\delta - \Delta$ .

Искомый центрирующий диаметр приспособления можно выразить через известные параметры – диаметр детали и гарантированный зазор:

для гнезда:

$$D_y^{+TD_y} = (D_\delta + \Delta)^{+TD_y} = D_{\delta+\Delta}^{+(\Delta+TD_y)};$$

для пальца:

$$D_{y-TD_y} = (D_\delta - \Delta)_{-TD_y} = D_{-\Delta}^{-\Delta+TD_y}. \quad (5.25)$$

Погрешность установки обрабатываемой детали зависит от максимального зазора между базой и установочной поверхностью:

$$P = \pm \frac{TD_\delta + \Delta + TD_y}{2} = TD_\delta + \Delta + TD_y. \quad (5.26)$$

Ожидаемая погрешность обработки определяется как сумма трех главных составляющих ( $P$ ) – погрешностей, связанных соответственно с установкой детали в приспособлении, самого приспособления ( $\delta_n$ ) и с методом обработки ( $\tau$ ):

$$\delta_z = 1,2 \cdot \sqrt{P^2 + \delta_n^2 + \tau^2}. \quad (5.27)$$

Для определения диаметра центрирующего отверстия на приспособлении приравняем неравенство (5.27) к допуску на изготовление детали  $TA$ :

$$1,2 \cdot \sqrt{P^2 + \delta_n^2 + \tau^2} \leq TA; \quad P^2 < \left(\frac{TA}{1,2}\right)^2 - (\tau^2 + \delta_n^2). \quad (5.28)$$

Каждая из главных составляющих поверхностей состоит из слагаемых:  $\underbrace{\lambda + \delta_P}_P + \delta_n + \delta_c + \delta_{из} + \delta_n + \delta_{деф}$ , где  $\lambda$  – погрешность от не



*Решение.* Выразим центрирующий диаметр приспособления через известный диаметр детали:

$$D_y^{+TD_y} = D_{y+\Delta}^{+(\Delta+TD_y)} = 99,96_{+\Delta}^{+(\Delta+TD_y)};$$

$$\Delta + TD_y \leq \sqrt{\left(\frac{TA}{1,2}\right)^2 - (\tau^2 + \delta_n^2)} - TD_\delta;$$

$$\Delta + TD_y \leq \sqrt{0,028 - (0,05 + 0)} - 0,035;$$

$$\Delta + TD_y \leq 0,089.$$

Приняв гарантированный диаметральный зазор  $\Delta=0,05$  мм, получим:  $D_y^{+TD_y} = 99,96_{+0,05}^{+0,089} = 100,01^{+0,039}$ .

### 5.9.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ УСТАНОВКИ ДЕТАЛИ ПО ДВУМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ОТВЕРСТИЯМ

Установка детали по двум цилиндрическим отверстиям требует особого подхода к проектированию установочных элементов. Это связано с тем, что во взаимном расположении двух баз всегда имеется погрешность. Предположим, что установочными базами детали служат две цилиндрические поверхности (наружная или внутренняя), имеющие диаметры  $D_1$  и  $D_2$ , с параллельными осями, расстояние между которыми  $C \pm TC$ . В этом случае погрешность взаимного расположения баз, равная  $2TC$ , заложена при обработке самих баз. Существование погрешности взаимного расположения баз делает очевидным тот факт, что абсолютно точная установка детали не возможна. В связи с этим при проектировании установочных элементов необходимо определить, какому из этих двух элементов целесообразно отнести погрешность взаимного расположения баз ( $2TC$ ).

Возможны два принципиально различных решения.

Первый вариант характерен тем, что одна из двух баз (одно из отверстий), например, первая, обеспечивает абсолютно точное центрирование (т.е.  $\delta_{y1}=0$ ). Погрешность взаимного расположения межцентровых расстояний отверстий компенсирует вторая база (т.е.  $\delta_{y2} = 2TC$ ), рис. 5.35,а.

Второй вариант характерен тем, что погрешность взаимного расположения баз ( $2TC$ ) распределена равномерно между двумя базами (отверстиями), рис. 5.35,б.

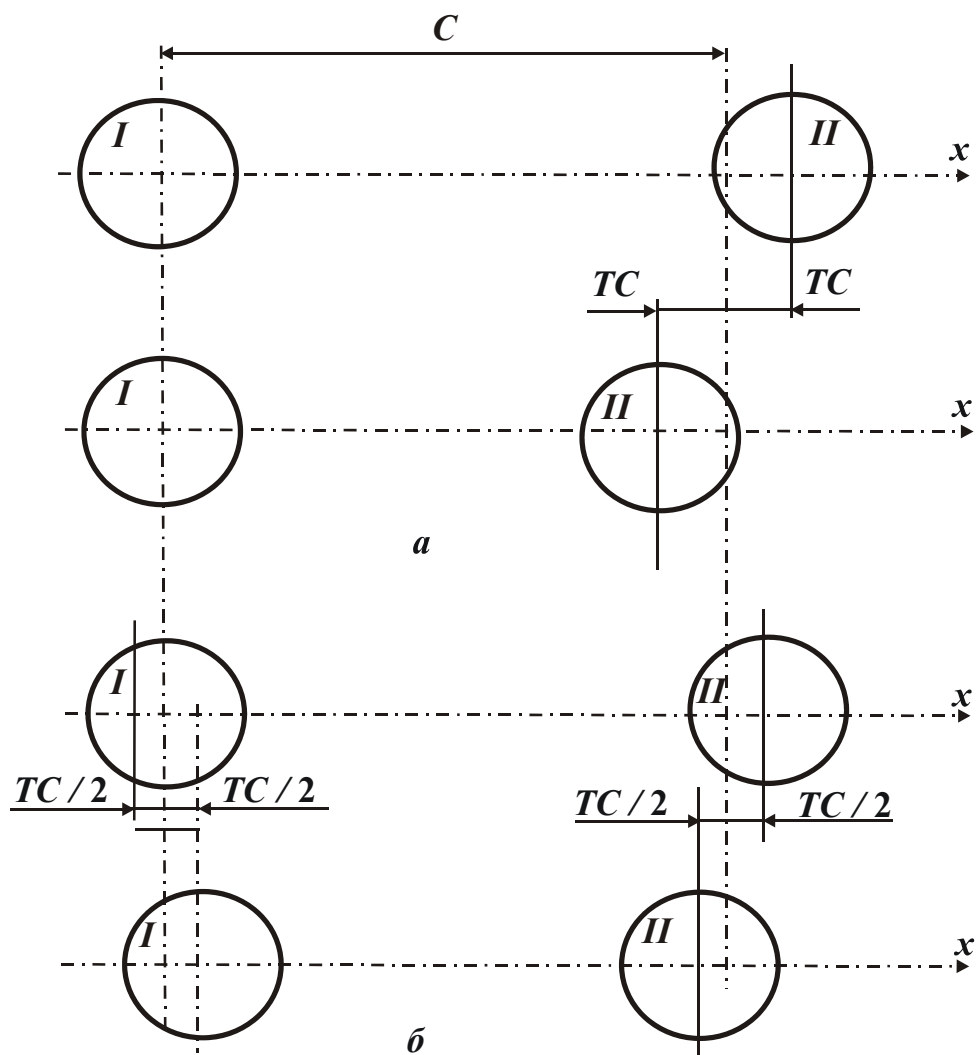


Рис. 5.35. Схемы базирования деталей по двум цилиндрическим отверстиям: а – точное базирование по одному из отверстий; б – распределение погрешностей по двум базам.

На рис. 5.36 изображены различные схемы установки корпусной детали по двум цилиндрическим отверстиям  $d$  и  $d_1$  для выполнения расточки двух отверстий  $d_2$  и  $d_3$ .

В первом варианте оси обрабатываемых отверстий заординированы от одной базы, во втором варианте – от двух баз. Если размеры на чертеже, координирующие обрабатываемые отверстия, проставлены от одной базы, необходимо применять первый вариант базирования, если от обеих баз, то предпочтение следует отдать второму варианту базирования.

В основе проектирования установочных элементов нужно руководствоваться принципом разделения их функций, который состоит в том, что установочные элементы освобождаются от выполнения функций, уже выполняемых другими установочными элементами. Нарушение этого принципа снижает точность установки.

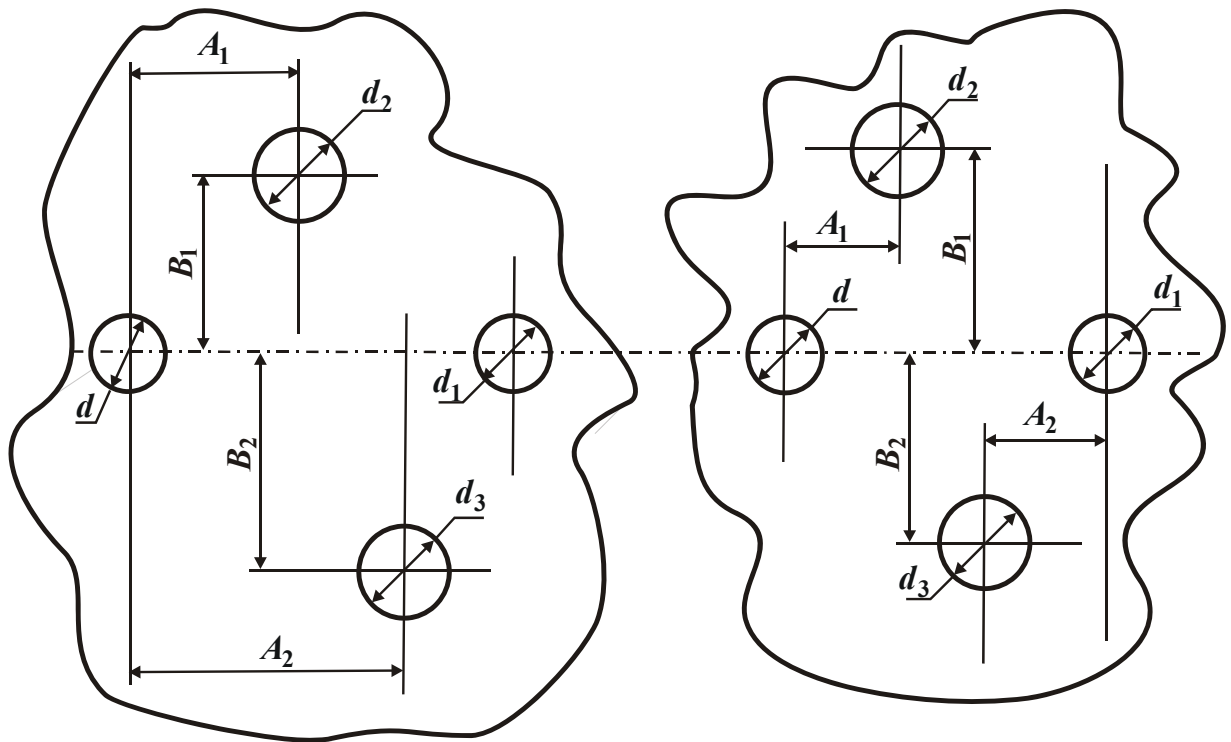


Рис. 5.36. Варианты установки корпусной детали по двум цилиндрическим отверстиям.

При точном центрировании детали по одному из отверстий вторая база должна быть освобождена от функции базирования в направлении оси  $x$  и ограничивать перемещение в направлении оси  $z$ , рис. 5.37.

Приведенные варианты базирования показывают, что вторая база не ограничивает перемещение по направлению  $x...x$ , в котором ее положение уже определено элементами первой базы.

В случае применения двух параллельных установочных плоскостей (рис. 5.37,а) расстояние между ними будет  $B^{+TD_y} = (D_\delta + \Delta)^{+TD_y}$ , а погрешность установки:

$$\delta_y = TD_\delta + \Delta + TD_y. \quad (5.29)$$

С применением одной установочной плоскости (рис. 5.37,б) гарантированный зазор  $\Delta$  исчезает, а погрешность установки будет:

$$\delta_y = 0,5 \cdot (TD_\delta + TD_y). \quad (5.30)$$

Применение для базирования подвижной призмы (рис. 5.37,в) сводит погрешность базирования к нулю.

Применение ромбического или срезанного пальца требует выбора диаметра пальца таким же, как при установке детали по одному отверстию:

$$D_\delta - TD_\delta = (D_y - \Delta)_{-TD_\delta}, \quad (5.31)$$

а определение ширины рабочей ленточки производится по зависимости:

$$l = \frac{D_y \Delta}{2 \cdot (TC_\delta + C_y)} \quad (5.32)$$

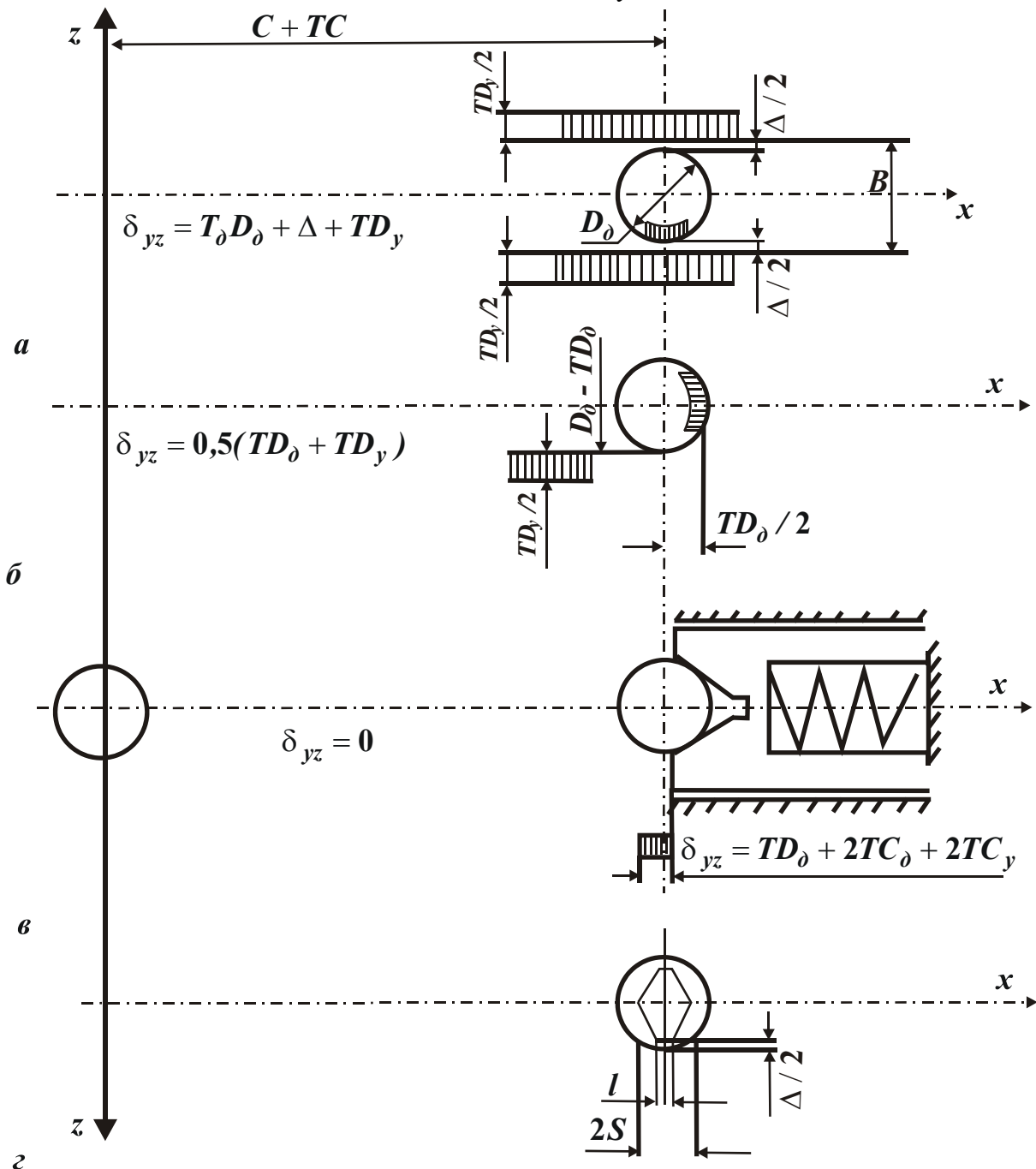


Рис. 5.37. Базирование детали: а, б – по установочным плоскостям, в – подвижной призме, г – ромбическому пальцу.

Рассмотрим пример. Допуск на межцентровое расстояние приспособления  $2TC = \pm 0,05$  мм, допуск на межцентровое расстояние детали  $2TC = \pm 0,15$  мм, гарантированный зазор между диаметрами  $D_y - D_\delta = \Delta = 0,03$  мм. Центрирующий диаметр приспособления

$D_y=30$  мм. Для данных условий размер ленточки на ромбическом или срезанном пальце будет:

$$l = \frac{D_y \Delta}{2 \cdot (TC_\delta + TC_y)} = \frac{30 \cdot 0,03}{2 \cdot (0,15 + 0,05)} = \frac{0,9}{0,4} = 2,2 \text{ мм.}$$

Максимальное смещение пальца в направлении оси  $x$ , компенсирующее погрешности межцентровых расстояний, равно

$$2S = l + 2 \cdot (TC + TC_y). \quad (5.33)$$

## 5.10. ТОЧНОСТЬ ЗАМЫКАЮЩЕГО ЗВЕНА РАЗМЕРНОЙ ЦЕПИ ПРИ УСТАНОВКЕ ДЕТАЛЕЙ В САМОЦЕНТРИРУЮЩИЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

### 5.10.1. ПОГРЕШНОСТИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ УСТАНОВКЕ ШАТУНА НА ОПЕРАЦИИ СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ГОЛОВКАХ

Отверстия в головках шатунов сверлят на двухшпиндельном станке. Расстояние между осями шпинделей – настроечный размер  $C \pm TC$ . На точность взаимного расположения отверстий относительно головок шатуна влияет не только погрешность настроечного размера, но и положение обрабатываемой детали относительно режущих инструментов.

Например, при одновременном сверлении отверстий смещение шатуна относительно режущих инструментов в направлении оси  $x \dots x$  нарушает симметричность расположения отверстий на головках.

Базирование детали на самоцентрирующем приспособлении может осуществляться двумя методами.

Первый метод заключается в том, что одна из призм жестко закреплена на установочной плите, вторая подвижна, рис. 5.38,а. Расстояние между осями шпинделей постоянно –  $A_4$ . Диаметры головок шатуна изменяются от  $D_1$  до  $D_2$ . Изменение диаметра головок в пределах допуска вызывает смещение их центров  $0 \dots 0_1$  на величину

$$\Delta A = \frac{TD}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (5.34)$$

Если центр одной из головок шатуна точно совместить с осью одного из шпинделей, то второе отверстие будет просверлено со



смещением от центра второй головки на величину

$$\Delta A = A_2 + A_3 + A_4 - A_1. \quad (5.35)$$

Предельные значения замыкающего звена:

$$\Delta A_{max} = A_{2max} + A_{3max} + A_{4max} - A_{1min};$$

$$\Delta A_{min} = A_{2min} + A_{3min} + A_{4min} - A_{1max}.$$

Если учесть отклонение диаметров обеих головок, то результирующая погрешность смещения оси сверления отверстий относительно контура заготовок удвоится, т.е. будет  $\delta_4 = 2\Delta A$ .

Суммарное смещение центров отверстий относительно контура головок шатуна  $\Delta A$  при базировании с помощью двух призм устранить невозможно. Однако эту погрешность можно равномерно распределить между двумя контурами головок шатуна, если базирование

осуществлять относительно скрытой базы, т.е. второй плоскости симметрии  $y...y$ , рис. 5.38,б.

Центрирование детали относительно плоскостей симметрии  $x...x$  и  $y...y$  можно реализовать, если шатун закреплять одновременным движением двух подвижных призм к центру с одинаковой скоростью, например, с помощью винта, имеющего правую и левую резьбы. Относительно оси симметрии следует рассматривать два самостоятельных замкнутых контура

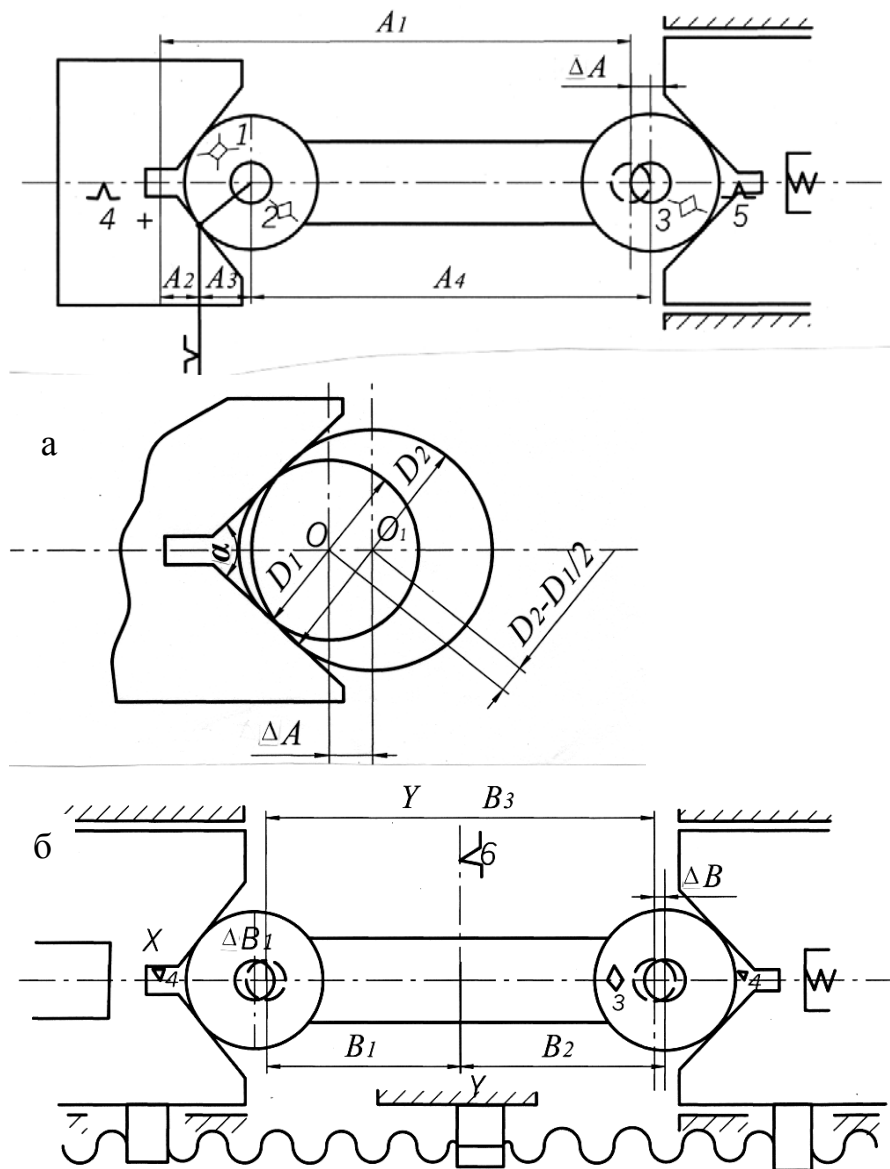


Рис. 5.38. Способы базирования шатуна с помощью призм на операции сверления отверстий в головках.

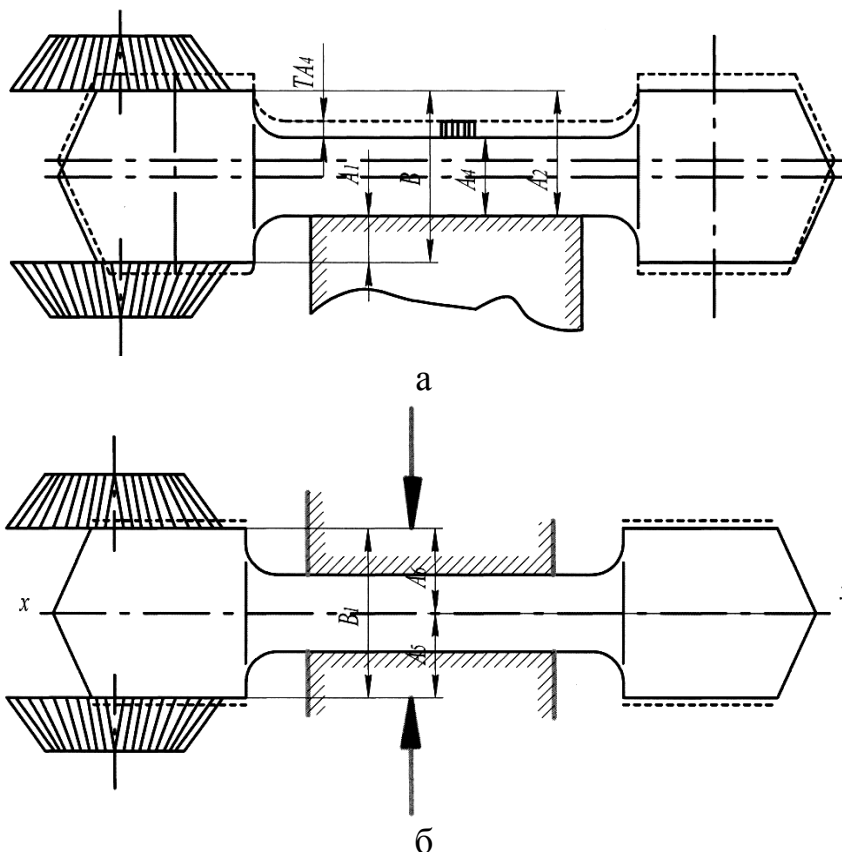
размерной цепи:

$$B_1 = \frac{B_3}{2} + \Delta B_1; \quad B_2 = \frac{B_3}{2} + \Delta B_2; \quad \Delta B_1 = \Delta B_2 = \frac{TD}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}.$$

### 5.10.2. ПОГРЕШНОСТИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ШАТУНА НА ОПЕРАЦИИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ТОРЦОВ ГОЛОВОК

Рассматривая технологию изготовления шатунов, следует обратить внимание на способ базирования шатуна на первой черновой операции фрезерования торцов головок. Торцы головок обрабатываются одновременно двумя фрезами, настроенными на размер. При данной схеме обработки установочной базой на детали может быть только стержень, соединяющий головки.

В качестве установочной базы на приспособлении часто используют жестко фиксированную плоскость. Относительно этой плоскости настраивают режущие инструменты (фрезы) на размеры  $A_1$  и  $A_2$  (рис. 5.39,а) для обеспечения требуемой толщины головки шатуна  $B_{ТВ}$ .



Допуск замыкающего звена равен сумме допусков составляющих звеньев

$$TB = TA_1 + TA_2.$$

Для шатунов допуск на толщину

головки  $TB$  изменяется в пределах 0,10...0,14 мм. Следовательно, допуски на составляющие звенья должны находиться в пределах  $TA_1 = TA_2 = 0,05...0,07$ .

Рис.5.39. Способы базирования шатуна на операции фрезерования торца головок.

Для шатунов допуск на толщину головок  $TB$  изменяется в пределах 0,10...0,14 мм. Следовательно, допуски на составляющие звенья должны находиться в пределах  $TA_1 = TA_2 = 0,05...0,07$ .

Размеры  $A_1$  и  $A_2$  проставлены от поверхности, которая получена литьем в землю или штамповкой. Точность размеров заготовки соответствует 16-тому качеству точности.

Допуск на толщину стержня, изготовленного по этому качеству, заготовки шатуна изменяется от 0,9 до 1,1 мм. Следовательно, разность размеров  $A_3$  и  $A_2$  будет равна допуску на размер  $TA_3$ .

Ось симметрии стержня будет смещена относительно торцов головок шатуна на 0,9...1,1 мм. Такую ассиметричность исправить на последующих операциях шлифования практически невозможно. Чтобы избежать возникновения погрешностей при обработке, нужно изменить схему базирования.

При базировании необходимо использовать скрытую базу – ось  $x...x$ , рис. 5.39,б. Ориентацию детали относительно оси симметрии можно обеспечить, если установку производить в самоцентрирующих тисках.

### 5.11. СБОРОЧНЫЕ РАЗМЕРНЫЕ ЦЕПИ

В сборочных размерных цепях замыкающим звеном может быть зазор, линейный или угловой размер. Если все звенья сборочной размерной цепи параллельны между собой и имеют линейные размеры, то такая размерная цепь называется линейной.

Если размерная цепь состоит из звеньев, расположенных в параллельных ветвях или под углом друг к другу, но лежащих в одной плоскости, то такая размерная цепь называется плоскостной.

Если сборочная размерная цепь состоит из звеньев, размеры которых выражены в угловых единицах, а звенья расположены в разных плоскостях, то такая размерная цепь называется угловой.

В технологических размерных цепях обычно по заданному номинальному размеру, допуску и предельным отклонениям замыкающего звена определяют номинальные размеры, допуски и предельные отклонения составляющих звеньев (технологические размеры).

В сборочных размерных цепях по размерам, допускам и предельным отклонениям составляющих звеньев размерной цепи находят номинальный размер и допуск замыкающего звена.

Требуемая точность замыкающего звена при сборке обеспечивается следующими методами: полной и неполной взаимозаменяемости; групповым или селективной сборки; пригонки.

### 5.11.1. РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ПОЛНОЙ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ

Требуемая точность сборки в данном случае достигается благодаря расчету замыкающего звена по методу максимума и минимума. Этот метод осуществляется без прогоночных операций, он позволяет реализовать поточную форму сборки, обеспечивает снабжение потребителя запасными деталями. При данном методе сборки связь номинального размера замыкающего звена  $\Delta$  с номинальными размерами составляющих звеньев  $A_i$  устанавливается непосредственно по схеме размерной цепи сборочного чертежа (рис. 5.40):

$$\Delta = A_1 - (A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6).$$

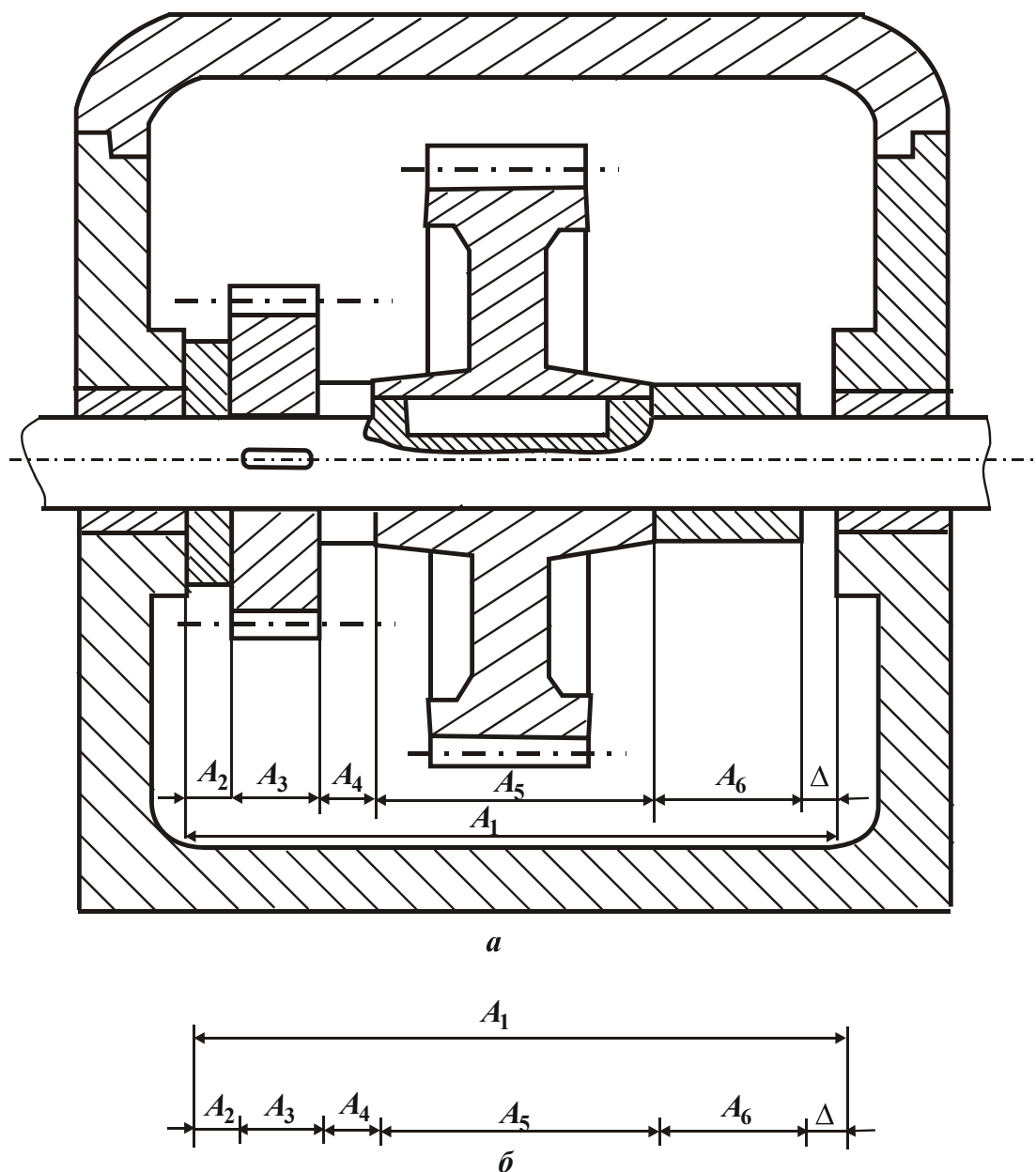


Рис. 5.40. Схемы: а – осевого разреза редуктора, б – сборочной размерной цепи.

В общем виде для любого числа составляющих звеньев это уравнение для определения номинального размера замыкающего звена имеет вид:

$$\Delta = \sum_{i=1}^{n_i} \bar{A}_i - \sum_{q=1}^{n_q} \bar{A}_q, \quad (5.36)$$

где  $n_i$  и  $n_q$  – соответственно число увеличивающих и уменьшающих звеньев размерной цепи.

Из уравнений (5.36) определяют максимальный и минимальный предельные размеры замыкающего звена:

$$\begin{aligned} \Delta_{max} &= \sum_{i=1}^{n_i} \bar{A}_{i\ max} - \sum_{q=1}^{n_q} \bar{A}_{q\ min}, \\ \Delta_{min} &= \sum_{i=1}^{n_i} \bar{A}_{i\ min} - \sum_{q=1}^{n_q} \bar{A}_{q\ max}. \end{aligned} \quad (5.37)$$

Почленно вычитая второе уравнение из первого, получаем

$$\Delta_{max} - \Delta_{min} = \left( \sum_{i=1}^{n_i} \bar{A}_{i\ max} - \sum_{q=1}^{n_q} \bar{A}_{q\ min} \right) + \left( \sum_{i=1}^{n_i} \bar{A}_{i\ min} - \sum_{q=1}^{n_q} \bar{A}_{q\ max} \right).$$

Разность между наибольшими и наименьшими предельными размерами звеньев равна допуску на размеры этих звеньев. Запишем полученное уравнение для расчета допуска замыкающего звена:

$$T\Delta = TA_i + TA_q = \sum_{j=1}^n TA_j. \quad (5.38)$$

Для определения предельных отклонений размера замыкающего звена  $\Delta_{B\Delta}$  и  $\Delta_{H\Delta}$  достаточно из каждого уравнения (5.37) почленно вычесть номинальные размеры. Координата середины поля допуска любого  $i$ -того звена вычисляется так:

$$\Delta_{0i} = \frac{\Delta_{B_i} + \Delta_{H_i}}{2}.$$

Например,  $A_i = 40_{+0,2}^{+0,6}$ ;  $\Delta_{0i} = \frac{0,2 + 0,6}{2} = 0,4$ .

Если известны  $\Delta_{0i}$  и  $TA_i$ , то предельные отклонения размера  $A_i$  можно представить в виде

$$\Delta_{B_i} = \Delta_{0i} + \frac{TA_i}{2}; \quad \Delta_{H_i} = \Delta_{0i} - \frac{TA_i}{2}. \quad (5.39)$$

По аналогии верхнее и нижнее отклонения замыкающего звена:

$$\Delta_{B\Delta} = \Delta_{0\Delta} + \frac{T\Delta}{2}; \quad \Delta_{H\Delta} = \Delta_{0\Delta} - \frac{T\Delta}{2}. \quad (5.40)$$

В ГОСТ 16320-70 введен коэффициент  $\xi$ , называемый передаточным отношением. Для увеличивающих звеньев  $\xi=1$ , для уменьшающих  $\xi=-1$ . С учетом передаточного отношения формула для расчета номинального значения замыкающего звена будет

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \xi A_i, \quad (5.41)$$

При выборе метода полной взаимозаменяемости применяют способ единого качества точности для всех звеньев сборочной размерной цепи. Качество точности определяют по числу единиц допуска, одинакового для всех составляющих звеньев цепи. Единица допуска согласно СТ СЭВ 145-75

$$i = 0,45 \cdot \sqrt[3]{D + 0,001D}, \quad (5.42)$$

где  $D$  – среднее арифметическое значение крайних размеров интервала по таблице допусков СТ СЭВ 145-75, в который попадает размер составляющего звена.

Обозначим  $(D + 0,001D)$  через  $Q_1$ , тогда  $i = 0,45 \cdot \sqrt[3]{Q_1}$ .

Допуск составляющих звеньев

$$TA_i = a \cdot 0,5 \cdot \sqrt[3]{Q_i}, \quad (5.43)$$

где  $a$  – число единиц допуска.

Подставив полученное выражение (5.43) в исходное (5.38), получим

$$T\Delta = a \cdot 0,5 \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt[3]{Q_i}. \quad (5.44)$$

Из выражения (5.44), имеем

$$a = \frac{T\Delta}{0,5 \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt[3]{Q_i}}. \quad (5.45)$$

Таблица 5.17

Квалитеты точности

Квалитет	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$a$	7	10	16	25	40	64	100	160	250	400	640	1000	1600

По этому параметру из табл. 5.17 определяем квалитет точности

[246]. В выражении (5.45) допуск  $TA$  принимается в микронах. Значения  $\sqrt[3]{Q_i}$  приведены в табл. 5.18.

Таблица 5.18

Расчетные значения  $Q_i$ ,  $\sqrt[3]{Q_i}$  и  $\sqrt[3]{Q_i^2}$

Размеры, мм	$Q_i = D_i + 0,001D_i$	$\sqrt[3]{Q_i}$	$\sqrt[3]{Q_i^2}$	Размеры, мм	$Q_i = D_i + 0,001D_i$	$\sqrt[3]{Q_i}$	$\sqrt[3]{Q_i^2}$
До 3	1,73	1,22	1,44	80...120	97,98	4,60	21,30
3..6	4,24	1,62	2,62	120...180	146,97	5,30	27,50
6...10	7,75	1,98	3,90	180...250	212,13	5,90	35,50
10...18	13,42	2,36	5,60	250...315	280,50	6,60	42,50
18...30	23,24	2,86	8,15	315...400	346,40	7,00	49,00
30...50	38,73	3,36	11,40	400...500	447,20	7,70	58,00
50...80	63,24	3,96	16,20	—	—	—	—

По выбранному качеству точности назначают допуски на все составляющие звенья, кроме одного звена, которое выполняет роль компенсатора. Допуск на компенсирующее звено

$$TA_k = T\Delta - \sum_{i=1}^{n-1} TA_i . \quad (5.46)$$

Предельные значения для всех звеньев, кроме компенсирующего, назначают по посадке  $h$  для валов или по посадке  $H$  для отверстий.

Для определения предельных отклонений компенсирующего звена предварительно определяют координаты середины поля допуска этого звена.

Если компенсирующее звено находится в одной ветви размерной цепи, то середину поля допуска компенсирующего размера рассчитывают следующим образом:

$$\Delta_{0k} = \Delta_{0\Delta} \sum_{i=1}^{n_i-1} \Delta_{0i} + \sum_{q=1}^{n_q} \Delta_{0q} . \quad (5.47)$$

Если компенсирующее звено находится в различных ветвях с замыкающим звеном, то середина поля допуска компенсирующего размера будет:

$$\Delta_{0k} = \sum_{i=1}^{n_i} \Delta_{0i} - \sum_{q=1}^{n_q-1} \Delta_{0q} - \Delta_{0\Delta} . \quad (5.48)$$

Предельные отклонения звена компенсатора:

$$\begin{aligned}\Delta_{Bк} &= \Delta_{0к} + \frac{TA_{к}}{2}, \\ \Delta_{Hк} &= \Delta_{0к} - \frac{TA_{к}}{2}.\end{aligned}\quad (5.49)$$

Если полученное при расчете число  $a$  соответствует 7-9 качеству точности, то в этом случае применять метод полной взаимозаменяемости экономически не выгодно: возможны излишне большие затраты на изготовление высокоточных деталей (составляющих звеньев).

*Пример.* На рис. 5.40 изображена размерная цепь. Требуется определить допуски и предельные отклонения размеров составляющих звеньев.

Дано:  $\Delta=0,5\pm 0,5$  мм,  $TA=1,0$  мм,  $A_1=105$  мм,  $A_2=10$  мм,  $A_3=20$  мм,  $A_4=15$  мм,  $A_5=30$  мм,  $A_6=30$  мм. Допуск замыкающего звена равен  $TA=1000$  мкм.

Для определения допусков на составляющие звенья сборочной размерной цепи воспользуемся способом единого качества точности. Исходя из выражения (5.45) определим число единиц допуска

$$a = \frac{TA}{0,5 \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt[3]{Q_i}} = \frac{1000}{0,45 \cdot 18,9} = 105,8.$$

Из табл. 5.17 следует, что все составляющие звенья размерной цепи, кроме одного, изготавливаются по 11-тому качеству точности. В качестве компенсирующего звена примем звено  $A_6=30$  мм. Допуски на размеры по 11-тому качеству точности назначаются по СТ СЭВ 145-75:  $A_1=105^{+0,22}$ ;  $A_2=10_{-0,11}$ ;  $A_3=20_{-0,13}$ ;  $A_4=15_{-0,11}$ ;  $A_5=30_{-0,16}$ .

Из выражения (5.46) определим допуск на компенсирующее звено  $TA_6$ :

$$TA_6 = 1,0 - (2 \cdot 0,11 + 0,13 + 2 \cdot 0,16) = 0,33 \text{ мм.}$$

Звено  $A_6$  уменьшающее, поэтому координата середины поля допуска этого звена будет:

$$\Delta_{0к} = \sum_{i=1}^{n_i} \Delta_{0i} - \sum_{q=1}^{n_q-1} \Delta_{0q} - \Delta_{0\Delta}, \quad (5.50)$$

$$\Delta_{0_6} = 0,11 - [2 \cdot (-0,055) - 0,065 - 0,8] = 0,365.$$

Рассчитаем отклонение регулирующего звена  $A_6$ :



$$\Delta_{B_6} = 0,365 + 0,08 = 0,445 \text{ мм}; \quad \Delta_{H_6} = 0,365 - 0,08 = 0,285 \text{ мм},$$

следовательно,  $A_6 = 30^{+0,445}_{+0,285}$  мм.

Если число составляющих звеньев размерной цепи  $n \leq 4$ , то размерный анализ рекомендуется производить по методу полной взаимозаменяемости, если число  $n \geq 5$ , – по методу неполной взаимозаменяемости.

Кроме того, при выборе метода размерного анализа следует учитывать качество точности среднего арифметического значения допуска всех звеньев, входящих в размерную цепь:

$$\frac{TA_1 + TA_2 + TA_3 \dots TA_n}{n} = \frac{T\Delta}{n}.$$

Если среднее арифметическое значение допуска звеньев цепи соответствует 9-тому и более низкому качеству точности, то размерный анализ следует выполнять по максимуму и минимуму.

Если среднее арифметическое значение допуска соответствует 7-мому и более высокому качеству точности, рекомендуется сборку осуществлять методами пригонки или групповой взаимозаменяемости.

### 5.11.2. РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА НЕПОЛНОЙ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ

Сущность метода заключается в том, что допуск замыкающего звена размерной цепи увеличивают по сравнению с расчетным значением. При этих условиях некоторые узлы будут подвергаться дополнительной обработке.

Допуски и предельные отклонения размеров составляющих звеньев здесь также определяются с учетом способа единого качества точности.

Число единиц допуска:

$$a = \frac{T\Delta}{0,45 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n K_i^2 \cdot Q_i^{2/3}}}, \quad (5.51)$$

где  $K_i$  – коэффициент относительного рассеивания случайных величин (размеров составляющих звеньев);  $Q_i = D + 0,001 \cdot D$ ;  $D$  – среднее арифметическое значение крайних размеров интервала по таблице

допусков СТ СЭВ 145-75, в который попадает размер составляющего звена.

Для закона нормального распределения  $K_i=1,0$ , для закона Симпсона  $K_i=1,2$ , для закона равной вероятности  $K_i=1,73$ .

*Пример.* Определить допуски на составляющие звенья узла (рис. 5.40), используя метод неполной взаимозаменяемости и способ единого качества точности.

Из выражения (5.51) имеем

$$a = \frac{1000}{0,45 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{2 \cdot 13,42^{2/3} + 2 \cdot 38,73^{2/3} + 97,98^{2/3} + 23,24^{2/3}}} = 202.$$

По табл. 5.17 значение  $a=202$  близко к числу 160, что соответствует 12-тому качеству точности. Поэтому на все звенья размерной цепи, кроме компенсирующего, назначим допуски по 12-тому качеству точности, а предельные отклонения – по посадке  $h$  этого качества. С учетом выбранных допусков составляющие звенья имеют следующие размеры:  $A_1=105^{+0,35}$  мм;  $A_2=10_{-0,18}$  мм;  $A_3=20_{-0,21}$  мм;  $A_4=15_{-0,18}$  мм;  $A_5=30_{-0,25}$  мм.

В табл. 5.19 указан возможный процент риска при различных коэффициентах взаимозаменяемости:

$$\eta = \frac{T\Delta}{T'\Delta}, \quad (5.52)$$

где  $T\Delta$ ,  $T'\Delta$  – соответственно заданный и увеличенный допуск замыкающего звена.

Таблица 5.19

Возможный процент риска

Коэффициент $\eta$	1,0	0,9	0,86	0,78	0,68	0,63	0,58	0,53	0,33
Процент риска	0,27	0,6	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	33,0

Для рассмотренного примера коэффициент взаимозаменяемости

$$\eta = \frac{T\Delta}{T'\Delta} = \frac{1,0}{0,16 + 0,35 + 2 \cdot 0,18 + 0,21 + 0,25} = \frac{1,0}{1,33} = 0,75.$$

Для коэффициента  $\eta=0,75$ , как видно из табл. 5.19, процент риска составляет примерно 3%. Следовательно, 3% узлов должны будут подвергнуться дополнительной доработке.

Сборка узлов по методу полной взаимозаменяемости производится с коэффициентом запаса точности больше единицы.

### 5.11.3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ СБОРКИ ПО МЕТОДУ ГРУППОВОЙ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ

Точность замыкающего звена при этом обеспечивается методом полной взаимозаменяемости. Однако вследствие возникающих трудностей при обеспечении высокой точности составляющих звеньев размерной цепи, допуски на сопрягающие размеры деталей, получаемые при обработке, увеличивают в несколько раз. Для обеспечения требуемой точности замыкающего звена непосредственно при сборке предварительно сортируют сопрягаемые детали на такие группы, в которых допуск замыкающего звена составляющих звеньев равен допуску, заданному конструктором.

Допуски на изготовление сопрягаемых деталей увеличиваются в одно и то же число раз. Например, допуск замыкающего звена, указанный в сборочном чертеже,  $T\Delta = TA_1 + TB_1$ .

Допуски на составляющие звенья при изготовлении увеличиваются в  $m$  раз:  $TA'_1 = mTA_1$ ;  $TB'_1 = mTB_1$

Число групп, на которые необходимо рассортировать готовые детали после обработки, также будет  $m$  и определяется так:

$$m = \frac{T\Delta'}{T\Delta} = \frac{TA'_1 + TB'_1}{TB_1 + TB},$$

где  $T\Delta$  – допуск замыкающего звена, заданный конструктором;  $T'\Delta$  допуск замыкающего звена технологических составляющих звеньев, увеличенных в  $m$  раз по сравнению с составляющими звеньями, заданными конструктором.

Например, дано замыкающее звено  $\Delta = 3_{-0,01}^{+0,04}$  мм, с допуском  $T\Delta = 0,03$  мм. Размерная цепь состоит из трех составляющих звеньев. Координата середины поля допуска замыкающего звена:

$$A_{0\Delta} = \frac{0,04 - 0,01}{2} = 0,025 \text{ мм.}$$

Исходное уравнение размерной цепи имеет вид:

$$\Delta = A_1 - A_2 - A_3,$$

где  $A_1$  – увеличивающее звено;  $A_2$  и  $A_3$  – уменьшающие звенья.

Детали, входящие в данную размерную цепь, изготавливаются с точностью  $TA_1 = 0,015$  мм,  $TA_2 = 0,01$  мм и  $TA_3 = 0,05$  мм.

В условиях массового производства изготовить детали с такой точностью – весьма сложно и экономически не оправданно из-за

необходимости частой поднастройки станков.

Предельные отклонения для увеличивающего звена  $\Delta_{B_1}=0,015$  мм и  $\Delta_{H_1}=0$ , откуда  $\Delta_{0_1}=(0,015+1,0)/2=0,0075$  мм.

Координаты середины поля допуска для звеньев  $A_1$  и  $A_2$ :

$$\Delta_{0_\Delta} = \sum_{i=1}^{n_i} \Delta_{0_i} - \sum_{q=1}^{n_q} \Delta_{0_q} \quad (5.53)$$

Методом подбора определяются координаты средин поля допуска звеньев для  $A_2$  и  $A_3$ :  $0,025=0,0075-(-0,01-0,0075)$ . Таким образом,  $\Delta_{0_2} = -0,01$  мм и  $\Delta_{0_3} = -0,0075$  мм.

Предельные отклонения составляющих звеньев цепи  $A_2$  и  $A_3$ :

$$\Delta_{B_2} = -0,01+0,005 = -0,005 \text{ мм}; \quad \Delta_{H_2} = -0,01-0,005 = -0,015 \text{ мм};$$

$$\Delta_{B_3} = -0,0075+0,0025 = -0,005 \text{ мм}; \quad \Delta_{H_3} = -0,0075-0,0025 = -0,01$$

мм.

Применяя метод сборки по методу групповой взаимозаменяемости, указанные допуски замыкающих звеньев можно увеличить, например, в 4 раза:  $TA'_2=4 \cdot 0,015=0,060$  мм;  $TA'_2=4 \cdot 0,01=0,04$  мм;  $TA'_3=4 \cdot 0,005=0,020$  мм.

$$\text{Число групп: } m = \frac{T\Delta'}{T\Delta} = \frac{0,12}{0,03} = 4.$$

Результаты предельных отклонений составляющих звеньев по группам приведены в табл. 5.20 [246].

Таблица 5.20

Предельные отклонения составляющих звеньев

Номер группы	$A_1$		$A_2$		$A_3$	
	$\Delta_{B_2}$	$\Delta_{H_1}$	$\Delta_{B_2}$	$\Delta_{H_2}$	$\Delta_{B_3}$	$\Delta_{H_3}$
1	0,015	0	-0,005	-0,015	-0,005	-0,010
2	0,030	0,015	0,005	-0,005	0	-0,005
3	0,045	0,030	0,015	0,005	0,005	0
4	0,060	0,045	0,025	0,015	0,010	0,005

На рис. 5.41 показано сопряжение вала диаметром  $\varnothing 40_{-0,02}$  с втулкой  $\varnothing 40,02^{+0,02}$ . В массовом производстве с такой точностью изготавливать сопрягающиеся детали на станках экономически невыгодно. Применение метода групповой взаимозаменяемости позволяет значительно расширить допуски на изготовление таких деталей.

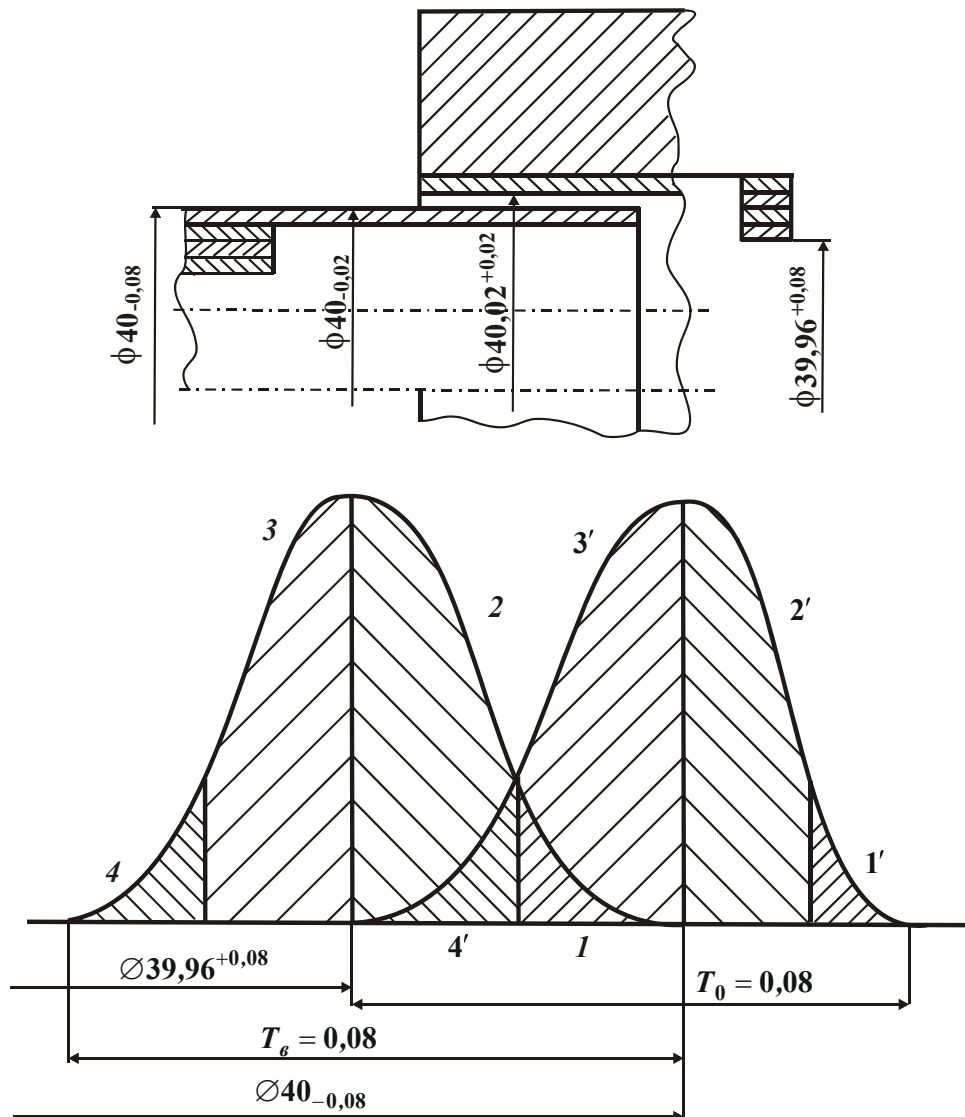


Рис. 5.41. Схема сопряжения вала с втулкой.

Например, допуск на изготовление вала и втулки можно увеличить в 4 раза, т.е.  $TD_\sigma = 4 \cdot 0,02 = 0,08$  мм,  $TD_\sigma = 4 \cdot 0,02 = 0,08$  мм. Сборку выполняют из соответствующих групп деталей, в которых допуск замыкающего звена находится в пределах, указанных в сборочном чертеже, а зазор между сопряженными деталями находится в пределах 0,02...0,06 мм.

#### 5.11.4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ СБОРКИ ПО МЕТОДУ ПРИГОНКИ

Точность замыкающего звена обеспечивается за счет введения в размерную цепь специального элемента жесткого компенсатора.

Составляющие звенья имеют расширенные легко реализуемые в заводских условиях допуски. Требуемая точность замыкающего звена достигается непосредственно при сборке за счет дополнительной об-

работки (пригонки) детали – компенсатора. В качестве компенсатора обычно используют прокладки, кольца или любую из деталей конструкции данного узла с расширенными допусками.

При использовании данного метода расчет размерных цепей сводится к следующему. На все составляющие звенья размерной цепи, включая компенсатор, назначают легко достижимые в производственных условиях допуски:

$$T\Delta' = \sum_{i=1}^n TA_i. \quad (5.54)$$

Полученное значение допуска замыкающего звена  $T\Delta'$  значительно превышает требуемое значение  $T\Delta$ . Разность  $T\Delta'$  и  $T\Delta$  равна погрешности, которую необходимо компенсировать за счет звена – компенсатора:

$$TA_k = T\Delta' - T\Delta. \quad (5.55)$$

Для всех составляющих звеньев, в том числе компенсатора, определяют предельные отклонения размеров и координаты середин полей допусков этих звеньев  $\Delta_{0_i}$ , затем необходимую компенсацию координаты середины поля рассеивания погрешности замыкающего звена

$$\Delta_{0_k} = \pm(\Delta_{0_\Delta} - \Delta'_{0_\Delta}). \quad (5.56)$$

Знак “+” ставят в том случае, если компенсатор находится в ветви размерной цепи увеличивающих звеньев, а знак “–”, если в ветви уменьшающих звеньев.

Предельные отклонения компенсирующего размера:

$$\begin{aligned} \Delta_{B_k} &= \Delta_{0_k} + \frac{TA_k}{2}, \\ \Delta_{H_k} &= \Delta_{0_k} - \frac{TA_k}{2}. \end{aligned} \quad (5.57)$$

Если  $\Delta_{B_k} > 0$ , то принятое значение компенсатора необходимо увеличить на эту величину:

$$T'_k = A_k + \Delta_{B_k}. \quad (5.58)$$

Например,  $A_k = 3$  мм. Согласно расчету получено  $\Delta_{B_k} = +0,7$  мм и  $\Delta_{H_k} = -0,1$  мм. Следовательно, необходимо изготовить размер компенсатора для данного конкретного узла  $A'_k = (3+0,7)_{-0,1} = 3,7_{-0,1}$ .

*Пример.* На рис. 5.42 показан осевой разрез корпуса редуктора. Для нормальной работы подшипников необходимо отрегулировать зазоры в подшипниках.

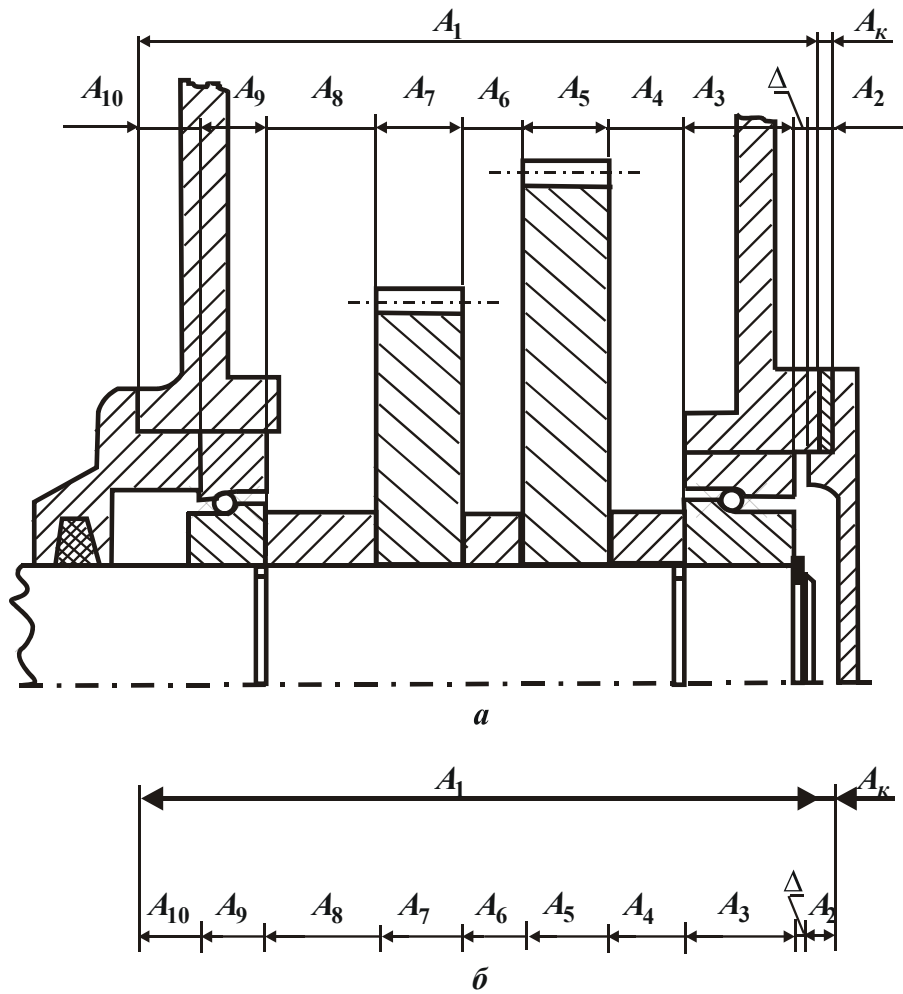


Рис. 5.42. Схемы: а – осевого разреза корпуса редуктора; б – размерной сборочной цепи.

В конструкцию узла введен компенсатор  $A_K$  в виде прокладки. Осевой зазор  $\Delta$  – замыкающее звено размерной цепи. По условиям зазор  $\Delta$  необходимо обеспечить равным  $\Delta = 0_{-0,005}^{-0,01}$  мм. Допуск  $T\Delta = 0,005$  мм. Координата середины поля допуска  $\Delta_{0\Delta} = -0,0075$  мм. Звенья  $A_1$  и  $A_K$  – увеличивающие, а все остальные – уменьшающие.

Принятые номинальные размеры, предельные отклонения и допуски для всех звеньев размерной цепи, мм:  $A_1 = 172 \pm 0,2$ ,  $TA_1 = 0,4$ ,  $\Delta_{0_1} = 0$ ,  $A_K = 3_{-0,1}$ ,  $TA_K = 0,1$ ,  $\Delta_{0_K} = 0,05$ ;

$$A_2 = 15_{-0,4}, \quad TA_2 = 0,4, \quad \Delta_{0_2} = -0,2;$$

$$A_3 = 25_{-0,3}, \quad TA_3 = 0,3, \quad \Delta_{0_3} = -0,15;$$

$$A_4 = 15_{-0,1}, \quad TA_4 = 0,1, \quad \Delta_{0_4} = -0,05;$$

$$A_5 = 25_{-0,1}, \quad TA_5 = 0,1, \quad \Delta_{0_5} = -0,05;$$

$$A_6 = 15_{-0,2}, \quad TA_6 = 0,2, \quad \Delta_{0_6} = -0,1;$$

$$A_7=26_{-0,3}, TA_7=0,3, \Delta_{0_7} = -0,15;$$

$$A_8=15_{-0,1}, TA_8=0,1, \Delta_{0_8} = -0,05;$$

$$A_9=25_{-0,4}, TA_9=0,4, \Delta_{0_9} = -0,2;$$

$$A_{10}=15_{-0,2}, TA_{10}=0,2, \Delta_{0_{10}} = -0,1.$$

Номинальный размер замыкающего звена

$$\Delta=(172+3)-(15+25+15+25+15+15+25+15)=0.$$

Десятизвенная размерная цепь рассчитывается вероятностным методом

$$T\Delta' = \sqrt{\sum_{i=1}^n K_i^2 \cdot (TA_i)^2}, \quad (5.59)$$

где  $K_i = t\lambda_i = 1,2$ ;

$$T\Delta' = 1,2 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,4^2 + 2 \cdot 0,3^2 + 2 \cdot 0,2^2 + 3 \cdot 0,1^2} = 1,05 \text{ мм.}$$

Середина поля допуска замыкающего звена определяется из выражения (5.53)

$$\Delta'_{0_\Delta} = (0+0,05) - (-2 \cdot 0,2 - 2 \cdot 0,15 - 2 \cdot 0,1 - 3 \cdot 0,05) = 1,0 \text{ мм.}$$

Середина поля допуска компенсатора определяется из выражения (5.56)

$$\Delta_{0_\Delta} = (\Delta_{0_\Delta} - \Delta'_{0_\Delta}) = (-0,0075 - 1,0) = -1,0075 \text{ мм.}$$

$$\text{Тогда } \Delta_{B_K} = \Delta_{0_K} + \frac{T\Delta'}{2} = 1,0075 + (1,05/2) = 0,4825 \text{ мм;}$$

$$\Delta_{H_K} = 1,0075 - (1,05/2) = -1,533 \text{ мм.}$$

Из полученных данных следует, что номинальный размер компенсатора  $A_K$  следует увеличить на 0,4825 мм:

$$A'_K = A_K + \Delta_{B_K} = (3+0,483) = 3,483_{-0,1}.$$

### 5.11.5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ СБОРКИ ПО МЕТОДУ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОДВИЖНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ

Точность замыкающего звена в данном случае обеспечивается подвижным компенсатором, в качестве которого используют винтовую пару, клиновое соединение, набор прокладок, зазор в сопряжении типа вал–отверстие. На все звенья размерной цепи назначаются расширенные допуски, а требуемая точность замыкающего звена достигается при сборке за счет перемещения компенсатора на требуе-



мое значение.

При использовании данного метода исключаются повторная сборка и разборка узлов, в которых допуск замыкающего звена выходит за пределы допустимого. Кроме того, требуемая точность замыкающего звена может восстанавливаться в процессе эксплуатации изделия, например, в связи с износом некоторых подвижных элементов узла.

На рис. 5.43,а изображена размерная цепь, содержащая звено-зазор, используемое в качестве компенсатора.

Необходимо обеспечить размер паза направляющих салазок  $A_{\Delta} = 15^{+0,05}$ . Допуски на составляющие размеры  $TA_1 = TA_2 = 0,2$  мм.

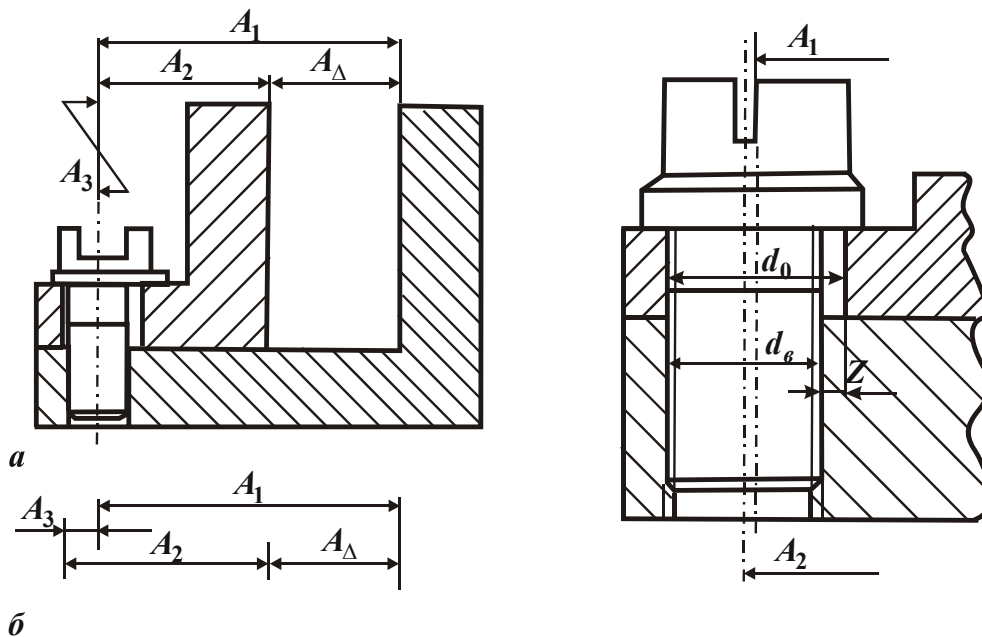


Рис. 5.43. Схемы: а – конструкции компенсирующего звена, б – размерной цепи.

Диаметр стержня винта  $d_6 = 8_{-0,3}^{-0,1}$  мм,  $Td_6 = 0,2$  мм,  $\Delta_6 = -0,2$  мм.

Диаметр отверстия  $d_0 = 8_{+0,1}^{+0,2}$  мм,  $Td_0 = 0,1$  мм,  $\Delta_{ом6} = 0,15$  мм.

Из схемы размерной цепи следует, что размер  $A_1$  – увеличивающее звено, а размер  $A_2$  – уменьшающее. Номинальный размер замыкающего звена  $\Delta = A_1 - A_2 = 30 - 15 = 15$  мм.

Максимальный и минимальный размер радиального зазора между отверстием и центрирующим диаметром болта:

$$Z_{max} = \Delta_Z + \frac{\delta Z}{2}; \quad Z_{min} = \Delta_Z - \frac{\delta Z}{2}, \quad (5.60)$$

где  $\Delta_Z$  – систематическая составляющая погрешности звена-зазора, которая зависит от номинальных размеров охватывающей  $d_0$  и охватываемой  $d_6$  деталей и координат середин полей их допусков  $\Delta_0$  и  $\Delta_6$ ;

$$\Delta_Z = \frac{1}{2} \cdot [(d_o - d_e) + (\Delta_o - \Delta_e)] ; \quad (5.61)$$

$\delta_Z$  – случайная составляющая погрешности звена–зазора, зависящая от допусков охватывающего  $Td_o$  и охватываемого  $Td_e$  размеров деталей;

$$\delta_Z = \frac{1}{2K_{\delta Z}} \cdot \sqrt{K_0^2 Td_0^2 + K_e Td_e^2} . \quad (5.62)$$

Коэффициент 0,5 в выражениях (5.61) и (5.62) указывает на смещение оси отверстия относительно оси вала на половину диаметрального зазора. Коэффициент  $K_0 = K_e = 1,2$ , тогда:

$$K_{\delta Z} = 1 + \frac{0,11 \cdot \sqrt{\xi^2 Td_0^2 + \xi_e^2 Td_e^2}}{(\xi Td_0 + \xi_e Td_e)} . \quad (5.63)$$

*Пример.* На рис. 5.43,б показан узел, в котором в качестве компенсирующего звена используется зазор между отверстием и валом  $Z$ . Допуск на размер замыкающего звена:

$$T'A_{\Delta} = \frac{1,2}{K_{\Delta}} \cdot \sqrt{TA_1^2 + TA_2^2} = \frac{1,2}{1,09} \cdot \sqrt{0,2^2 + 0,2^2} = 0,31 \text{ мм.}$$

Принимая погрешность метода компенсации  $\delta_{mk} = 0,1$  мм, получаем допуск на звено–компенсатор:

$$TA_3 = T'A_{\Delta} - TA_{\Delta} + \delta_{mk} = 0,31 - 0,1 + 0,1 = 0,31 \text{ мм.}$$

Для определения допуска замыкающего звена размерной цепи из выражений (5.61) и (5.62) находят соответственно систематическую и случайную погрешности:

$$\Delta_Z = 0,5 \cdot [0,15 + (0,15 - (-0,2))] = 0,25 \text{ мм;} \\ \delta_Z = \frac{1}{2 \cdot 1,08} \cdot \sqrt{1,2^2 \cdot (1,1^2 + 0,2^2)} = 0,125 \text{ мм.}$$

Минимальное значение радиального зазора между отверстием и валом:

$$Z_{min} = \Delta_Z - \frac{\delta_Z}{2} = 0,25 - \frac{0,125}{2} = 0,187 .$$

Минимальный зазор между отверстием и валом больше половины допуска на компенсирующее звено:

$$Z_{min} > \frac{TA_3}{2} .$$

Следовательно, зазор  $Z_{min}$  с избытком компенсирует погрешность замыкающего звена.

# **ЧАСТЬ 3**

## **ПРИМЕРЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ИНСТРУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ (АНАЛИТИЧЕСКИХ) ПОДХОДОВ**

---

### **ГЛАВА 1**

#### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ШЛИФОВАНИЯ КРУГАМИ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

##### **1.1. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ КРУГАМИ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Широкое освоение промышленностью производства синтетических алмазов и других сверхтвердых материалов стало одним из основных факторов ускорения научно-технического прогресса в машиностроении. В настоящее время невозможно представить развитие какой-либо отрасли без применения инструментов из синтетических сверхтвердых материалов. Благодаря своим непревзойденным физико-механическим и режущим характеристикам абразивные инструменты из синтетических сверхтвердых материалов (СТМ) успешно используются при обработке разнообразных материалов, начиная с пластичной меди и заканчивая самым прочным из встречающихся в природе материалов – алмазом, обработка которого обычным абразивным инструментом весьма затруднена [1, 69, 301, 332]. Особенно эффективно применение инструментов из СТМ при шлифовании таких труднообрабатываемых материалов, как твердые сплавы и высокопрочные стали, износостойкие наплавки и различные жаропрочные, конструкционные материалы, которые широко используются в инструментальном производстве и горнорудной промышленности, металлургии и других отраслях [101, 103, 105, 107, 136, 210, 327, 328, 357].

Традиционно основным потребителем шлифовальных кругов из СТМ в металлообработке является инструментальное производство,

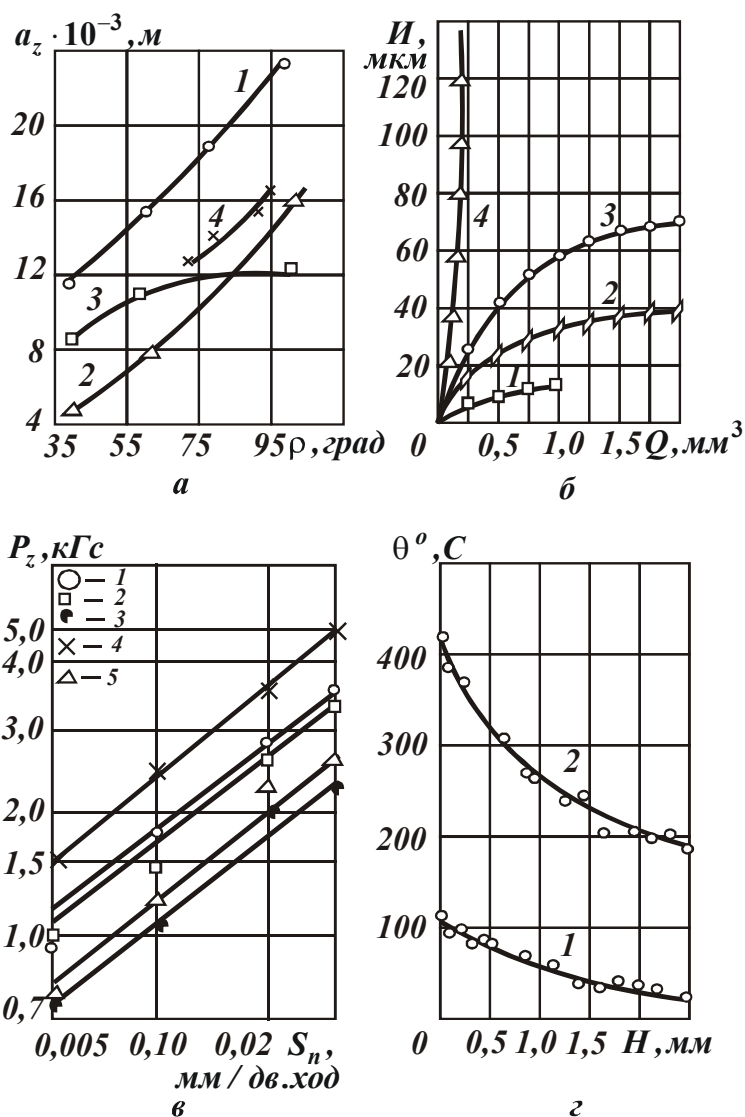


Рис. 1.1. Основные зависимости процесса шлифования, установленные различными авторами: а – зависимость предельных толщин среза от угла заострения для следующих пар абразивного и обрабатываемого материалов [78]: 1 – минералокерамика ЦМ 322 – сталь 40; 2 – минералокерамика ЦМ 322 – ХН77Т10Р; 3 – электрокорунд – сталь 40; 4 – алмаз – ХН77Т10Р; б – размерный износ кругов из различных материалов [148]: 1 – природный алмаз; 2 – синтетический монокристалл; 3 – синтетический алмаз марки АС4; 4 – карбид кремния зеленый; в – влияние марки алмаза на силу резания [135]: 1 – АС2; 2 – АС4; 3 – АС15; 4 – Э9А; 5 – СМ1К; г – изменение температуры резания в зависимости от глубины залегания термопары [132]: 1 – круг из синтетического алмаза; 2 – круг из карбида кремния зеленого.

требующее высококачественной обработки твердосплавных, быстрорежущих и алмазных однолезвийных и многолезвийных инструментов на операциях круглого наружного и внутреннего, плоского шлифования, а также на операциях заточки инструментов.

Исследованиями многих авторов [54, 69, 101, 348, 353] установлена четкая взаимосвязь работоспособности лезвийных режущих инструментов с методами их обработки на операциях заточки и шлифования. Применение обычных абразивных кругов, как правило, не обеспечивает требуемого качества изготовления таких инструментов. Возникающие в процессе шлифования на обрабатываемых поверхностях различные дефекты (прижоги, микросколы, трещины и т.д.) не всегда удается исправить последующей чистовой алмазной или эльборовой обработкой, что приводит к значитель-

ному браку инструмента и снижению его работоспособности при эксплуатации [105, 112, 136, 348, 350, 445].

Указанных недостатков лишена обработка алмазными кругами или кругами из других СТМ. Замена на операциях шлифования абразивных кругов на алмазные или эльборовые позволяет до 1,5-2-х раз увеличить работоспособность инструмента, устранить брак по трещинам, сколам и выкрашиваниям режущих кромок, прижогам и другим структурным дефектам, присущим традиционным, пока еще широко применяемым на практике методам абразивной обработки. Такая эффективность обработки инструментов кругами из СТМ достигается за счет значительного снижения сил и температуры резания, повышения стойкости и надежности работы круга, рис. 1.1. Вместе с тем, несмотря на отмеченные преимущества, круги из СТМ эффективно применимы в основном при чистовом шлифовании и доводке, т.е. при съеме относительно небольших припусков. Использование кругов из СТМ в условиях предварительного шлифования, как правило, экономически нецелесообразно. Это обусловлено тем, что в современной металлообрабатывающей промышленности достигнут весьма высокий уровень производительности абразивного шлифования. Абразивный круг, работая в режиме интенсивного износа и самозатачивания, особенно на

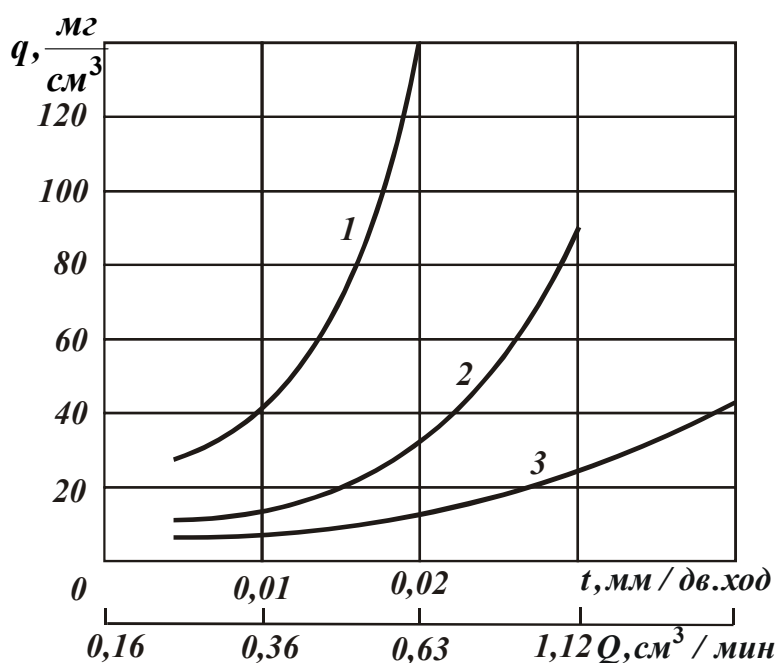


Рис. 1.2. Удельный расход кубонита КР (1), алмаза АС6 (2) и АС15 (3) при круглом наружном шлифовании кругами на металлической связке МО16 [42]. Условия обработки:  $V_{кр} = 26$  м/с;  $S_{np} = 1$  м/мин;  $V_u = 20$  м/мин.

операциях круглого наружного и плоского шлифования, позволяет реализовать производительность обработки в 2-10 раз и более превышающую соответствующую производительность шлифования кругами из СТМ. Такое соотношение интенсивностей съема материала получено из условия одинаковой себестоимости обработки. При ужесточении режимов алмазного шлифования наблюдается интенсивный рост износа круга, и ведение

процесса в таких условиях становится неэффективным, рис. 1.2 [105].

Проведенный анализ операций круглого наружного шлифования многолезвийных инструментов на ряде специализированных инструментальных заводов подтвердил высокий уровень производительности абразивной обработки по сравнению с производительностью алмазной обработки, табл. 1.1 и табл. 1.2.

Таблица 1.1

Данные технологических операций круглого наружного абразивного шлифования многолезвийных инструментов

Предприятие	Обрабатываемый инструмент	Режим шлифования			Фактическая производительность, мм <sup>3</sup> /мин	Расчетная производительность, мм <sup>3</sup> /мин
		$V_{заг}$ , м/мин	$V_{кр}$ , м/с	$t$ , мм/дв.ход		
1. Белгородский завод фрез	твердосплавные трехсторонние дисковые фрезы Ø 160-315 мм	30-60	30	0,01	2270-10000	7500-14830
2. Запорожский инструментальный завод	твердосплавные дисковые фрезы Ø 125-200 мм	50	8	0,01	5700-14500	15000-24000
3. Сестрорецкий инструментальный завод им. Воскова	зенкер насадной цельный из быстрорежущей стали Ø 32-52 мм	23 38	1- 1,5	0,04	490-1230	1920-4650

Аналогичные соотношения интенсивностей съема материала в пользу абразивной обработки вытекают из нормативно-справочной литературы по рекомендуемым режимам многопроходного шлифования, табл. 1.3, табл. 1.4.

Еще более высокая производительность абразивного шлифования достигнута при обработке горного инструмента [107, 210, 331]. Так, на Дрогобычском долотном заводе при круглом врезном наружном шлифовании заборной части шарошек с релитовыми наплавками производительность равна  $3 \cdot 10^5$  мм<sup>3</sup>/мин. Процесс протекает в условиях интенсивного износа круга – для обработки 100 шарошек расходуется до 6 абразивных кругов диаметром 600 мм при съеме припуска до 2 мм на сторону. Удельный объемный износ круга при этом со-

ставляет выше  $30 \text{ мм}^3$  на  $1 \text{ мм}^3$  снимаемого материала, что по данным работы [136] соответствует режиму интенсивного самозатачивания круга, не требующему правки.

Таблица 1.2

Режимы шлифования многолезвийных инструментов алмазными и эльборовыми кругами

Авторы	Обрабатываемый инструмент, характеристики круга	Режимы шлифования				Расчетная производительность, $\text{мм}^3/\text{мин}$
		$V_{кр}$ , м/с	$V_{заг}$ , м/мин	$S_{пр}$ , м/мин	$t$ , мм/дв. ход	
И.П. Захаренко [109]	твердосплавная развертка (BK8), круг алмазный металлическая связка	40	36	0,5	0,0125	1500
К.И.Шелковый, Б.С. Серов	быстрорежущая развертка (P18), круг эльборовый органическая связка	30	30	0,5	0,004	480
В.С. Лысанов [218]	фреза (P10K5Ф5), круг эльборовый керамическая связка	32	10-24	0,7-0,6	0,015	1750
С.А.Попов, Н.П. Малевский, Л.М.Терещенко [301]	твердосплавный инструмент, круг алмазный металлическая связка	25-30	10-30	0,5-1,5	0,01 (дв.ход)	600-1800

Таблица 1.3

Режимы резания при круглом алмазном наружном шлифовании рабочей части твердосплавного инструмента [1]

Вид операции	Связка круга	$V_{кр}$ , м/с	$V_{заг}$ , м/мин	$S_{пр}$ , м/мин	$t$ , мм/дв. ход
1. Предварительное шлифование	металлическая	20-25	30-40	1,0-1,5	0,02-0,05
2. Окончательное шлифование	органическая	25-30	20-40	0,5-1,0	0,0025-0,005

Таблица 1.4

Режимы резания и характеристики абразивного круга для круглого наружного шлифования твердосплавных многолезвийных инструментов [136]

Обрабатываемый материал	Характеристики круга			Режимы шлифования			
	зернистость	связка	твердость	$V_{кр}$ , м/с	$V_{заг}$ , м/мин	$S_{пр}$ , м/мин	$t$ , мм/дв.ход
T30K4	25-	K	M3	12			0,02
BK2, T15K6	40		CM1	15			
BK8					25	3-5	0,03
T5K10			C1	20			0,05

Обрабатываемая заготовка, по сути, выполняет роль правящего инструмента, в момент удара глубоко внедряется в рабочую поверхность круга и вызывает интенсивное разрушение связки и абразивных зерен. Этим, в частности объясняется тот факт, что алмазная и эльборовая обработка в инструментальном производстве, вследствие экономически неприемлемого износа круга, ограничивается в основном операциями заточки. Наиболее массовые операции круглого наружного шлифования твердосплавных и многолезвийных инструментов, объем которых в инструментальном производстве составляет 35%, за отдельными исключениями чистового шлифования и доводки выполняется по-прежнему с применением обычных абразивных кругов, вызывающих глубокие структурные превращения в поверхностном слое, с низким качеством обработки.

Попытки шлифования кругом из СТМ при тех же режимах резания приводят к весьма интенсивному износу последнего. Причем, установлено, что основным видом износа круга из СТМ, как правило, является механический, обусловленный разрушением связки и выпадением из нее малоизношенных зерен от действия чрезмерных нагрузок со стороны обрабатываемой заготовки. Такая закономерность установлена как для кругов из СТМ на органической и керамической связках, так и для кругов на металлических связках, оснащенных металлизированными алмазными зернами марок АС6, АС15, АС32 и т.д. Естественно, применение указанных высокопрочных алмазов позволяет снизить износ круга и соответственно повысить режимы шлифования, однако добиться существенного снижения себестоимости обработки в силу высокой стоимости алмазов довольно сложно. В особой мере это проявляется при шлифовании кругами на высокопрочных металлических связках, которые, работая в режиме затупления, быстро засаливаются, теряют режущую способность и требуют интенсивной периодической или непрерывной правки, что сопровождается, как правило, повышенным износом круга.

В связи с этим важное и актуальное значение приобретает решение проблемы обоснования и реализации новых технологических возможностей шлифования кругами из СТМ, обеспечивающих существенное повышение производительности обработки при экономически приемлемом расходе СТМ и высоком качестве обработки.

Необходимо отметить, что за последние годы достигнуты определенные успехи в решении данной проблемы. Разработаны эффективные процессы глубинного, скоростного, прерывистого шлифова-



ния кругами из СТМ, а также гамма высокопроизводительных процессов шлифования кругами из СТМ на металлических связках с введением в зону резания или автономно дополнительной электрической энергии, позволивших повысить производительность и качество обработки. Среди разработанных процессов следует особо выделить процессы глубинного шлифования кругами из СТМ, получившие в последние годы достаточно широкое развитие [45, 103, 301, 337, 412]. По данным работ сотрудников ИСМ НАН Украины [103, 333, 338, 357], применение алмазного глубинного шлифования по сравнению с обычным многопроходным позволяет значительно повысить производительность шлифования. Наблюдаемый эффект, как показано в работах [125, 307, 308], достигается в основном благодаря снижению толщины срезов и нагрузки, действующей на отдельные зерна круга, табл. 1.5, табл. 1.6.

Таблица 1.5

Расчетные значения максимальной толщины среза при глубинном шлифовании (исходные данные:  $V_{кр}=35$  м/с;  $D_{кр}=300$  мм;  $d_{заг}=80$  мм)

$V_{заг} \cdot t$	0,035	0,07	0,105	0,06	0,12	0,18	0,105	0,19	0,285
$V_{заг}$ , м/мин		0,07			0,12			0,19	
$t$ , мм	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
$h_{max}$ , мкм	0,05	0,07	0,1	0,07	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3

Таблица 1.6

Расчетные значения максимальной толщины среза при многопроходном шлифовании (исходные данные:  $V_{кр}=35$  м/с;  $D_{кр}=300$  мм;  $d_{заг}=80$  мм)

$V_{заг} \cdot t$	0,07	0,105	0,12	0,18	0,285
$V_{заг}$ , м/мин	20	20	30	30	20
$t$ , мм	0,0035	0,0035	0,004	0,006	0,014
$h_{max}$ , мкм	3,5	5,3	4,0	6,0	14,0

Наиболее эффективно применение схемы глубинного шлифования при заточке, круглом наружном и внутреннем шлифовании твердосплавных и быстрорежущих инструментов [101, 103, 107, 112]. Разработанные в ИСМ НАН Украины процессы глубинного шлифования осуществляются стандартными кругами формы 1А1 на металлических связках с металлизированными алмазами марок АС6, АС15 и АС32 зернистостью 125/100 – 160/125 100% с режимами резания (при круглом шлифовании):  $V_{кр}=30-40$  м/с;  $V_{заг}=20-30$  м/мин;  $S_{пр}=0,03-0,05$  м/мин;  $t=0,1-0,6$  мм;  $S_{\delta}=0,01-0,1$ . Высокая режущая

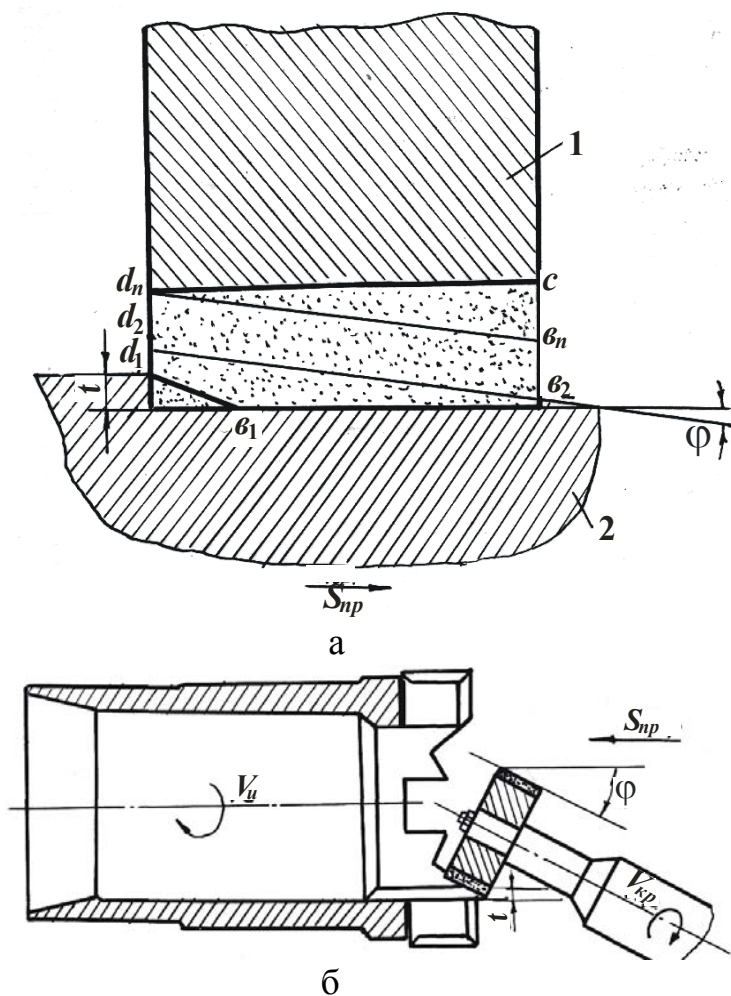


Рис. 1.3. Износ алмазосносного слоя круга 1А1 (а) и схема алмазного глубинного круглого внутреннего шлифования с разворотом круга (б) [43]: 1 – круг; 2 – заготовка.

способность круга при этом поддерживается путем введения в зону резания или автономно дополнительной энергии в виде электрических разрядов (алмазно-искровое шлифование) или электрохимических процессов [32, 69, 74, 101]. Этим обеспечивается непрерывное разрушение (стравливание) верхних слоев связки, вскрытие зерен круга и поддержание на его рабочей поверхности стабильного режущего рельефа. Для равномерного износа круга вдоль образующей ось круга поворачивают относительно направления продольной подачи на определенный угол, рис. 1.3.

Приведенные в табл. 1.7 результаты показывают, что при одинаковой расчетной производительности обработки применение схемы глубинного алмазного шлифования твердосплавных буровых коронок позволяет в два раза снизить относительный расход алмаза [312].

Таблица 1.7

Зависимость относительного расхода алмаза от способа шлифования (круг 1А1 300x16x203 АС4 125/100 МО4-10%, диаметр заготовки – 100 мм) [312]

Способ шлифования	$V_{кр}$ , м/с	$V_{заг}$ , м/мин	$S_{np}$ , м/мин	$t$ , мм	Расчетная производительность, мм <sup>3</sup> /мин	Относительный расход алмаза, мг/г
1. Многопроходное шлифование (дв.ход)	35	22	1	0,02	3140	26,44
2. Глубинное шлифование (ход)	35	22	0,033	0,4	4145	13,15

При глубинном шлифовании кругом чашечной формы, глубинном охватывающем, прерывистом или скоростном шлифовании возможно еще более значительное снижение относительного расхода алмаза [106, 108, 110, 433]. При этом важным параметром, определяющим износостойкость алмазного круга, следует рассматривать скорость заготовки, рис. 1.4 [357]. С ее уменьшением при сохранении постоянной производительности обработки относительный расход алмаза непрерывно снижается, что является важным резервом интенсификации шлифования.

В работах [16, 20] рекомендуется выполнять глубинное шлифование с относительно небольшой скоростью заготовки  $V_{заг}=0,1-0,5$

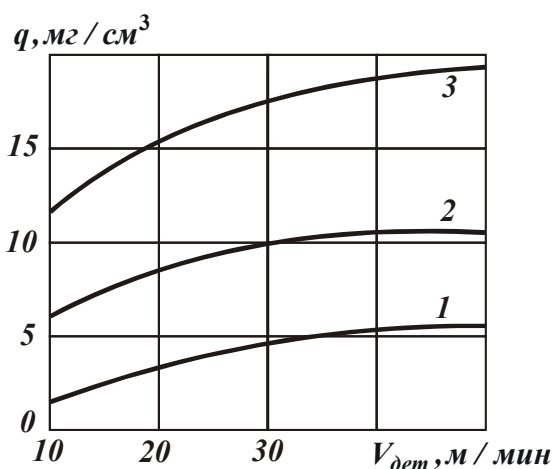


Рис. 1.4. Влияние скорости вращения заготовки на относительный расход алмаза при различных значениях  $S_{non}$  [16]: 1 -  $S_{non}=0,03$  мм/дв.ход; 2 -  $S_{non}=0,02$  мм/дв.ход; 3 -  $S_{non}=0,01$  мм/дв.ход.

м/мин. В этом случае достигается высокое качество обработки, однако производительность шлифования резко уменьшается.

Таким образом, проведенный анализ показал, что наиболее полно режущие возможности круга из СТМ можно использовать при глубинном шлифовании, позволяющем интенсифицировать процесс обработки. Вместе с тем, судя по рекомендуемым режимам резания, и, соответственно, производительности обработки, приведенным в табл. 1.8, прогрессивные схемы

глубинного алмазного шлифования еще недостаточно конкурентно-способны с высокопроизводительным абразивным шлифованием. Производительность глубинного алмазного шлифования лишь в 1,5 раза превышает производительность обычного алмазного многопроходного шлифования (табл. 1.8), тогда как по установленным данным переход на полную обработку кругами из СТМ возможен при условии повышения производительности шлифования в 2-10 раз.

Таким образом, показано, что существующие процессы шлифования кругами из СТМ (включая глубинное и многопроходное шлифование) не могут быть эффективно использованы при съеме значительных припусков вследствие относительно низкой производительности обработки. Переход на полную обработку кругами из СТМ

возможен при условии существенного повышения производительности шлифования.

Таблица 1.8

Рекомендации по выбору режимов обработки инструментов из твердого сплава и быстрорежущей стали кругами из СТМ [107]

Вид обработки	$V_{кр}$ , м/с	$V_u$ , м/мин	$S_{non}$ , мм/дв.ход	$S_{np}$ , м/мин	$t$ , мм
Обработка твердосплавного инструмента алмазными кругами на металлических связках					
Круглое шлифование:					
наружное многопроходное	35-40		0,01-0,05	1-2	-
наружное глубинное	30-40	20-30	-	0,03-0,05	0,5-1,0
внутреннее глубинное	20-30		-	0,03-0,05	0,5-1,0
Обработка инструмента из быстрорежущей стали кругами из эльбора на органической связке (КБ, Б1, Б156, БИ1) 100%-й концентрации					
Круглое наружное шлифование	30-40	10-25	-	0,5-1,0	0,02-0,1
Обработка инструмента из быстрорежущей стали кругами из эльбора на керамической связке С10 100%-й концентрации					
Круглое наружное шлифование	30-50	20-30	-	0,5-1,5	0,01-0,05

Для анализа условий повышения производительности обработки  $Q$  рассмотрим известную зависимость  $Q = V_{кр} \cdot S_{мгн}$ , где  $V_{кр}$  - скорость круга, м/с;  $S_{мгн} = n_p \cdot S$  - мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами, м<sup>2</sup>;  $n_p$  - количество одновременно работающих зерен;  $S$  - площадь поперечного сечения среза отдельным зерном, м<sup>2</sup>. Параметр  $S$  представим в виде  $S = P / \sigma$ , где  $P$  - нагрузка, действующая на отдельное зерно, Н;  $\sigma$  - условное напряжение резания, МПа. Параметр  $\sigma$  в общем виде является функцией  $\sigma = f(a_z / \rho, A)$ , где  $a_z$  - толщина среза, м;  $\rho = \varphi(x)$  - радиус округления режущей части зерна, м;  $x$  - величина линейного износа зерна, м;  $A$  - параметр, характеризующий прочностные свойства обрабатываемого материала. Тогда производительность обработки функционально выразится:

$$Q = \psi(V_{кр}, n_p, a_z, x, P, A).$$

Как видим, производительность обработки в общем случае зависит от шести параметров. Добиться увеличения производительности обработки  $Q$  можно за счет регулирования кинематическими пара-

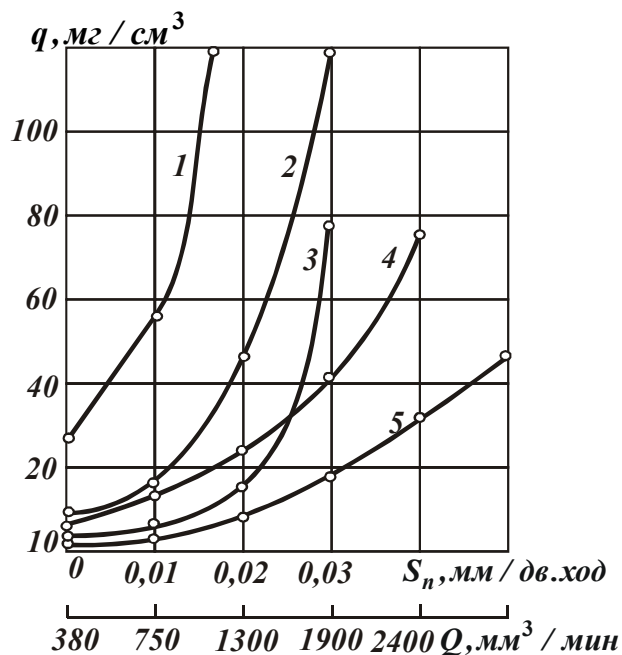


Рис. 1.5. Зависимость удельного расхода алмазов различных марок от производительности при круглом шлифовании стали ШХ15 [16]: 1 – АС2; 2 – АС4; 3 – АС6; 4 – АС32; 5 – АС15.

работки на основе применения оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ, полученных с учетом физических параметров  $x$  и  $P$ . Правильность сделанного вывода подтверждается результатами экспериментальных исследований сотрудников Института сверхтвёрдых материалов НАН Украины [103, 105, 242, 327, 337, 357], сущность которых состоит в следующем. Установлено, что при высоко-

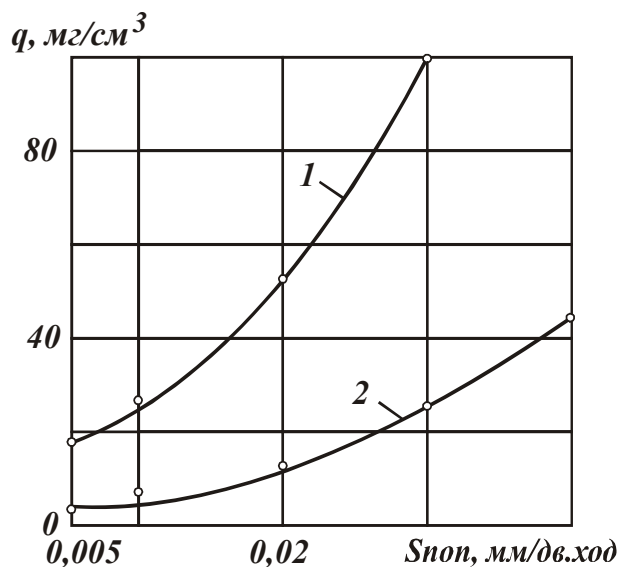


Рис. 1.6. Влияние связки на удельный расход алмазов марки АС15 при обработке стали P12ФМ5 [135]: 1 – Б4; 2 – МО4.

производительном круглом наружном и плоском шлифовании периферией круга из СТМ преобладающим фактором в износе круга является механический, обуславливающий образование сколов на зернах, их объемное разрушение и преждевременное выпадение из связки без разрушения. Это свидетельствует об определяющей роли в износе круга и формировании основных физических и технологических параметров шлифова-

Исходя из этого, можно сделать вывод о существовании значительных резервов повышения производительности обра-

метрами  $V_{кр}$ ,  $n_p$ ,  $a_z$  и физическими параметрами  $x$  и  $P$ . В теории шлифования известны условия повышения  $Q$  путем регулирования кинематическими параметрами  $V_{кр}$ ,  $n_p$ ,  $a_z$ . Технологические возможности повышения  $Q$  за счет регулирования параметрами  $x$  и  $P$  не обоснованы, что свидетельствует о недоиспользовании режущих свойств круга из СТМ при шлифовании.

ния величины нагрузки, действующей на отдельное зерно  $P$ , и целесообразности управления этой величиной в процессе шлифования. Установлено также [69, 101, 337, 348, 349, 357], что с увеличением поперечной подачи (производительности обработки) удельный расход алмаза  $q$  непрерывно растет, причем, для менее прочных алмазов АС2 значительно интенсивнее, чем для высокопрочных алмазов АС15, рис. 1.5. Применение алмазных кругов на высокопрочных металлических связках позволяет снизить удельный расход алмаза по сравнению с кругами на менее прочных органических связках, рис. 1.6.

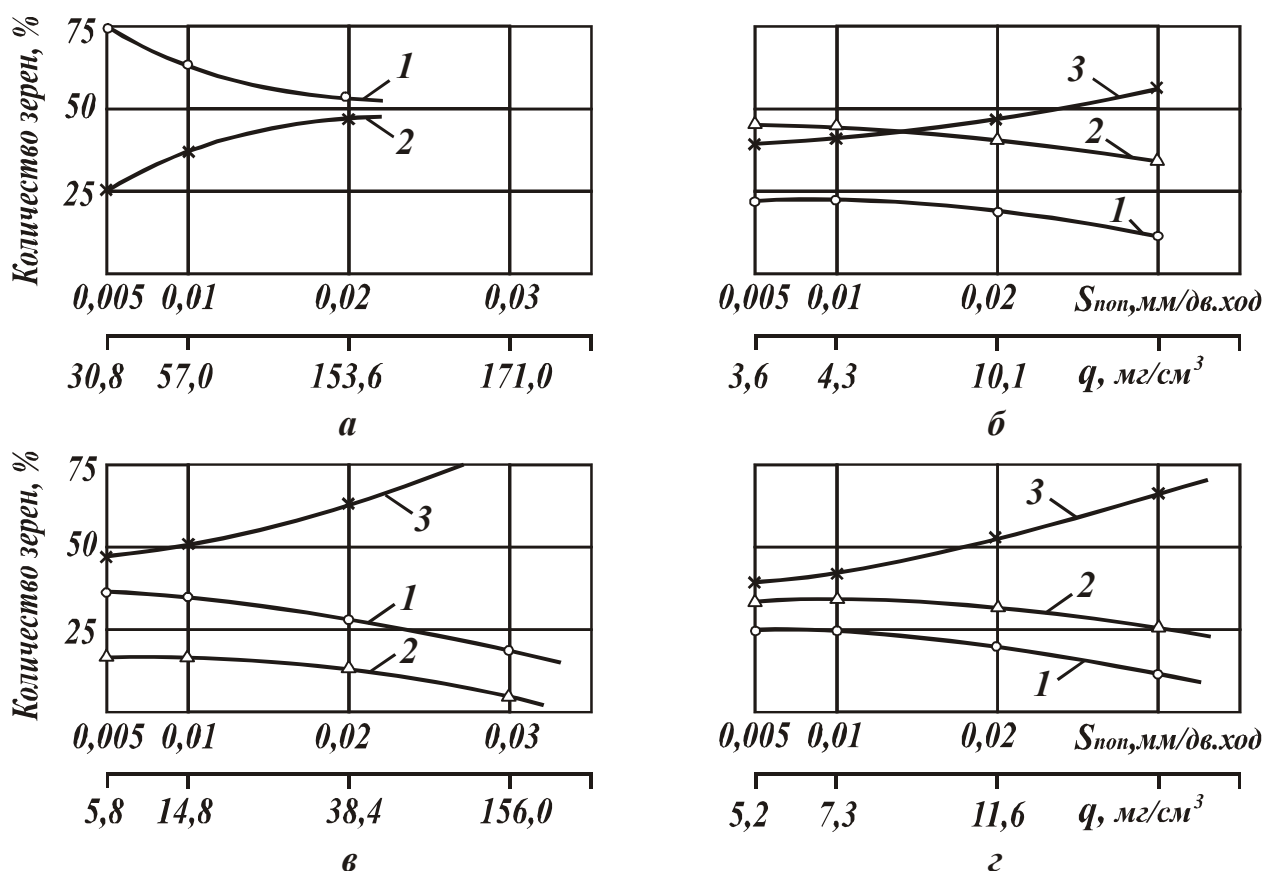


Рис. 1.7. Характер износа кругов из различных марок алмазов и кубонита [357]: а – алмаз АС2 по стали ШХ15; б – алмаз АС15 по стали ШХ15; в – кубонит КР по стали ШХ15; г – алмаз АС15 по стали Р12ФМ5; 1 – зерна со сколами, 2 – зерна с площадками износа, 3 – выпавшие зерна.

Проведенные экспериментальные исследования геометрических параметров выпавших из круга алмазных зерен (рис. 1.7) показали, что с увеличением поперечной подачи количество зерен с площадками износа и со сколами снижается, а количество выпавших из связки круга зерен без заметного изменения формы и размеров – увеличивается. Такая закономерность прослеживается для всех рассматриваемых

мых пар “абразив - обрабатываемый материал”. Для кругов из малопрочного кубонита характерен незначительный процент зерен с площадками износа. Для кругов из прочных алмазов марки АС15 этот процент выше, а для малопрочных алмазов марки АС2 – практически равен нулю. Это указывает на то, что алмазные зерна АС2 разрушаются и выпадают из связки практически не претерпев линейного износа. Меньшему линейному износу зерен АС2 соответствует чрезвычайно высокий удельный расход алмаза, достигающий значений  $153 \text{ мг/см}^3$ , тогда как при тех же условиях обработки кругом с алмазами АС15 удельный расход алмаза на порядок меньше, рис. 1.7. Из этого вытекает четкая корреляция между процентом зерен с площадками износа и удельным расходом алмаза. Наименьший удельный расход алмаза достигается при шлифовании кругом из АС15, затем в порядке возрастания для АС6, АС4 и АС2.

Для иллюстрации сделанного вывода рассмотрим следующую зависимость  $P = \sigma \cdot S$ . Вполне очевидно, что с ростом поперечной подачи увеличивается параметр  $S$  и предельное значение  $P$  (из условий прочности зерна), следуя приведенной зависимости, будет достигаться при меньших значениях  $\sigma$ . Физически это возможно при резании более острым зерном, т.е. когда величина линейного износа зерна  $x$  меньше. При фиксированном значении  $S$  (при заданной поперечной подаче) меньшее предельное значение  $P$  (для алмазов марки АС2) будет достигаться также при меньшем значении  $\sigma$ , что возможно при резании более острым зерном, т.е. когда величина линейного износа зерна  $x$  меньше. Этим установлено, что при постоянном предельном значении  $P$  переменной величиной в процессе шлифования является  $x$ , которая и приводит к изменению удельного расхода алмаза. В работе [357] показано, что обработка более прочной стали Р12Ф5М (по сравнению со сталью ШХ15) характеризуется меньшим процентом зерен с площадками износа и большим удельным расходом алмаза, т.е. разрушение и выпадение из связки зерен при обработке стали Р12Ф5М происходит при меньшем их линейном износе, т.е. меньшем значении величины  $x$ . В работе [357] отмечается, что при шлифовании алмазными кругами на органических связках на зернах образуются меньшие по размерам площадки износа, чем при шлифовании алмазными кругами на металлических связках. Меньшим площадкам износа соответствует больший удельный расход алмаза.

Таким образом показано, что удельный расход алмаза и параметр шероховатости  $R_a$  хорошо коррелируется с величиной линейно-



го износа зерна  $x$ , соответствующей моменту его объемного разрушения или выпадения из связки без разрушения (в зависимости от механизма износа круга). Из проведенного анализа можно сделать вывод, что, изменяя величину  $x$  в процессе шлифования (также как и величину  $P$ ), применяя для этого соответствующие оптимальные режимы шлифования кругами из СТМ, появляется возможность в полной мере использовать режущие свойства круга и увеличить производительность обработки.

Необходимо отметить, что реализация предложенного подхода стала возможной благодаря созданию комбинированного шлифования кругами из СТМ, основанного на введении в зону резания или автономно к кругу дополнительной электрической энергии (в форме электрических разрядов), позволяющего эффективно управлять параметрами режущего рельефа круга и, следовательно, регулировать в процессе шлифования физическими параметрами  $x$  и  $P$ .

## **1.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ КРУГАМИ ИЗ СТМ**

Проведенный в предыдущем параграфе анализ опубликованных работ показал, что существующие процессы шлифования кругами из СТМ (включая многопроходное и глубинное шлифование) не могут быть эффективно использованы при съеме значительных припусков вследствие относительно низкой производительности обработки. Установлено, что основным фактором, сдерживающим повышение производительности обработки, является высокий уровень износа круга из СТМ, обусловленный преждевременным объемным разрушением и выпадением из связки круга практически неизношенных зерен от действия чрезмерных механических нагрузок. Об этом свидетельствуют многочисленные экспериментальные данные, полученные в Институте сверхтвердых материалов НАН Украины, Харьковском политехническом институте, Одесском политехническом институте и т.д. Согласно этим данным, с увеличением производительности обработки число зерен с площадками износа значительно уменьшается (т.е. уменьшается параметр  $x$ ), а число выпавших из связки круга малоизношенных зерен – резко увеличивается, достигая значений 70...80%, что приводит к весьма интенсивному увеличению удельного расхода алмаза. Противоположное влияние параметра  $x$  на производительность обработки и удельный расход алмаза указывает на существова-



ние экстремального (оптимального) значения этого параметра, определяющего максимально возможную производительность обработки при экономически приемлемом расходе алмазов. При этом уровень максимально возможной производительности обработки зависит от параметра  $P$ , определяемого прочностью зерен и связки круга. С увеличением  $P$  производительность обработки увеличивается.

Таким образом показано, что добиться повышения производительности обработки можно за счет применения оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ, полученных с учетом оптимальных значений физических параметров  $x$  и  $P$ , которые в свою очередь должны быть установлены с учетом прочностных свойств рабочей поверхности круга и технических ограничений обработки: экономически приемлемым износом круга из СТМ или минимальной себестоимости обработки, параметрами качества и точности обрабатываемых поверхностей.

На основе указанного, первая теоретическая предпосылка может быть сформулирована так: *выбор оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ должен производиться с учетом оптимальных значений величины линейного износа зерна до момента его объемного разрушения или выпадения из связки круга и величины нагрузки, действующей на отдельное зерно.*

Для реализации на практике установленных таким образом оптимальных режимов шлифования кругами из СТМ оптимальные значения параметров  $x$  и  $P$  должны в процессе шлифования поддерживаться постоянными. Для этого могут быть использованы условия работы круга в режиме самозатачивания. Однако реализовать режим самозатачивания для кругов из СТМ на высокопрочных металлических связках весьма сложно, т.к. они интенсивно засаливаются и быстро теряют режущую способность. С созданием прогрессивных методов комбинированного шлифования кругами из СТМ, основанных на введении в зону резания или автономно к кругу дополнительной электрической энергии, возможности повышения режущей способности круга значительно расширились. Эффективное электроэрозионное или электрохимическое воздействие на рабочую поверхность круга позволяет вскрыть алмазные зерна на значительную высоту, полностью исключает засаливание круга и обеспечивает управление режущим рельефом круга. Это создает объективные предпосылки для эффективного регулирования в процессе шлифования оптимальными значениями параметров  $x$  и  $P$ , независимо от прочностных свойств

металлической связки, что является необходимым условием применения на практике оптимальных режимов шлифования, в максимальной степени реализующих высокие режущие свойства кругов из СТМ.

С учетом сказанного вторая теоретическая предпосылка может быть сформулирована следующим образом: *оптимальные значения величины линейного износа зерна до момента его объемного разрушения или выпадения из связки и величины нагрузки, действующей на отдельное зерно, в процессе шлифования должны поддерживаться постоянными за счет дополнительного электрофизикохимического воздействия на рабочую поверхность круга или осуществление работы круга в режиме самозатачивания, реализуя таким образом оптимальные режимы шлифования.*

Таким образом, первая и вторая теоретические предпосылки определяют условия достижения максимально возможной производительности обработки и реализующих ее режимов шлифования, однако не определяют методику их расчета. Поэтому, последующие теоретические предпосылки будут направлены на решение этой задачи, для чего необходимо провести анализ основных теоретических подходов к расчету физических и технологических параметров процесса шлифования.

Длительное время в теории шлифования преобладал макроскопический подход к расчету основных параметров обработки, рассматривавший зону резания в виде “пятна” контакта круга с заготовкой, в пределах которого режущие зерна в одинаковой степени участвуют в съеме материала. Родоначальником такого подхода по праву является проф. Маслов Е.Н., который в своих работах [223, 225-227] впервые в системном виде предложил расчетные зависимости для определения средней толщины среза отдельным зерном, количество одновременно работающих зерен, длины среза и других параметров для различных кинематических схем шлифования. Несмотря на весьма упрощенный подход к расчету параметров шлифования и значительное расхождение экспериментальных и расчетных данных, предложенные проф. Масловым Е.Н. расчетные зависимости не утратили своей значимости и в настоящее время, широко используются для анализа и оптимизации процесса шлифования.

Расчет отдельных параметров шлифования на макроскопическом уровне выполнен также в работах [125, 215, 242, 307, 308, 321]. Однако предложенные зависимости не обеспечивают требуемой точ-

ности расчетов параметров.

Дальнейшим развитием макроскопического подхода в теории шлифования стали работы проф. Лурье Г.Б., Филимонова Л.Н., Островского В.И. и других ученых [215, 283, 284, 285, 286, 415, 413, 416, 417], которые уточнили расчетные зависимости, полученные проф. Масловым Е.Н. Благодаря сделанным уточнениям в расчетные зависимости вошли новые параметры, такие как радиус округления режущей кромки зерна, количество зерен, расположенных на единице площади рабочей поверхности круга и т.д. Это позволило приблизить расчетные схемы шлифования к реальным условиям обработки.

В 60...70-тые годы в теории шлифования начал формироваться микроскопический подход к расчету основных параметров шлифования. Сущность такого подхода сводится к аналитическому установлению параметров шлифования на основе статистико-вероятностных законов расположения зерен на рабочей поверхности круга. Значительные успехи в этом направлении достигнуты в работах проф. Евсеева Д.Г., Королева А.В., Корчака С.Н., Новоселова Ю.К., Резникова А.Н., Сальникова А.Н. [96, 97, 151, 152, 153, 156, 158, 159, 160, 161, 167, 262, 263, 264, 266, 267, 320, 321]. Благодаря этим работам в настоящее время установлены аналитические зависимости для расчета основных параметров шлифования, включая среднюю толщину среза, шероховатость обрабатываемых поверхностей, силу и температуру резания и т.д. Однако расчетные зависимости установлены для обычного абразивного шлифования, и направлены, прежде всего, на решение проблемы качества обработки (прогнозирование параметров шероховатости, точности обработки и т.д.). Проблема повышения производительности обработки и снижения износа круга, которая имеет первостепенное значение для эффективного шлифования кругами из СТМ при съеме относительно больших припусков, не решена. На наш взгляд, это обусловлено, прежде всего, отсутствием теоретического решения о границе завершения диспергирования режущими зернами подводимого в зону резания материала вдоль дуги контакта круга с заготовкой, которая должна соединять обрабатываемую поверхность с обработанной и, по аналогии с лезвийной обработкой, определять положение условной поверхности резания при шлифовании. По своим характерным точкам условная поверхность резания должна определять основные параметры шлифования, такие как максимальная (приведенная вероятностная) толщина среза, параметры шероховатости обработанной поверхности, фактическая длина дуги

контакта круга с заготовкой и т.д. Это позволит перейти от усредненных параметров, которыми обычно в расчетах характеризуют зону контакта круга с заготовкой, к их распределениям и, соответственно, к максимальным значениям, поскольку именно они определяют силовую нагруженность наиболее выступающих из связки зерен, их износ и износ круга в целом.

Следовательно, зная закономерности изменения положения условной поверхности резания в зависимости от условий обработки, можно будет обосновать новые возможности оптимизации управления процессом шлифования, поскольку, в отличие от известных характеристик процесса, условная поверхность резания будет вполне однозначно определять состояние процесса шлифования и позволит управлять одновременно по всем основным параметрам обработки.

Необходимо отметить, что образование условной поверхности резания будет происходить как при глубинном, так и при многопроходном шлифовании. Отличие будет состоять в закономерностях ее образования и соответственно в ее конфигурации и геометрических параметрах.

Таким образом, третья теоретическая предпосылка может быть сформулирована так: *переменность углов входа условных элементарных слоев снимаемого припуска в рабочую поверхность круга вдоль дуги контакта круга с заготовкой и вероятностный характер участия зерен в резании должны формировать сложную по конфигурации границу завершения диспергирования режущими зернами подводимого в зону резания обрабатываемого материала, определяющей положение условной поверхности резания и являющейся основой для расчета, оптимизации и управления процессом шлифования.*

Обычно в существующих расчетных схемах шлифования параметры рабочей поверхности круга рассматриваются исходными (после правки круга) и неизменными. В действительности, как доказано многочисленными экспериментальными исследованиями [25, 69, 70, 121, 158, 242, 301], под воздействием силовой и тепловой напряженности процесса шлифования режущие зерна изнашиваются и на рабочей поверхности круга из СТМ образуется вполне конкретный режущий рельеф, характеризующийся определенной величиной линейного износа зерен, высотой выступания зерен над связкой круга и т.д. Шлифование таким (отличным от исходного) рельефом круга приводит к существенному изменению закономерностей процесса шлифования. Причем, экспериментально доказано, что изменение в процес-

се обработки параметров рельефа круга оказывает на интенсивность износа круга и другие технико-экономические показатели обработки значительно большее влияние, чем, например, обычное изменение режимов резания. Особенно значительно такое изменение в условиях преобладающего выпадения из связки круга малоизношенных зерен, когда устойчивость зерен в связке и силовая нагруженность процесса резания становятся определяющими факторами процесса шлифования.

Следовательно, определение основных физических и технологических параметров шлифования должно быть произведено с учетом образования на рабочей поверхности круга установившегося режущего рельефа, обусловленного прочностными свойствами зерен и связки круга, обрабатываемого материала.

Для анализа взаимосвязи между входными и выходными параметрами процесса шлифования воспользуемся структурной схемой, приведенной на рис. 1.8. В качестве входных параметров здесь приняты режим шлифования, характеристики круга и заготовки, а в качестве выходных – производительность обработки, удельный расход СТМ, себестоимость обработки, сила и температура резания, шероховатость и точность обрабатываемых поверхностей и т.д. Связь между входными и выходными параметрами осуществляется через кинематические параметры, параметры стружкообразования и износа круга, а также через величину линейного износа зерна до момента его объемного разрушения или выпадения из связки круга без разрушения, в совокупности определяющие все внутренние (физические) параметры. При таком представлении процесса шлифования нетрудно видеть, что указанные выше внутренние параметры процесса образуют замкнутую систему, в которой кинематические параметры, вследствие износа зерен и изменения рельефа круга, претерпевают “деформацию” и, тем самым, влияют на закономерности формирования выходных параметров. Наличие обратной связи между величиной линейного износа зерен и кинематическими параметрами свидетельствует о том, что последние определяются не только режимом резания и геометрическими характеристиками круга и заготовки, как это обычно рассматривается в исследованиях, а всем комплексом факторов, определяющих силовую и тепловую напряженность процесса шлифования, износ круга и т.д. Возможность выражения кинематических параметров через все остальные внутренние (физические) параметры, позволяет рассматривать кинематические параметры основными в

передаточной функции между входными и выходными параметрами процесса.



Рис. 1.8. Структурная схема оптимизации управления кинематикой процесса шлифования на уровне микросрезов.

Следовательно, задача установления функциональных связей параметров шлифования может быть сведена к определению кинематических параметров в зависимости от условий стружкообразования, износа круга и других внутренних факторов процесса, а затем – к установлению взаимосвязи между входными и выходными параметрами посредством кинематических параметров, учитывающих физическую сторону шлифования.

Возможность аналитического описания параметров установившегося режущего рельефа круга из СТМ через величину линейного износа зерна до момента его объемного разрушения или выпадения из связки круга без разрушения, а также через величину предельной нагрузки, действующей на отдельное зерно, и обусловленной прочностными свойствами собственно зерен и связки круга, позволяет рассматривать положение условной поверхности резания как функцию от этих двух величин. В свою очередь, учитывая то, что положение условной поверхности резания определяется основными параметрами шлифования, указанные выше две независимые величины войдут во все расчетные зависимости замкнутой системы внутренних параметров и позволят принципиально по-новому подойти к оптимизации и управлению процессом шлифования.

Исходя из этого, четвертая предпосылка может быть сформулирована так: *вполне однозначное математическое представление процесса шлифования положением условной поверхности резания должно предопределить существование замкнутой системы уравнений, с единых позиций описывающих основные физические и технологические параметры шлифования во взаимосвязи с режимом шлифования, характеристиками круга и заготовки, включая величину линейного износа зерна до момента его объемного разрушения или преждевременного выпадения из связки круга без разрушения и величину предельной нагрузки, действующей на отдельное зерно круга.*

Необходимо отметить, что третья теоретическая предпосылка была выдвинута нами еще в 1980 году. На ее основе получен ряд важных научных решений, которые использованы для разработки новых высокопроизводительных процессов шлифования кругами из СТМ. Дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования, результаты которых приведены в работах [32, 69, 151, 262, 285, 353], указывают на значительную роль параметров  $x$  и  $P$  в процессе шлифования и на необходимость их учета в расчетах.

Таким образом, выше сформулированы основные теоретические

предпосылки работы, исходя из которых решение проблемы оптимизации режимов шлифования кругами из СТМ сводится, во-первых, к аналитическому описанию основных физических и технологических параметров шлифования с учетом величин  $x$  и  $P$ . Во-вторых, к определению оптимальных режимов шлифования с точки зрения обеспечения максимально возможной производительности обработки, обусловленной прочностными свойствами рабочей поверхности круга из СТМ и ограничениями по износу круга и параметрам качества обработки.

В связи с этим, ниже будет рассмотрена структура функциональных связей между основными параметрами обработки, что определит методологию разработки математической модели шлифования для определения всех основных физических и технологических параметров обработки. Далее будут рассмотрены условия оптимизации режимов шлифования кругами из СТМ. Иными словами, будут раскрыты условия реализации четырех сформулированных теоретических предпосылок работы.

### **1.3. СТРУКТУРА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ШЛИФОВАНИЯ**

Процесс съема припуска и формообразования поверхностей при шлифовании характеризуется массовым взаимодействием режущих зерен круга с обрабатываемым материалом, в результате которого происходит упруго-пластическое деформирование материала и отделение мельчайших по геометрическим размерам микростружек, различные физико-химические превращения в поверхностном слое обрабатываемого материала и износ рабочей поверхности круга, механические колебания элементов технологической системы и многие другие явления. Очевидно, учесть в математической модели всю совокупность явлений, сопровождающих процесс шлифования, из-за сложности аналитического представления невозможно и поэтому наиболее эффективным путем математического анализа и оптимизации шлифования по данным работ [151, 263, 285, 342, 405, 445], является структурное разбиение процесса на отдельные подпроцессы, отражающие характерные стороны его функционирования, затем их математическое моделирование и установление взаимосвязей между ними.

В связи с этим, для решения поставленных задач в работе пла-



нируется разработать математическую модель кинематики процесса шлифования на уровне микросрезов, которая на первом этапе должна рассматривать процесс шлифования идеальным неизнашиваемым кругом без учета физических закономерностей обработки, а на втором этапе – процесс шлифования кругом с установившимся режущим рельефом, т.е. с учетом износа круга и других физических факторов обработки.

Такой подход к разработке математической модели позволит на первом этапе установить общие закономерности образования условной поверхности резания при шлифовании.

На втором этапе разработки математической модели планируется решить более сложные задачи, связанные с установлением функциональных связей параметров шлифования с учетом износа зерен, закономерностей стружкообразования и трения зерен с обрабатываемым материалом и на их основе выявить основные технические ограничения обработки, препятствующие реализации предельных возможностей кинематических схем шлифования, установленных на первом этапе.

Таким образом, предложенный методический подход к разработке математической модели позволит в системном виде получить основные функциональные связи, необходимые для расчета, оптимизации и управления процессом шлифования.

Основной задачей на первом этапе следует рассматривать аналитическое описание рабочей поверхности круга из СТМ и установление уравнения вероятностной поверхности резания при шлифовании, определяющей распределение максимальных глубин внедрения обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга вдоль дуги контакта круга с заготовкой.

Как отмечалось выше, вопросам аналитического описания рабочей поверхности круга в научно-технической литературе уделяется значительное внимание. Разработан ряд оригинальных математических моделей рабочей поверхности круга, наиболее эффективными из которых, на наш взгляд, являются модели, в которых рабочая поверхность круга представлена в виде приведенного режущего профиля круга, образованного наложением проекций зерен на плоскость, движущуюся по нормали к кругу [4, 151, 262]. Основное преимущество такого представления состоит в том, что приведенный режущий профиль является обобщенной характеристикой круга и определяется зернистостью и концентрацией круга, прочностью зерен и связки, ли-

нейным износом зерен, т.е. всеми параметрами рабочей поверхности круга с учетом вероятности участия зерен в резании.

Используя закономерности образования приведенного режущего профиля круга, рядом авторов получены важные теоретические решения по расчету и прогнозированию шероховатости обработанной поверхности (параметров  $R_a, R_z$ , относительной опорной длины микропрофиля и т.д. [151, 262]). В то же время в известных публикациях отсутствуют обоснованные теоретические решения о величине максимальной высоты микронеровностей приведенного режущего профиля круга, которая собственно определяет максимальную глубину внедрения обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга, соответствующую максимальной (приведенной вероятностной) толщине среза. Знание этой величины представляется весьма важным для аналитического описания границы завершения диспергирования режущими зернами подводимого в зону резания обрабатываемого материала вдоль дуги контакта круга с заготовкой и, следовательно, установление функциональных связей основных параметров шлифования.

Таким образом, на первом этапе построения математической модели основной задачей следует рассматривать установление распределения максимальной высоты микронеровностей обрабатываемого материала вдоль всей дуги контакта круга с заготовкой, т.е. начиная с точки пересечения (в плоском сечении) обрабатываемой поверхности с вероятностной поверхностью резания и оканчивая точкой пересечения обработанной поверхности с вероятностной поверхностью резания. Причем, решение должно охватывать весь возможный диапазон изменения глубины шлифования: от тысячных долей микрометра до нескольких миллиметров. Решение такой задачи позволит аналитически определить максимальную (приведенную вероятностную) толщину среза, которая соответствует максимальной глубине внедрения материала в рабочую поверхность круга на всем участке контакта круга с заготовкой, параметры шероховатости, включая параметр  $R_{max}$ , и значение вероятности участия зерен в резании. Все указанные параметры будут выражены через параметры режима шлифования: скорости круга и заготовки, глубину шлифования и продольную подачу, характеристики круга: зернистость и концентрацию круга, диаметр и высоту круга, а также через диаметр заготовки.

Представляет значительный интерес установление основных параметров шлифования в условиях радиальной и продольной много-

проходности съема припуска, поскольку, в отличие от глубинного (однопроходного) шлифования, закономерности съема материала и формообразования поверхностей в этих условиях мало изучены. Здесь важно определить количество контактов фиксированного сечения заготовки с кругом до момента стабилизации шероховатости обработанной поверхности и, соответственно, значения достигаемой шероховатости, которая в данном случае практически будет совпадать с максимальной (приведенной вероятностной) толщиной среза. Важно также определить значение вероятности участия зерен в резании, т.к. в этом случае зерна будут в основном проходить по ранее процарапанным канавкам, т.е. “след в след”, и, по-видимому, испытывать незначительные нагрузки, что позволит уменьшить износ круга и повысить производительность обработки.

На втором этапе построения математической модели планируется подчинить полученные ранее кинематические решения физическим закономерностям процесса, т.е. установить уравнение вероятностной поверхности резания с учетом параметров стабилизированного режущего рельефа круга из СТМ. Для этого необходимо, прежде всего, определить параметры приведенного режущего профиля круга с учетом износа зерен, а затем, на основе решения задачи об условиях стружкообразования и трения при резании отдельным зерном, установить величину линейного износа зерна до момента его объемного разрушения или преждевременного выпадения из связки без разрушения в зависимости от параметров режима шлифования, характеристик круга, включая зернистость и концентрацию круга, прочность зерен и связки, а также прочность обрабатываемого материала. Это позволит реализовать в расчетной схеме шлифования условие энергетического равновесия системы “круг - заготовка” и теоретически вскрыть общие закономерности образования на круге установившегося режущего рельефа, который до настоящего времени изучался в основном экспериментальными методами для частных условий обработки.

При получении таких решений следует обратить внимание на разработку расчетной схемы процесса стружкообразования, поскольку в известных теоретических исследованиях отсутствуют функциональные связи между условным напряжением резания при шлифовании, составляющими силы резания, коэффициентом резания, толщиной среза, углом сдвига и другими физическими параметрами. В основу разработки данной расчетной схемы следует положить важные

результаты, полученные проф. Корчаком С.Н. и проф. Худобиным Л.В., с учетом образования на зернах площадок износа.

Таким образом, подчиняя кинематические решения закономерностям образования установившегося режущего рельефа круга, могут быть получены функциональные связи максимальной (приведенной вероятностной) толщины среза, шероховатости обработанной поверхности, силы и температуры резания, износа круга и других физических и технологических показателей, содержащие наряду с параметрами режима шлифования и таким параметрами, как прочность зерен, связки и обрабатываемого материала.

#### **1.4. УСЛОВИЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ КРУГАМИ ИЗ СТМ**

Сформулированными теоретическими предпосылками определена исключительно важная роль величины нагрузки, действующей на отдельное зерно, и величины линейного износа зерна до момента его объемного разрушения или выпадения из связки без разрушения в формировании выходных (технологических) параметров шлифования. При этом показано, что в условиях установившегося процесса шлифования величина нагрузки, действующей на максимально выступающее из связки зерно, должна принимать значение, равное или соизмеримое с прочностью зерна или прочностью удержания его в связке, а величина линейного износа зерна – значение, соответствующее образованию на рабочей поверхности круга энергетически равновесного режущего рельефа. Исходя из этого, в качестве условия оптимизации следует принять нагрузку, действующую на максимально выступающее из связки зерно, а в качестве оптимизируемого параметра – величину линейного износа зерна. Это обусловлено тем, что нагрузка, действующая на зерно, должна находиться в соответствии с прочностными свойствами зерен и связки и в установившемся процессе шлифования оставаться постоянной, независимо от условий обработки, а величина линейного износа зерна – выражать взаимосвязь входных параметров (режима шлифования, характеристик круга и технологической системы) с выходными параметрами (производительностью и качеством обработки, относительным расходом СТМ и себестоимостью обработки, силой и температурой резания).

Задача оптимизации при таком подходе сводится к определению оптимального значения величины линейного износа зерна (при за-

данной нагрузке), обеспечивающего наибольшую производительность обработки с учетом ограничений по износу круга, себестоимости и качеству обработки.

Задача управления состоит в обеспечении непрерывного поддержания во времени параметров рабочей поверхности круга, при котором достигается периодическое объемное разрушение или выпадение из связки максимально выступающего (в данный момент времени) зерна при действии на него предельной нагрузки.

Следует отметить, что предлагаемый подход к оптимизации и управлению процессом шлифования отличается от традиционных подходов.

Существующие математические модели, как правило, не рассматривают изменение режущего рельефа. Известные системы уравнений, описывающие процесс шлифования, имеют незамкнутый вид, т.к. не содержат уравнение энергетического равновесия, которое устанавливается в процессе шлифования и определяет работу круга как в режиме самозатачивания, так и в режиме непрерывной электроэрозионной или электрохимической правки. Это приводит к тому, что в полученных уравнениях отсутствует параметр, регламентирующий величину нагрузки, действующей на зерно. Следовательно, все входящие параметры независимо друг от друга можно изменять в неограниченных пределах, изменяя, таким образом, в неограниченных пределах и величину нагрузки, действующей на зерно. Вместе с тем, с физической точки зрения она не должна превышать предельного (из условий прочности зерна и связки круга) значения.

Выше отмечалось, что величина нагрузки, действующей на зерно, в зависимости от механизма износа круга должна принимать значение, равное собственно прочности зерна или прочности его удержания в связке. В условиях самозатачивания круга, когда энергии сходящей стружки достаточно для непрерывного разрушения связки и поддержания примерного равенства скоростей линейного износа зерен и связки, величина нагрузки должна определяться из равновесного состояния системы “зерно - связка” с учетом условий свободного размещения стружки в межзеренном пространстве круга. В случае, если энергии сходящей стружки не достаточно для своевременного освобождения рабочей поверхности круга на токопроводной связке от затупившихся зерен (т.е. при работе круга в режиме затупления), эффективно в зону резания или автономно к кругу вводить дополнительную электрическую энергию в виде электрических разрядов. Это

позволит удалять с рабочей поверхности круга продукты диспергирования обрабатываемого материала и разрушать связку с заданной скоростью, равной скорости износа зерен [31, 32, 69, 74, 103, 330, 331]. В данном случае нагрузка, действующая на зерно, будет определяться не только механическими параметрами, но и электрическими. Благодаря дополнительному электроэрозионному воздействию на рабочую поверхность круга, нагрузка и, следовательно, величина линейного износа зерна могут быть стабилизированы на любом уровне, исходя из технологических требований обработки [32, 69, 254-256, 463]. Эффективность электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках доказана многочисленными исследованиями [69, 331, 350, 463].

При выполнении оптимизации процесса шлифования, независимо от механизма износа круга, нагрузку, действующую на зерно, следует принимать равной прочности зерна. Тогда в установившемся процессе шлифования разрушающая зерно нагрузка и сила, удерживающая зерно в связке, будут равны. Это позволит в максимальной степени использовать потенциальные (прочностные) возможности рабочей поверхности круга из СТМ.

При расчетах может оказаться, что заданное значение нагрузки, определяющее прочность зерна на раздавливание, не обеспечивает одновременное выполнение всех технических ограничений шлифования. Тогда заданное значение нагрузки следует уменьшить и произвести выбор оптимальных характеристик круга, соответствующих этому значению нагрузки.

Таким образом, показано, что повысить эффективность шлифования можно за счет выполнения условия равенства “трех сил”: силы, действующей на зерно; силы, удерживающей зерно в связке, и разрушающей зерно силы, т.е. необходимо, чтобы моменту выпадения зерна из связки предшествовало его объемное разрушение. Соблюдение этого условия возможно путем регулирования величины линейного износа зерна до момента его выпадения из связки (степени затупления зерна) за счет применения оптимальных электрических параметров электроэрозионной правки алмазного круга на металлической связке.

Как отмечалось выше, выбор оптимального значения величины линейного износа зерна необходимо производить из условия обеспечения максимально возможной производительности обработки с учетом прочностных свойств рабочей поверхности круга и технических

ограничений обработки. Из этого следует, что решение проблемы существенного повышения производительности обработки при шлифовании алмазными кругами с хорошо развитым режущим рельефом (сформированным за счет использования электроэрозионной правки) сводится к определению оптимальной величины линейного износа зерна и реализующих ее оптимальных значений электрических и механических параметров режима шлифования, обеспечивающих выполнение условия равенства “трех сил”.

На рис. 1.8 приведена структурная схема предлагаемого решения, согласно которой связь между входными и выходными (технологическими) параметрами шлифования осуществляется посредством блока кинематических и блока физических параметров, а также величины линейного износа зерна  $x$ . Изменяя величину  $x$  с учетом наличия обратной связи можно в широких пределах изменять кинематические, физические и, соответственно, выходные (технологические) параметры или, наоборот, входные параметры с целью достижения требуемых выходных параметров.

Предлагаемое решение является новым, т.к. в теории шлифования и на практике вопросы управления величиной  $x$  с позиции выполнения условия равенства “трех сил” не решались.

Известны решения по управлению высотой выступления зерен над уровнем связки алмазного круга, используя электрохимическую правку [69]. Однако, они не предусматривают выполнения условия равенства “трех сил” за счет изменения величины  $x$ .

Поэтому высота выступления зерен над связкой круга, которой многие исследователи придают первостепенное значение в интенсификации алмазного шлифования, по данной структуре играет роль одного из элементов управления оптимальным режимом обработки.

Приведенная на рис. 1.8 блок-схема представляет собой примерную структуру оптимизации и управления процессом шлифования на уровне микросрезов. Следуя данной схеме, первоначально из технологических условий определяются оптимальные значения величины линейного износа зерна, нагрузки, скорости износа зерна и оптимальный режим шлифования. Затем, для этих значений подбираются марки СТМ, связки и другие характеристики круга, одновременно обеспечивающие удержание зерна в связке с заданной силой и режим самозатачивания круга, т.е. равенство линейных скоростей износа зерен и связки. В случае, если режим самозатачивания круга не достигается, связка круга подвергается дополнительному электроэро-

зионному воздействию с интенсивностью, обеспечивающей выполнение двух вышеуказанных условий.

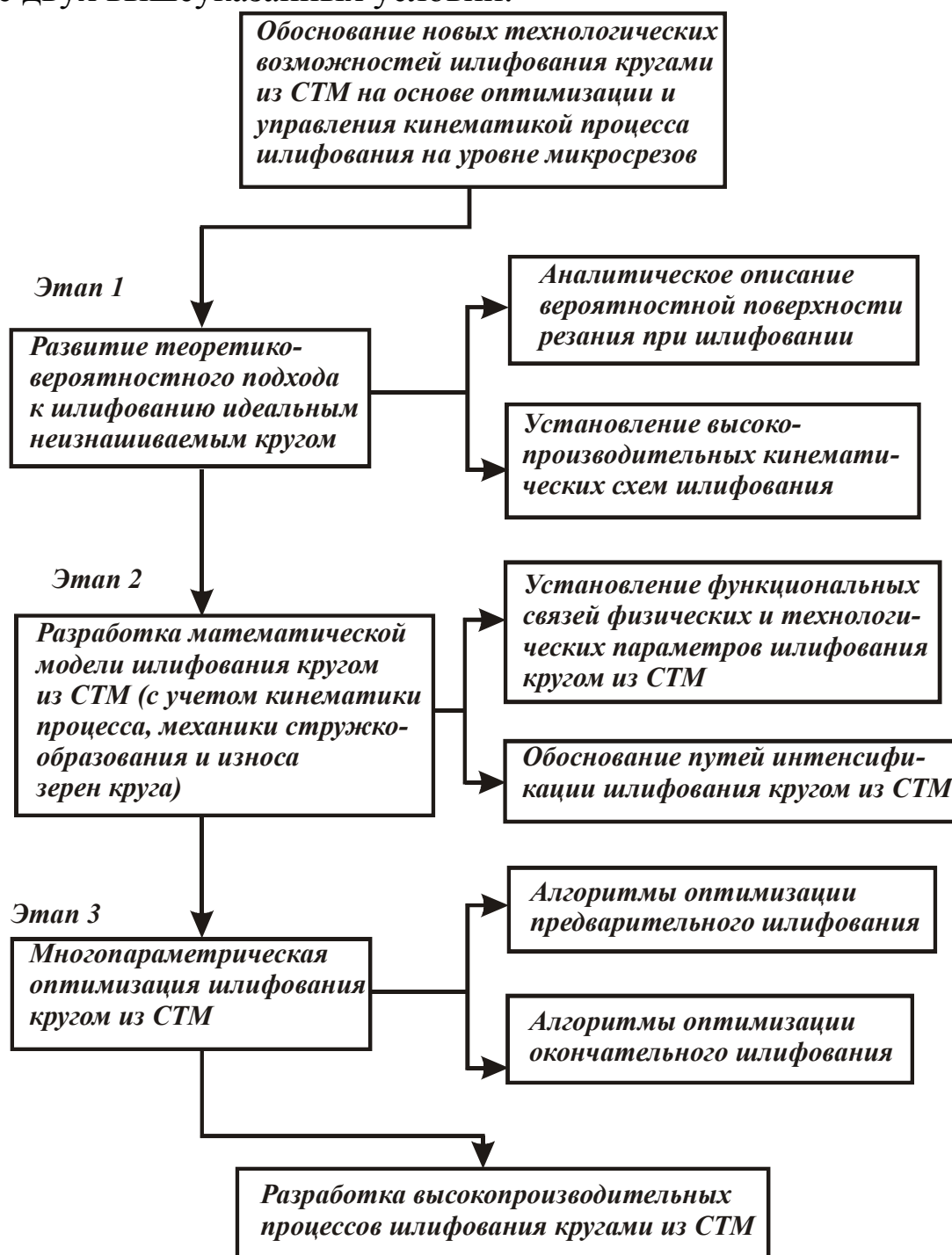


Рис. 1.9. Структурно-логическая схема работы.

Для реализации предложенной схемы оптимизации и управления процессом шлифования необходимо знать, прежде всего, предельную производительность обработки во всем возможном диапазоне изменения глубины шлифования (включая диапазоны многопроходного и глубинного шлифования). Для этого следует разрешить установленные функциональные связи параметров относительно одного из пара-



метров режима шлифования при заданной максимальной (приведенной вероятностной) толщине среза или при условии, что величина линейного износа зерна равна нулю. Зная закономерности изменения этого параметра, несложно определить максимально возможную производительность обработки и установить наиболее предпочтительные направления интенсификации процесса шлифования.

В случае выполнения многопараметрической оптимизации процесса шлифования с учетом ряда технических ограничений обработки задача оптимизации сводится к разрешению системы уравнений относительно невзаимосвязанных параметров режима шлифования, характеристики круга и величины линейного износа зерна до момента его объемного разрушения или выпадения из связки круга без разрушения. Причем, количество невзаимосвязанных параметров всегда будет равно количеству технических ограничений обработки.

Данные решения будут справедливы для всего многообразия существующих схем шлифования, отличающихся характером контакта круга с заготовкой, в частности, способом подачи заготовки в зону резания (жесткая и упругая схемы шлифования), кинематикой обработки (продольное, врезное шлифование и т.д.), конструктивными особенностями алмазно-абразивного инструмента и заготовки (прерывистое шлифование или шлифование прерывистых поверхностей) и т.д. Это позволит выполнять сопоставимые сравнения условий обработки для различных процессов шлифования, не прибегая к проведению трудоемких экспериментальных исследований. На основе проведенного анализа составлена общая структурная схема работы, показанная на рис. 1.9. Для реализации предложенного решения и соответственно выявления и обоснования условий существенного повышения производительности обработки, разработаны кинематическая и физическая модели шлифования, которые в совокупности дают достаточно полное представление о физической сущности и основных закономерностях процесса и определяют теоретические основы алмазного шлифования.

### **1.5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ КРУГАМИ ИЗ СТМ**

Для вероятностного описания участия зерен в резании введена новая вероятностная функция – относительная полнота профиля круга  $\varepsilon(y)$ , которая по структуре построения аналогична относительной опорной длине микропрофиля обработанной поверхности и учитыва-

ет перекрытие проекции зерен на радиально движущийся обрабатываемый образец 3, рис. 1.10.

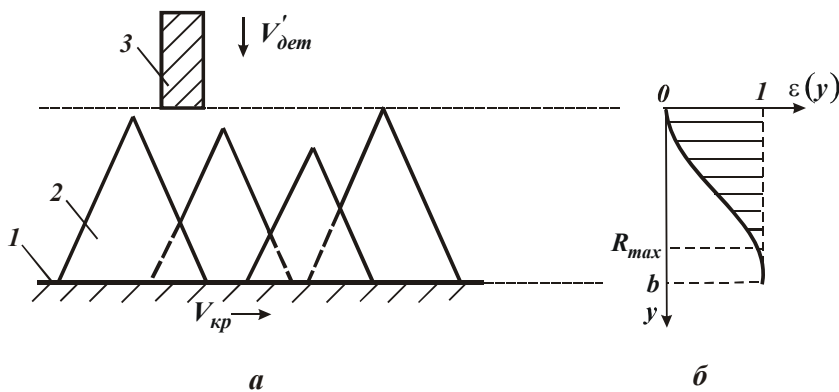


Рис. 1.10 Схема формирования относительной полноты профиля круга  $\varepsilon(y)$  и график функции  $\varepsilon(y)$ : 1 – уровень связки круга; 2 – режущее зерно; 3 – обрабатываемый образец.

Снимаемый припуск в расчетной схеме представлен пакетом бесконечно тонких цилиндрических оболочек, которые под разными углами входят в рабочую поверхность круга, рис. 1.11.

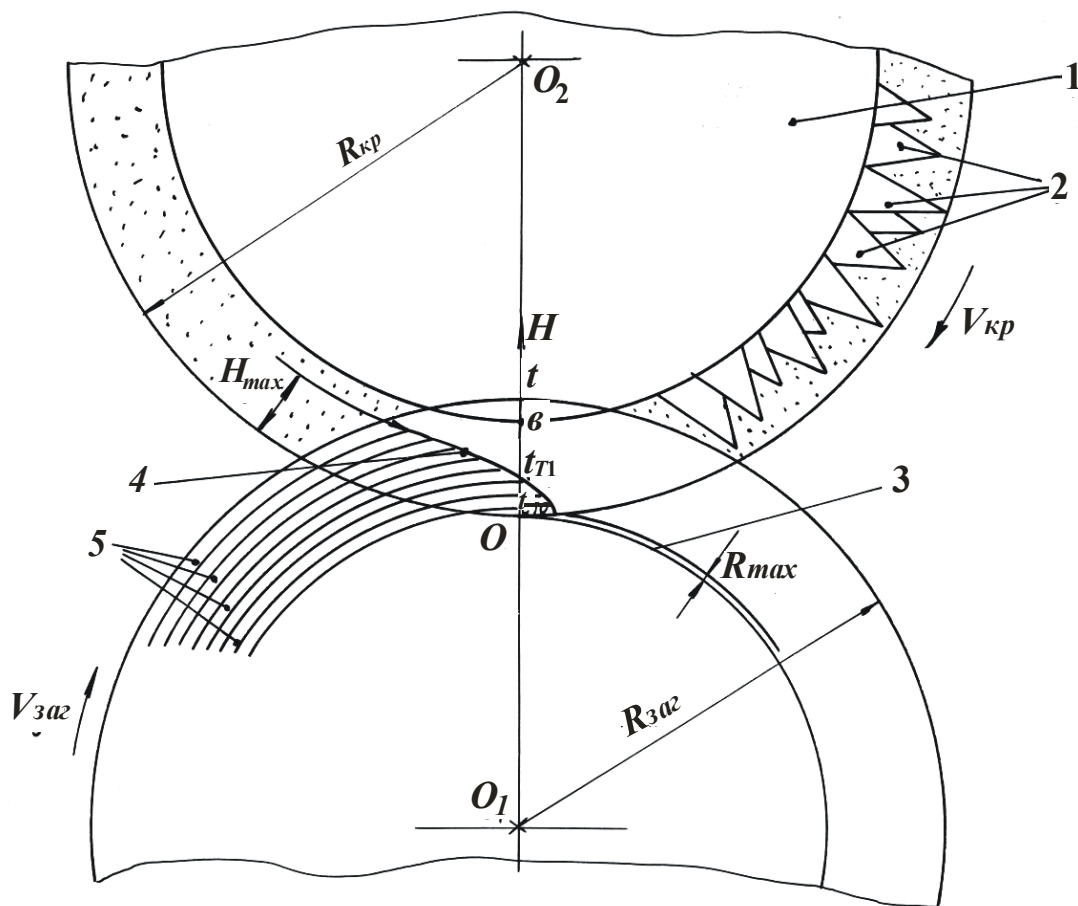


Рис. 1.11. Расчетная схема характерных точек вероятностной поверхности резания при шлифовании: 1 – круга; 2 – режущие зерна круга; 3 – слой остаточной шероховатости обработанной поверхности; 4 – положение вероятностной поверхности резания при шлифовании; 5 – бесконечно тонкие цилиндрические оболочки снимаемого припуска.

В результате взаимодействия оболочек с зернами, с каждой оболочкой происходит срезание металла, описываемое функцией  $\varepsilon_n(y)$ :

$$\varepsilon_n(y) = 1 - \exp \left\{ - \frac{\sqrt{2} \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}{3 \cdot b \cdot V_{заг} \cdot \sqrt{\rho}} \cdot \left[ \frac{y^3}{2 \cdot \sqrt{t_{nT}}} + \sum_{i=0}^{n-2} t_{iT}^{5/2} \right] \right\}, \quad (1.1)$$

где  $k$  - поверхностная концентрация зерен круга, шт/м<sup>2</sup>;  $b$  - максимальная высота выступания вершин зерен над уровнем связки круга, м;  $2\gamma$  - угол при вершине конусообразного режущего зерна;  $V_{кр}, V_{заг}$

- соответственно скорости круга и заготовки, м/с;  $\rho = \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{заг}}$ ;

$R_{кр}, R_{заг}$  - соответственно радиусы круга и заготовки, м;  $t_{iT} = t_T + i \cdot t$  - координата оболочки при  $i$ -том контакте ее с кругом, м;  $t_{nT} = t_T + (n-1) \cdot t$  - координата оболочки при  $n$ -том контакте ее с кругом, м;  $t_T$  - координата текущей бесконечно тонкой оболочки, которыми условно представлен снимаемый припуск, м;  $n$  - число проходов круга.

Основу разработанной кинематической модели шлифования составляет аналитическое решение об описании границы завершения диспергирования режущими зернами материала, подводимого в зону резания, вдоль дуги контакта круга с заготовкой:

$$H = \sqrt[3]{2} \cdot \sqrt[6]{t_{nT}} \cdot \sqrt[3]{\frac{H_{max}^3}{2 \cdot \sqrt{t_{nT_{экстр}}} + \sum_{i=0}^{n-2} t_{iT_{экстр}}^{5/2}} - \sum_{i=0}^{n-2} t_{iT}^{5/2}}, \quad (1.2)$$

где  $H_{max}$  - максимальная толщина среза, м;  $t_{nT_{экстр}}$  - координата экстремального положения оболочки, у которой полный профиль  $\varepsilon(y)=0,95$  образуется на уровне  $H_{max}$ , м;  $t_{iT_{экстр}}$  - координата экстремального положения оболочки при  $i$ -том контакте ее с кругом, м.

Как показано на рис. 1.11, граница проведена по вершинам микронеровностей обрабатываемого материала, имеет сложную конфигурацию, соединяет обрабатываемую поверхность с обработанной и по аналогии с лезвийной обработкой определяет положение условной вероятностной поверхности резания при шлифовании. Характерные точки границы являются основой для расчета физических и технологических параметров шлифования (максимальной толщины среза, шероховатости обработанной поверхности, фактической длины контакта круга с заготовкой и т.д.). Это позволяет с единых позиций

вполне однозначно аналитически описать закономерности процесса шлифования во всем возможном диапазоне изменения глубины шлифования (включая диапазоны многопроходного и глубинного шлифования).

Расчетами установлено, что положение границы определяется соотношением двух параметров – максимальной (приведенной вероятностной) толщины среза  $H_{max}$  и глубины шлифования  $t$ . В случае  $t < H_{max}$  (многопроходное шлифование) граница принимает примерно симметричную форму относительно осевой плоскости шлифования, в случае  $t > H_{max}$  (глубинное шлифование) – асимметричную форму.

Расчетами установлено, что процент работающих зерен для случая  $t > H_{max}$  составляет приблизительно 50%, а для случая  $t < H_{max}$  – 5...10% (т.е. зерна проходят почти “след в след”, что, как будет показано выше, является важным фактором увеличения производительности обработки).

В случае  $t > H_{max}$  аналитическая зависимость для определения положения границы принимает простой вид

$$H = H_{max} \cdot 6 \sqrt{\frac{t_T}{t}}, \quad (1.3)$$

где  $t_T$  – координата текущей элементарной (бесконечно тонкой) цилиндрической оболочки, которыми условно представлен в расчетной схеме снимаемый припуск, м.

Соответственно, параметры границы  $H_{max}$  и  $R_{max}$  (параметр шероховатости обработки, м) описываются аналитическими зависимостями

$$H_{max} = \left( \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5}}{m \cdot V_{кр}} \right)^{0,33}, \quad (1.4)$$

$$R_{max} = 10 \cdot \left( \frac{\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot \rho^{0,5}}{m \cdot V_{кр}} \right)^{0,4}, \quad (1.5)$$

где  $\bar{X}$  – зернистость круга, м;  $m$  – объемная концентрация;  $V_{заг}$ ,  $V_{кр}$  – соответственно скорости заготовки и круга, м/с;  $\rho = \frac{1}{R_{заг}} + \frac{1}{R_{кр}}$ ;

$R_{заг}$ ,  $R_{кр}$  – соответственно радиусы заготовки и круга, м.

Таблица 1.9

Расчетные значения толщины среза  $H_{max}$  (исходные данные:  $R_{заг}=80 \cdot 10^{-3}$  м;  $R_{кр}=150 \cdot 10^{-3}$  м;  $\bar{X}=0,225 \cdot 10^{-6}$  м;  $m=100$ ;  $V_{кр}=30$  м/с;  $V_{заг}=1$  м/мин;  $t=0,1 \cdot 10^{-3}$  м)

Авторы	Новиков Ф.В.	Маслов Е.Н.	Лурье Г.Б.	Резников А.Н.	Данные экс- перимента
$H_{max}$ , мкм	14,7	0,007	0,12	1,1	10,5

Приведенные в табл. 1.9 значения толщины среза, полученные по расчетным зависимостям ряда авторов, показывают на большое расхождение расчетных и экспериментальных данных. Например, для расчетной зависимости, предложенной Масловым Е.Н., это расхождение превышает 1000 раз. Наиболее правильный результат получен с использованием зависимости (1.4). Имеющееся здесь расхождение расчетных и экспериментальных значений  $H_{max}$  (до 40%) связано с тем, что в кинематической модели процесса шлифования не учитывается износ зерен круга.

Полученные результаты уточнены в рамках разработанной физической модели шлифования. Установлены расчетные зависимости, которые содержат новый безразмерный параметр  $\eta = \frac{x}{H}$ , определяющий степень линейного износа зерен и изменяющийся в пределах 0...1 (для “острого” зерна  $\eta \rightarrow 0$ , для затупившегося  $\eta \rightarrow 1$ ):

$$H_{max} = \left[ \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5} \cdot (1-\eta)^2}{m \cdot V_{кр} \cdot (1+\eta)} \right]^{0,33}, \quad (1.6)$$

$$R_{max} = 10 \cdot \left[ \frac{(1-\eta)^2}{(1+\eta)} \cdot \frac{\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot \rho^{0,5}}{m \cdot V_{кр}} \right]^{0,4}. \quad (1.7)$$

С учетом параметра  $\eta$  ( $\eta > 0$ ) значения  $H_{max}$  и  $R_{max}$  уменьшаются. Следовательно, уменьшается (и даже устраняется) расхождение между расчетными и экспериментальными значениями  $H_{max}$ , приведенными в табл. 1.9. Сравнение экспериментальных значений максимальной толщины стружки с соответствующими расчетными значениями параметра  $H_{max}$  показало их приблизительное совпадение при  $\eta=0,2$ , табл. 1.10.

Из этого следует, что учет величины линейного износа зерна  $x$  (посредством параметра  $\eta$ ) в расчетных зависимостях позволяет привести в соответствие теорию и практику шлифования.

Таблица 1.10

Расчетные значения  $H_{max}$  и экспериментальные значения максимальных толщин стружек в мм (исходные данные:  $m=100$ ;  $\bar{X}=0,2 \cdot 10^{-6}$  м;  $V_{кр}=30$  м/с;  $R_{заг}=0,02$  м;  $R_{кр}=0,15$  м)

№ п/п	Режимы шлифования		$\eta$			Максимальная толщина стружки, мм
	$t$ , мм	$V_{заг}$ , м/мин	0	0,2	0,5	
1	0,05	0,5	0,0130	0,010	0,0071	0,013
2	0,05	0,8	0,0154	0,0124	0,0034	0,013
3	0,05	1,0	0,0167	0,0135	0,0091	0,013
4	0,05	2,0	0,021	0,0170	0,0115	0,013
5	0,1	0,5	0,0148	0,0119	0,0081	0,014
6	0,1	1,0	0,0187	0,0151	0,0102	0,015
7	0,1	2,0	0,0236	0,0191	0,0129	0,014
8	0,2	0,5	0,0167	0,0135	0,0091	0,015
9	0,2	1,0	0,0210	0,0170	0,0115	0,017

Из всех входящих в зависимости (1.6) и (1.7) параметров, наибольшее влияние на  $H_{max}$  и  $R_{max}$  оказывает  $\eta$ . Это указывает на преобладающую роль величины  $\eta$  в формировании основных физических и технологических параметров шлифования и подтверждает выдвинутую гипотезу об эффективности управления процессом шлифования на основе регулирования величины  $\eta$ .

Для установления значения  $\eta$ , удовлетворяющего условию равенства “трех сил”, в рамках разработанной физической модели шлифования получено новое аналитическое решение, определяющее условное напряжение резания  $\sigma$  и коэффициент резания при шлифовании  $K_{ш}$ :

$$\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{K_{ш}}, \quad (1.8)$$

$$K_{ш} = \frac{(1 - \eta) + 2 \cdot f \cdot \eta}{(1 + \eta)}, \quad (1.9)$$

где  $f$  – коэффициент трения режущего зерна с обрабатываемым материалом;  $\sigma_{сж}$  – предел прочности обрабатываемого материала на сжатие, Н/м<sup>2</sup>.

Из зависимости (1.8) следует, что параметр  $\sigma$  при обработке вполне конкретного материала определяется лишь коэффициентом

резания  $K_{ш}$ . Чем он больше, тем меньше условное напряжение резания  $\sigma$ , т.е. добиться уменьшения  $\sigma$  можно за счет поддержания на рабочей поверхности круга развитого режущего рельефа; применения эффективных технологических сред, снижающих трение в зоне резания; прерывистого шлифования, обеспечивающего работу круга в режиме самозатачивания и т.д.

Параметры режима шлифования и характеристики круга непосредственного влияния на условное напряжение резания  $\sigma$  не оказывают, они связаны с  $\sigma$  посредством коэффициента резания при шлифовании  $K_{ш}$ .

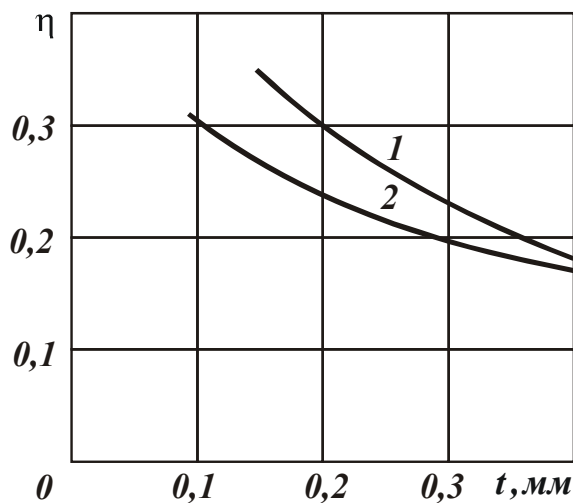


Рис. 1.12. Зависимость  $\eta$  от глубины шлифования  $t$ : 1 – по данным  $K_{ш}$ ; 2 – по данным  $R_a$ ; обрабатываемый материал – Т15К10; круг – 1А1 300х25 АС6 200/160 М1-10 4;  $V_{кр} = 35$  м/с;  $V_{заг} = 1$  м/мин;  $S_d = 0,9$ .

По сути, зависимости (1.8) и (1.9) определяют физическую сущность процесса шлифования, что имеет важное теоретическое и практическое значение.

Достоверность полученного решения оценивалась экспериментально на основе сравнения значений  $\eta$ , полученных в соответствии с зависимостью (1.9) с учетом экспериментальных данных  $K_{ш}$  и полученных по зависимости (1.7) с учетом экспериментальных данных  $R_{max}$ , рис. 1.12. Установлено, что расхождение значений  $\eta$  не превышает 20%. Это указывает на достоверность теоретического решения.

Множитель  $(1 - \eta)$  в зависимостях (1.6) и (1.7) может быть выражен через коэффициент резания при шлифовании  $K_{ш}$ , исходя из зависимости (1.9)

$$(1 - \eta) = \frac{2 \cdot (K_{ш} - f)}{(1 + K_{ш} - 2 \cdot f)} \quad (1.10)$$

Это по-новому вскрывает физическую сущность процесса шлифования, состоящую в том, что все основные параметры определяются не просто коэффициентом резания при шлифовании или коэффициентом трения режущих зерен с обрабатываемым материалом (как это принято считать в теории шлифования), а их разностью  $(K_{ш} - f)$ ,

которая по мере затупления зерна  $K_{ин} \rightarrow f$  стремится принять нулевое значение и привести к прекращению съема материала. Данная закономерность хорошо согласуется, например, с экспериментальными данными Узуняна М.Д., согласно которым коэффициент  $K_{ин}$  при алмазно-искровом шлифовании твердых сплавов меньше коэффициента  $K_{ин}$  при обычном алмазном шлифовании на величину коэффициента трения обрабатываемого материала со связкой круга. Следовательно, введение электрической энергии в зону резания позволяет практически исключить трение обрабатываемого материала со связкой круга. Тогда разность  $(K_{ин} - f)$  будет определять коэффициент “чистого резания” без учета трения обрабатываемого материала со связкой круга.

Используя зависимости (1.8) и (1.9), определена производительность обработки  $Q$

$$Q = \frac{P_y \cdot V_{кр} \cdot (K_{ин} - f)^2}{2 \cdot \sigma_{сж}}, \quad (1.11)$$

где  $P_y$  - радиальная составляющая силы резания, Н;  $V_{кр}$  - скорость круга, м/с.

Из зависимости (1.11) следует, что добиться увеличения  $Q$  можно применением силового шлифования (увеличение  $P_y$ ), скоростного шлифования (увеличение  $V_{кр}$ ) и повышением режущей способности круга, которая обобщенно определяется разностью параметров  $(K_{ин} - f)$ . Причем, разность параметров  $(K_{ин} - f)$  оказывает на  $Q$  наибольшее влияние, т.к. входит в зависимость (1.11) в квадрате.

Увеличить  $(K_{ин} - f)$  можно, во-первых, за счет поддержания на круге “острого” режущего рельефа (увеличение  $K_{ин}$ ) путем обеспечения работы круга в режиме самозатачивания, применение комбинированных методов шлифования алмазными кругами на металлических связках с введением в зону резания или автономно к кругу дополнительной электрической энергии и т.д. Во-вторых, за счет применения эффективных технологических сред импрегнации круга и т.д. (уменьшение  $f$ ).

Определяющее влияние разности параметров  $(K_{ин} - f)$  на производительность обработки  $Q$  обусловлено еще и тем, что по мере затупления круга выполняются условия  $K_{ин} \rightarrow f$  и  $Q \rightarrow 0$ , т.е. вели-



чиной ( $K_{ин} - f$ ) в процессе шлифования необходимо управлять.

Выражая ( $K_{ин} - f$ ) через безразмерный параметр  $\eta$ , производительность обработки принимает вид

$$Q = \frac{2 \cdot P_y \cdot V_{кр}}{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV} \cdot (1 - \eta), \quad (1.12)$$

где  $2\gamma$  - это угол при вершине конусообразного режущего зерна;  $HV$  - твердость (по Виккерсу) обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>.

В общем случае параметр  $\eta$  изменяется в пределах от 0 до 1. Для вновь заправленного круга  $\eta \rightarrow 0$ , для затупленного круга  $\eta \rightarrow 1$ . Расчетно-экспериментальным путем установлено, что при шлифовании алмазными кругами на органических и керамических связках безразмерный коэффициент  $\eta$  меньше, чем при шлифовании алмазными кругами на металлических связках. Применение электроэрозионной правки круга позволяет уменьшить безразмерный параметр  $\eta \rightarrow 0$ .

Установлено также, что входящий в зависимость (1.12) параметр  $P_y$  необходимо рассматривать как активную часть радиальной составляющей силы резания  $P_y$ , которая идет на вдавливание зерен круга в обрабатываемый материал. Вторая – пассивная – часть силы  $P_y$  идет на сжатие слоя стружки в межзеренном пространстве круга и истирание связки. Например, установлено, что при шлифовании алмазными кругами на органической и керамической связках активная часть силы  $P_y$  значительно меньше (составляет 10-30% от общей силы  $P_y$ ), чем при шлифовании алмазным кругом на металлической связке, работающим с использованием электроэрозионной правки. В данном случае практически исключается контакт стружки со связкой круга. Здесь активная часть силы  $P_y$  составляет до 90%.

При шлифовании сталей и других пластичных материалов активная часть силы  $P_y$  значительно меньше, чем при шлифовании твердых сплавов и других высокопрочных хрупких материалов, что и объясняет плохую обрабатываемость сталей при шлифовании.

При шлифовании пластичных материалов происходит заполнение межзеренного пространства алмазного круга образующимися стружками, что приводит к засаливанию круга и прекращению процесса резания по причине отсутствия выступания зерен.

С учетом представления  $P_y = P_{y_{рез}} + P_{y_{тр}}$ , где  $P_{y_{рез}}$ ,  $P_{y_{тр}}$  – соответственно, составляющие силы  $P_y$ , обусловленные процессами резания и трения круга с обрабатываемым материалом, имеем:  $P_{y_{тр}} \rightarrow P_y$ ;  $P_{y_{рез}} \rightarrow 0$ ;  $Q \rightarrow 0$ .

При шлифовании хрупких материалов, когда сплошная стружка фактически не образуется и засаливание отсутствует, потеря режущей способности круга происходит за счет затупления режущих зерен  $K_{ш_{рез}} \rightarrow 0$ ;  $Q \rightarrow 0$  (где  $K_{ш_{рез}}$  - коэффициент шлифования, установленный без учета трения круга с обрабатываемым материалом).

Таким образом, при шлифовании пластичных материалов важно устранить засаливание круга, а при шлифовании хрупких материалов – своевременно удалить с рабочей поверхности круга затупившиеся зерна. В первом случае решается задача увеличения  $P_{y_{рез}}$ , во втором случае – задача увеличения  $K_{ш_{рез}}$ .

Используя зависимость (1.8), установлена связь между величиной  $\eta$  и нагрузкой  $P$ , действующей на максимально выступающее из связки круга зерно:

$$\eta = 1 - \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5}}{m \cdot V_{кр}} \cdot \left( \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{P} \right)^{1,5}. \quad (1.13)$$

Из зависимости (1.13) следует, что с увеличением величины  $\eta$ , т.е. по мере затупления зерна, нагрузка  $P$  увеличивается. Следовательно, существуют такие значения  $\eta$ , при которых нагрузка  $P$  принимает значения, соответствующие прочности зерна на раздавливание (разрушающей нагрузки) и прочности удержания зерна в связке. Существует также значение  $\eta$ , соответствующее условию одновременного равенства прочности зерна на раздавливание и прочности удержания зерна в связке, т.е. обеспечивающего выполнение условия равенства “трех сил”. Это подтверждает основную предпосылку работы о существовании условия равенства “трех сил” и возможности его реализации на основе управления величиной линейного износа зерна (в данном случае определяемой  $\eta$ ) за счет применения оптимальных электрических параметров электроэрозионной правки алмазного круга.

Основой для выбора оптимальных электрических параметров может быть условие поддержания постоянной в процессе шлифова-

ния заданной (расчетной) силы резания  $P_z = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{кр}}$  или мощности резания  $N = P_z \cdot V_{кр}$ , где условное напряжение резания  $\sigma$  определяется зависимостью:

$$\sigma = \frac{m \cdot V_{кр}}{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5}} \cdot \frac{P^{1,5}}{(2 \cdot \sigma_{сж})^{0,5}}. \quad (1.14)$$

Расчетные значения  $P_z$  и  $N$  соответствуют оптимальному значению  $\eta$ , установленному по зависимости (1.13).

Предложенное значение положительно отличается от известного решения, связанного с управлением высотой выступления зерна над уровнем связки круга за счет использования электрохимической правки. Это обусловлено тем, что величина  $\eta$  оказывает определяющее влияние на условия формирования основных физических и технологических параметров шлифования, а высота выступления зерна над уровнем является своего рода “инструментом” для реализации заданного значения  $\eta$ , т.е. величина  $\eta$  является первичным, а высота выступления зерна над связкой – вторичным параметром управления процессом шлифования.

Учитывая то, что параметр  $\sigma_{сж}$  определен не для всех обрабатываемых материалов (в частности, композиций материалов), в работе получено приближенное решение для расчета основных параметров шлифования

$$\eta = 1 - \frac{A}{P} \cdot \left( \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5} \cdot A^2}{m \cdot V_{кр} \cdot P^2} \right)^{\frac{(2-n)}{(2n-1)}}, \quad (1.15)$$

$$H_{max} = \left( \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5} \cdot A^2}{m \cdot V_{кр} \cdot P^2} \right)^{\frac{1}{(2n-1)}}, \quad (1.16)$$

$$\sigma = A \cdot \left( \frac{m \cdot V_{кр} \cdot P^2}{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{заг} \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5} \cdot A^2} \right)^{\frac{n}{(2n-1)}}, \quad (1.17)$$

где  $A$  - параметр, определяющий прочностные свойства обрабатываемого материала;  $n$  - показатель энергоемкости процесса ( $n=0,5...1,0$ ).

В табл. 1.11 приведены значения  $A$  и  $P$ , полученные расчетно-

экспериментальным путем на основе экспериментальных данных  $P_z$ ,  $R_{max}$  и теоретических зависимостей

$$A = \frac{4^{\frac{n}{6}} \cdot (3-n) \cdot (6-n) \cdot P_z \cdot R_{max}^{\frac{5n}{6}} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{заг}}}{2,64 \cdot B \cdot t^{\left(1-\frac{n}{6}\right)}}, \quad (1.18)$$

$$P = \frac{4^{\frac{n}{6}} \cdot (3-n) \cdot (6-n) \cdot P_z \cdot R_{max}^{\frac{5}{6}} \cdot \left( \frac{630\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{кр} \cdot \rho^{0,5}}{m \cdot V_{заг}} \right)}{2,64 \cdot B \cdot t^{\left(1-\frac{n}{6}\right)}}. \quad (1.19)$$

Установлено, что при шлифовании алмазными кругами на металлических связках с использованием электроэрозионной правки параметр  $A$  (для  $n=0,75$ ) остается приблизительно постоянным в широком диапазоне изменения режимов шлифования. Некоторое уменьшение параметра  $A$  с увеличением  $V_{заг}$  и  $t$  связано с повышением температуры резания и снижением в связи с этим прочности обрабатываемого материала, что хорошо согласуется с соответствующими экспериментальными данными Корчака С.Н.

Таблица 1.11

Значения параметров  $A$  и  $P$  (алмазный круг 1А1 300х25 АС6 200/160 100% МО4; обрабатываемый материал – Т5К10,  $V_{кр} = 35$  м/с;  $B = 22,5 \cdot 10^{-3}$  м)

$V_{заг}$ , м/мин	5	5	5	10	10	10
$t \cdot 10^{-3}$ , м	0,05	0,1	0,2	0,05	0,1	0,15
$A \cdot 10^5$ , Н/м <sup>1,25</sup>	5,34	5,14	4,76	4,52	3,51	3,4
$P$ , Н	1,92	1,68	1,78	1,78	1,59	1,66

Данная закономерность выявлена для различных характеристик кругов, обрабатываемых материалов и схем шлифования, в том числе на основе экспериментальных данных ряда авторов. Так, например, при плоском многопроходном шлифовании алмазным кругом на органической связке быстрорежущей стали Р6М5 параметр  $A$  с изменением режимов шлифования изменялся в “узких пределах”  $(10 \dots 13,6) \cdot 10^5$  Н/м<sup>1,25</sup>, а при круглом врезном шлифовании алмазным кругом на металлической связке М2-01 стали ХВГ и стали 45 (по экспериментальным данным мощности резания и шероховатости обработки, полученным Пашковым Д.А.) – в пределах  $(13 \dots 15) \cdot 10^5$  Н/м<sup>1,25</sup>. Следовательно, независимо от схемы шлифования и характеристики круга

параметр  $A$  принимает приблизительно одни и те же значения при изменении режимов шлифования в широких пределах.

Аналогичные результаты получены при заточке твердосплавного инструмента совместно со сталью (по экспериментальным данным силы резания и шероховатости обработки, полученным Захаренко И.П. и Шепелевым А.А.): параметр  $A$  изменялся в небольших пределах  $(8 \dots 10) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^{1,25}$ , т.е. параметр  $A$  достаточно объективно характеризует сопротивляемость материала резанию и может быть использован для оценки обрабатываемости материала при шлифовании.

Из табл. 1.11 следует, что параметр  $P$  в установившемся процессе шлифования, независимо от условий обработки, остается приблизительно постоянным, близким к разрушающей зерно нагрузке. Аналогичные данные были получены при шлифовании алмазными кругами на металлических связках разных характеристик. Этим показано, что параметр  $P$  при шлифовании, независимо от условий обработки, остается приблизительно постоянным, а переменным является параметр  $\eta$  (в соответствии с зависимостями (1.13) и (1.15)).

Это принципиально новое решение, т.к. в теории шлифования принято считать переменным параметром величину нагрузки  $P$ , действующую на зерно, с изменением которой связывают условия изменения основных физических и технологических параметров обработки: износ круга, силы и температуры резания, параметров качества обработки в зависимости от условий шлифования. В действительности, изменение указанных параметров происходит не за счет изменения параметра  $P$ , а за счет изменения параметра  $\eta$ .

Сделанный вывод вытекает, в частности, из зависимости для расчета относительного расхода алмаза  $q$ , характер изменения которого определяется параметром  $\eta$ :

$$q = \frac{10^{-3} \cdot \rho_a \cdot \alpha \cdot \Delta_i \cdot V_{кр}}{\rho_m \cdot V_{заг} \cdot t \cdot \eta}, \quad (1.20)$$

где  $\rho_a, \rho_m$  - соответственно плотности алмаза и обрабатываемого материала,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\Delta_i$  - линейный износ зерна за одно касание с обрабатываемым материалом, м;  $\alpha$  - коэффициент, учитывающий плотность связки круга в зависимости от концентрации алмазных зерен.

При условии  $\eta \rightarrow 0$ , т.е. с увеличением  $V_{заг}$  и  $t$  при  $P = const$  в соответствии с зависимостью (1.15) относительный расход алмаза  $q \rightarrow \infty$  неограниченно увеличивается, что хорошо согласуется с мно-

гочисленными экспериментальными данными разных авторов. Например, с известными экспериментальными данными Сагарды А.А. по анализу выпавших из связки алмазных зерен, когда с увеличением глубины шлифования количество выпавших зерен с площадками износа (что соответствует уменьшению параметра  $\eta$ ) уменьшается.

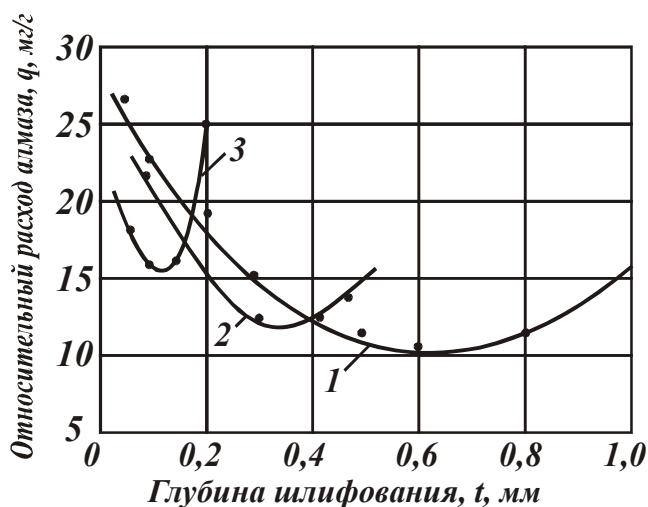


Рис. 1.13. Зависимость относительного расхода алмаза  $q$  от глубины шлифования  $t$ : обрабатываемый материал ВК15; круг – 1А1 300х25 АС6 250/200 М1-02 4;  $V_{кр} = 35$  м/с;  $S_{\delta} = 0,9$ ; 1 -  $V_{заг} = 1$  м/мин; 2 -  $V_{заг} = 3$  м/мин; 3 -  $V_{заг} = 6$  м/мин.

Второй важной особенностью зависимости (1.20) является ее экстремальность. Нетрудно видеть, что при изменении параметров режима шлифования  $V_{заг}$  и  $t$  с учетом зависимости (1.14) функция  $q$  проходит точку минимума. Следовательно, существует экстремальное значение  $\eta$ , которое для  $n = 0,75$  равно  $\eta_{экстр} = 0,88$ .

Приведенные на рис. 1.13 экспериментальные зависимости  $q - t$  для различных значений скорости заготовки  $V_{заг}$  при круглом наружном шлифовании хорошо согласуются с результатами аналитических исследований. Так, с увеличением  $V_{заг}$  минимум функции  $q$  увеличивается, а экстремальная глубина шлифования смещается в область меньших значений  $t$ , что свидетельствует о возможности снижения  $q$  в условиях глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью заготовки.

Экспериментально установлено, что в точках минимума относительного расхода алмаза, независимо от параметров режима шлифования, величина линейного износа зерна принимает практически одно значение, равное приблизительно  $\eta = 0,88$ .

Теоретически установлено, что аналогично относительному расходу алмаза  $q$ , по экстремальной зависимости при условии  $P = const$  с увеличением  $t$  изменяется себестоимость обработки  $C$ , представленная в безразмерных величинах:

$$\frac{C}{C_{экстр}} = \frac{0,34}{\left[ \alpha_1^{0,5} \cdot (1 - 0,12 \cdot \alpha_1^{1,25} \cdot \alpha_2^{2,5})^3 \right]} + \frac{0,5}{(\alpha_1 \cdot \alpha_2)}, \quad (1.21)$$

где  $\alpha_1 = \frac{t}{t_{экстр}}$ ,  $\alpha_2 = \frac{V_{заг}}{V_{заг_{экстр}}}$ .

Минимум себестоимости обработки достигается при  $\eta=0,76$ . Данное теоретическое решение соответствует многочисленным экспериментальным данным, приведенным в научно-технической литературе, согласно которым себестоимость обработки с увеличением глубины шлифования проходит точку минимума. Этим доказано, что экстремум себестоимости обработки обусловлен изменением параметра  $\eta$  при условии  $P = const$ .

Установлено также, что экстремальные безразмерные значения себестоимости обработки, относительного расхода алмаза и соответствующие им значения глубины шлифования отличаются лишь постоянными множителями. Следовательно, оптимизация параметров процесса шлифования сводится к определению оптимального значения  $\eta$  в соответствии с зависимостью

$$\eta = 1 - 0,12 \cdot \alpha_0^{1,25}, \quad (1.22)$$

где  $\alpha_0 = \alpha_1 \cdot \alpha_2^2$ .

Зная оптимальное значение  $\eta$ , по приведенным расчетным зависимостям определяются остальные параметры шлифования. При этом величину  $P$  следует принимать равной нагрузке, при которой происходит раздавливание алмазного зерна (по данным справочной литературы). Это позволит реализовать условие равенства “трех сил” и повысить производительность обработки.

Прочность обрабатываемого материала учитывается параметром  $\sigma_{сж}$  (взятым из справочной литературы) или с использованием параметра  $A$ , установленного расчетно-экспериментальным путем.

Таким образом, в работе разработано два подхода к расчету параметров шлифования: “чисто” аналитический с использованием справочных данных  $P$ ,  $\sigma_{сж}$  и приближенный, требующий предварительного определения параметра  $A$ .

Полученные решения о переменности параметра  $\eta$  и постоянстве параметра  $P$  при шлифовании позволили выявить, обосновать и реализовать условия существенного повышения производительности

алмазного шлифования. Для этого определена максимально возможная производительность обработки, обусловленная прочностными свойствами рабочей поверхности круга, т.е. при фиксированной (предельной) площади поперечного сечения среза отдельным зерном  $S = 0,5 \cdot \psi \cdot H_{max}^2 \cdot \frac{(1+\eta)}{(1-\eta)}$  и  $\eta=0$ . Значения параметра  $\psi$ , определяющего процент работающих зерен, приведены в табл. 1.12.

Таблица 1.12

Расчетные значения  $\psi$  при  $H_{max}=10 \cdot 10^{-6}$  м

$t \cdot 10^{-6}$ , м	1	5	10	50	100
$\psi$ , %	6,65	15,25	43,19	44,0	44,0

$$Q = \frac{\sqrt{2} \cdot m \cdot V_{кр} \cdot B}{450 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3} \cdot \sqrt{\frac{t}{\rho}} \cdot \left[ \frac{H_{max}^3}{2 \cdot \sqrt{t_{nT}}} + \sum_{i=0}^{n-2} t_{iT}^{5/2} \right], \quad (1.23)$$

$$V_{заг} = \frac{Q}{B \cdot t}, \quad (1.24)$$

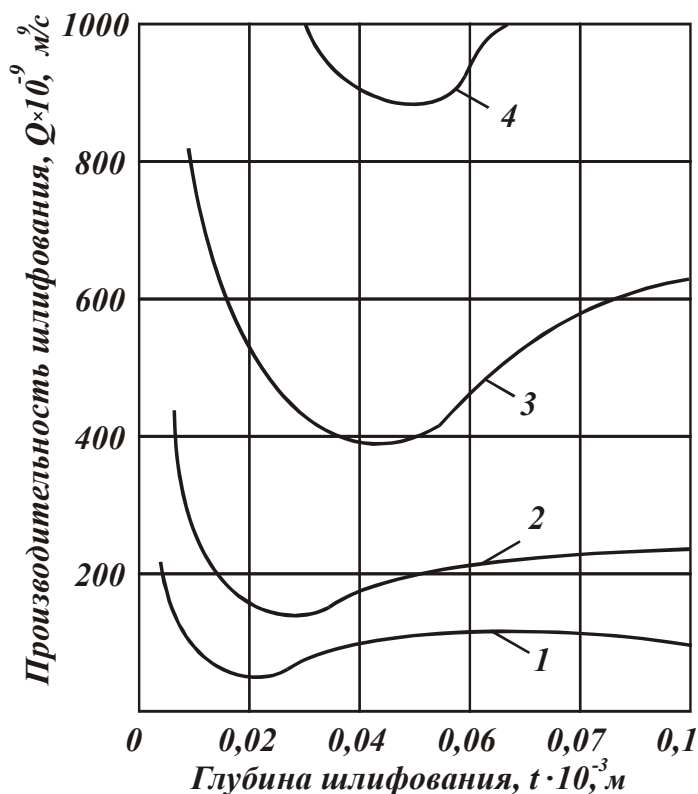


Рис. 1.14. Зависимость производительности шлифования  $Q$  от глубины шлифования  $t$ . Исходные данные:  $m = 100$ ;  $\bar{X} = 0,2 \cdot 10^{-3}$  м;  $B = 22,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $\rho = 17$  м<sup>-1</sup>;  $V_{кр} = 30$  м/с; 1 -  $S = 400$  мкм; 2 -  $S = 900$  мкм; 3 -  $S = 1600$  мкм; 4 -  $S = 2500$  мкм.

где  $B$  - ширина круга, м;  
 $\rho = \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{заг}}$ ;  $R_{кр}$ ,  $R_{заг}$  - соответственно радиусы круга и заготовки, м;  
 $t_{iT} = t_T + i \cdot t$ ;  
 $t_{nT} = t_T + (n-1) \cdot t$ ;  $t_T$  - координата текущей элементарной оболочки, которыми условно представлен снимаемый припуск, м;  $n$  - число проходов круга.

Теоретически установлено, что в общем случае производительность обработки  $Q$  с увеличением глубины шлифования  $t$  изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума, рис. 1.14. Скорость заготовки при этом



непрерывно уменьшается. Доказано, что в точке минимума  $Q$  глубина шлифования  $t$  равна параметру  $H_{max}$ . Это соответствует переходу от схемы многопроходного ( $t < H_{max}$ ) к схеме традиционного глубинного шлифования ( $t > H_{max}$ ).

С физической точки зрения минимум производительности обработки  $Q$  при условии  $S = const$  обусловлен существованием самой короткой по длине стружки  $\Delta l$  (рассматривая производительность обработки пропорциональной  $S \cdot \Delta l$ ), поскольку с увеличением и уменьшением глубины шлифования  $t$ , начиная со значения  $t = H_{max}$ , длина стружки  $\Delta l$  возрастает. В первом случае – за счет увеличения длины дуги контакта круга с заготовкой, во втором случае – за счет увеличения скорости заготовки  $V_{заг}$ .

Проведенный анализ известных методов алмазного и абразивного шлифования показал, что все они, как правило, реализуют условие  $t = H_{max}$ , т.е. минимум производительности обработки  $Q$ . Очевидно, для абразивного шлифования это эффективно, т.к. за счет действия на зерна больших нагрузок обеспечивается режим интенсивного самозатачивания круга и поддерживается его высокая режущая способность. Для алмазного шлифования это условие приводит к повышенному износу круга, что, собственно, и предопределяет низкую эффективность применения алмазных кругов при высокопроизводительном шлифовании и нецелесообразность их использования взамен обычных абразивных кругов при съеме больших припусков.

Полученная экстремальная зависимость  $Q - t$  определяет кинематические условия существенного повышения производительности обработки, состоящие в реализации новых соотношений между параметрами  $t$  и  $H_{max}$  ( $t < H_{max}$ ,  $t > H_{max}$ ), т.е. в реализации левой и правой ветвей зависимости, рис. 1.14.

На этой основе разработаны новые способы шлифования, реализующие левую ветвь зависимости  $Q - t$ . Они базируются на применении схем многопроходного (рис. 1.15,а) и глубинного (рис. 1.15,б) круглого наружного шлифования с относительно большой скоростью заготовки, близкой к скорости круга; схема глубинного круглого наружного шлифования периферией круга с относительно небольшой скоростью заготовки и большой продольной подачей (рис. 1.15,в); схема глубинного круглого наружного шлифования с относительно небольшой скоростью заготовки и дополнительными тангенциаль-

ными высокочастотными движениями круга большой амплитуды (рис. 1.15,г); схема глубинного плоского торцевого шлифования с использованием дополнительных высокочастотных колебательных движений круга или заготовки в направлении, перпендикулярном направлению подачи круга (рис. 1.15,д).

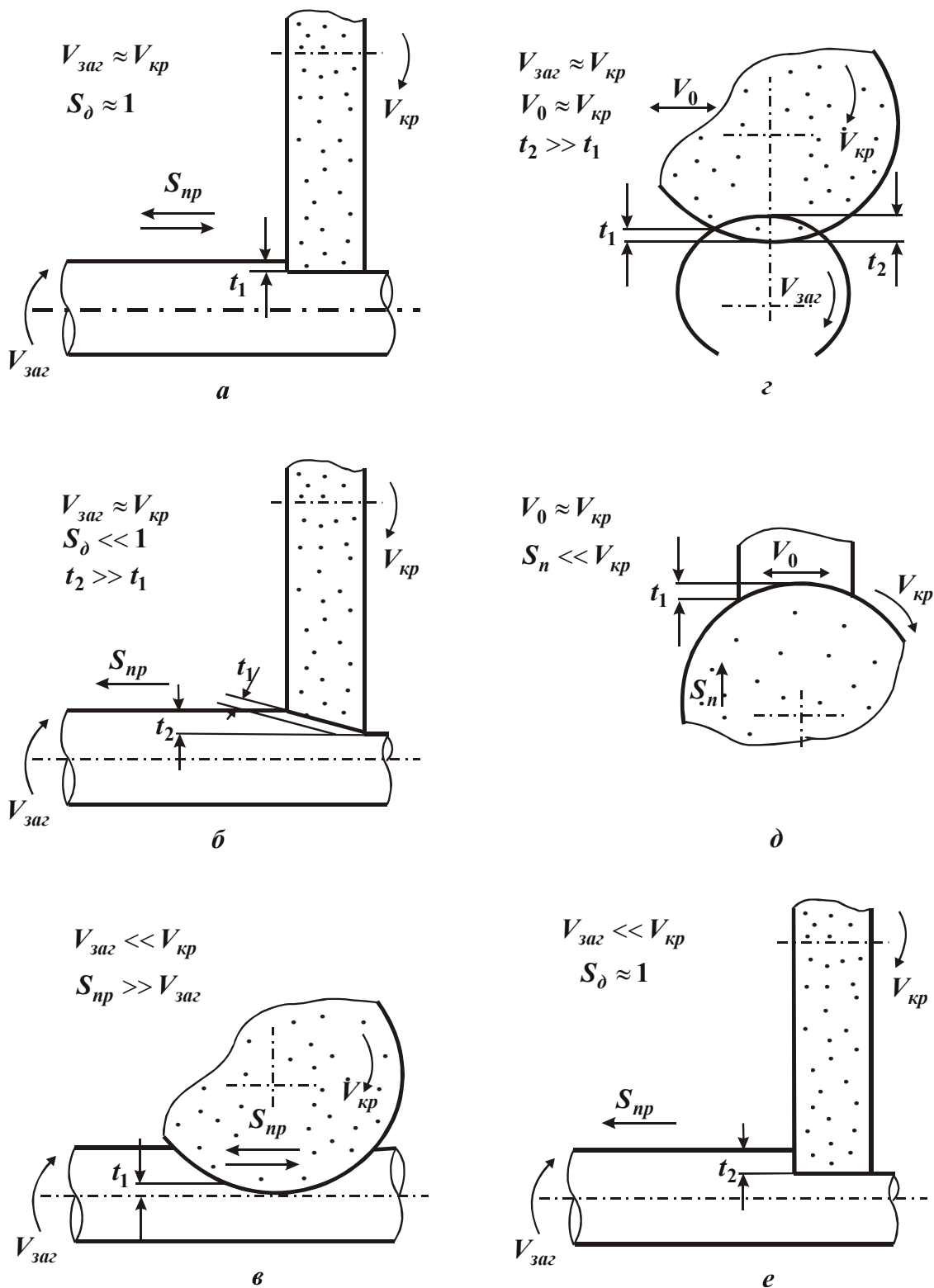


Рис. 1.15. Высокопроизводительные способы шлифования.

Установлено, что эффективность шлифования в данном случае обусловлена прохождением зерен почти “след в след” и возможностью увеличения  $H_{max}$  при фиксированном значении  $S$  (т.е. нагрузки, действующей на зерно), что позволяет обработку вести с большой скоростью круга  $V_{кр}$ , до 600 м/с и выше. Применение таких условий обеспечит увеличение производительности обработки в 10 раз и более, что хорошо согласуется с опытом зарубежных станкостроительных фирм, которые вышли на создание шлифовальных станков со скоростью круга до 300 м/с.

Реализация предложенных схем шлифования требует создания новых станков, обеспечивающих большие скорости круга и заготовки. Это позволит кардинально изменить содержание шлифовальных операций.

Основной кинематической схемой, реализующей правую ветвь зависимости  $Q - t$ , является глубинное круглое шлифование с относительно небольшой скоростью заготовки и продольной подачей, близкой к высоте круга, рис. 1.15,е. Эффективность схемы обусловлена, прежде всего, увеличением глубины шлифования  $t$  и, соответственно, площади контакта круга с обрабатываемым материалом:

$$Q = \frac{B \cdot m \cdot V_{кр}}{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3} \cdot \sqrt{\frac{t}{\rho}} \cdot (1 - \eta)^{\frac{(2n-1)}{(2-n)}} \cdot \left(\frac{P}{A}\right)^{\frac{3}{(2-n)}}, \quad (1.24)$$

$$V_{заг} = \frac{m \cdot V_{кр}}{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{t \cdot \rho}} \cdot (1 - \eta)^{\frac{(2n-1)}{(2-n)}} \cdot \left(\frac{P}{A}\right)^{\frac{3}{(2-n)}}. \quad (1.25)$$

Например, при съеме припуска величиной до 50 мм за один проход круга, т.е. увеличении глубины шлифования  $t$  в 1000...5000 раз по сравнению с обычным многопроходным шлифованием, производительность обработки в соответствии с зависимостью (1.24) может быть увеличена в 30...70 раз. Это хорошо согласуется с опытом применения глубинного абразивного шлифования – достигнута производительность обработки  $Q = 10000 \text{ мм}^3/(\text{мин} \cdot \text{мм})$ , по данным Ящерицына П.И.

Эффективность схемы обусловлена также реализацией более высоких значений величины нагрузки, действующей на отдельное зерно круга  $P$ , и снижением параметра  $\eta \rightarrow 0$  (определяющих физические условия повышения производительности обработки). Это обеспечивается применением прочных алмазных зерен и металличе-

ских связок кругов, эффективных методов электроэрозионной и электрохимической правки, позволяющих поддерживать на рабочей поверхности алмазного круга развитый режущий рельеф.

Шлифование с заданным оптимальным значением  $\eta$  (определяемым экономически обоснованным расходом алмаза) достигается за

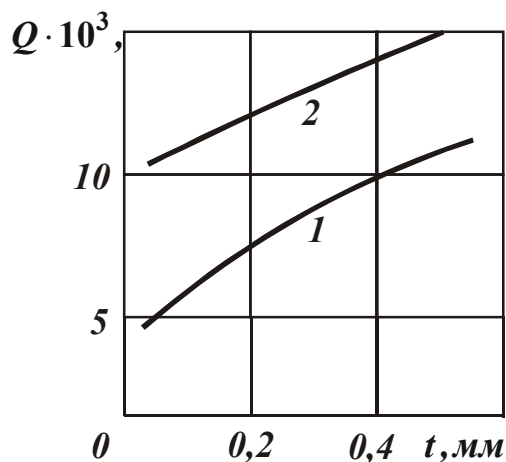


Рис. 1.16. Зависимость производительности обработки  $Q$  от глубины шлифования  $t$ : обрабатываемый материал – РК8; круг – 1А1 300х25 АС6 250/200 М1-02 4;  $V_{кр} = 35$  м/с;  $S_d = 0,9$ ; 1 – скорость линейного износа круга  $h_L = 0,005$  м/мин; 2 – скорость линейного износа круга  $h_L = 0,01$  мм/мин.

счет установления скорости заготовки  $V_{заг}$  в соответствии с зависимостью (1.25) и электрических параметров электроэрозионной правки круга из условия  $P_z = const$  (или  $N = const$ ) по зависимости (1.14).

Теоретические результаты подтверждены экспериментально, рис. 1.16. С увеличением глубины шлифования  $t$  (при постоянной скорости линейного износа круга, что соответствует приблизительно одному значению нагрузки, действующей на зерно) производительность обработки увеличивается. Этим показано, что эффект глубинного шлифования состоит в возможности более интенсивного увеличения  $t$  по сравнению с уменьшением  $V_{заг}$ , в результате чего их произведение  $t \cdot V_{заг}$ , определяющее произ-

водительность обработки  $Q$ , увеличивается.

В зарубежной научно-технической литературе эффект увеличения  $Q$  связывают не с интенсификацией режимов шлифования, а с уменьшением вспомогательного времени (в связи с уменьшением числа проходов круга и т.д.), т.е. глубинное шлифование рекомендуется выполнять таким образом, чтобы увеличение  $t$  было пропорционально уменьшению скорости заготовки  $V_{заг}$ . В результате этого их произведение  $t \cdot V_{заг}$  остается такой же величиной, как и при обычном многопроходном шлифовании. Очевидно, такой подход не позволяет в полной мере реализовать высокие потенциальные возможности глубинного шлифования.

Предложенная в работе схема круглого наружного глубинного алмазного шлифования положительно отличается от известной схемы

глубинного шлифования, разработанной в Институте сверхтвердых материалов НАН Украины, согласно которой продольную подачу  $S_{np}$  уменьшают пропорционально увеличению глубины шлифования  $t$ , а скорость заготовки  $V_{заг}$  оставляют такой же, как и при многопроходном шлифовании. Исходя из зависимости

$$H_{max} = \left[ \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3}{m \cdot V_{кр}} \cdot \left( \frac{V_{заг} \cdot Q \cdot \rho}{B} \right)^{0,5} \right]^{0,33}, \quad (1.26)$$

добиться увеличения  $Q = S_{\partial} \cdot B \cdot V_{заг} \cdot t$  (где  $S_{\partial}$  - долевая продольная подача) при фиксированном значении максимальной толщины среза  $H_{max}$  (определяющей при глубинном шлифовании нагрузку, действующую на зерно) можно за счет уменьшения скорости заготовки  $V_{заг}$  и соответственно продольной подачи  $S_{np}$ . Следовательно, применение глубинного круглого наружного шлифования с относительно большой скоростью заготовки  $V_{заг}$  малоэффективно, поскольку это ведет к повышенному износу алмазного круга, т.е. скорость заготовки при глубинном шлифовании необходимо уменьшать.

Выполненные исследования показали, что одним из основных ограничений применения предложенной схемы глубинного шлифования может быть повышенная теплонапряженность процесса вследствие увеличения теплового потока (за счет увеличения производительности обработки  $Q$ ) и уменьшения скорости перемещения теплового источника (т.е. уменьшения скорости заготовки  $V_{заг}$ ). В связи с этим, определена максимально возможная производительность обработки  $Q$  и реализующие ее параметры режима шлифования с учетом ограничения по температуре резания  $\theta$ :

$$Q = \frac{0,074 \cdot B \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot \theta^2 \cdot (1 - \eta)^{1,8}}{A^2 \cdot \psi^2 \cdot t^{0,5} \cdot \rho^{0,5}} \cdot \left( \frac{P}{A} \right)^{1,2}, \quad (1.27)$$

$$V_{заг} = \frac{Q}{B \cdot t}, \quad (1.28)$$

$$V_{кр} = \frac{330,6 \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho_m \cdot \bar{X}^3 \cdot \theta^2 \cdot (1 - \eta)^{0,2}}{m \cdot A^2 \cdot \psi^2 \cdot t} \cdot \left( \frac{A}{P} \right)^{1,2}, \quad (1.29)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м · К);  $c$  - удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг · К);  $\psi$  - коэффициент, показывающий, какая часть работы пе-

переходит в теплоту, поглощаемую заготовкой.

Из зависимости (1.27) следует, что с увеличением глубины шлифования  $t$  (при условиях  $\theta = const$  и  $P = const$ ) производительность обработки  $Q$  уменьшается. Компенсировать уменьшение  $Q$  можно за счет снижения параметра  $\eta \rightarrow 0$  и увеличения нагрузки  $P$ , действующей на зерно, поскольку эти два параметра входят в зависимость (1.27) с большей степенью, чем глубина шлифования  $t$ .

Важным условием повышения производительности обработки  $Q$  при глубинном шлифовании следует так же рассматривать уменьшение скорости круга  $V_{кр}$  в соответствии с зависимостью (1.29) в связи с увеличением параметров  $t$  и  $P$ . Поэтому для поддержания  $V_{кр}$  на традиционном уровне 30...50 м/с необходимо увеличивать зернистость и уменьшать концентрацию круга, что хорошо согласуется с практикой абразивного глубинного шлифования, основанного на применении крупнозернистых высокопористых кругов.

Расчетами установлено, что при выполнении данных условий температура резания находится на уровне 300°C. Необходимо отметить, что основной эффект уменьшения температуры резания обусловлен уменьшением параметра  $\eta$  за счет применения эффективных методов электроэрозионной и электрохимической правки круга. Выполненные рентгенографические исследования обработанных поверхностей твердых сплавов показали, что при глубинном алмазном шлифовании с непрерывной правкой круга и использовании оптимальных режимов резания в поверхностном слое заготовки формируются благоприятные сжимающие напряжения, т.е. роль теплового фактора в процессе незначительна, доминирует силовой фактор.

Для снижения температуры резания (без уменьшения производительности обработки  $Q$  и увеличения относительного расхода алмаза  $q$ ) в работе предложен новый способ глубинного прерывистого шлифования, согласно которому длину впадины прерывистого круга  $l_2$  принимают в 2...6 раз больше длины рабочего выступа круга  $l_1$ , а скорость заготовки  $V_{заг}$  и глубину шлифования  $t$  устанавливают в соответствии с зависимостями:

$$V_{заг} = \frac{V_{заг0}}{\left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right)^2}, \quad (1.30)$$

$$t = t_0 \cdot \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right)^2, \quad (1.31)$$

где  $V_{заг0}$ ,  $t_0$  - оптимальные значения  $V_{заг}$  и  $t$  для сплошного круга той же характеристики, что и прерывистый круг.

Для реализации данного способа скорость заготовки  $V_{заг}$  необходимо уменьшать, а глубину шлифования  $t$  – увеличивать, т.е. чем больше  $t$ , тем больше  $l_2$  и выше эффект шлифования.

Предложенная выше схема глубинного алмазного шлифования с относительно небольшой скоростью заготовки обеспечивает шероховатость обработки в пределах  $R_a < 1,25$  мкм. Причем, чем больше глубина шлифования при условии  $H_{max} = const$ , тем меньше параметр шероховатости обработки  $R_a$ , определяемый в соответствии с зависимостью

$$R_a = 0,2 \cdot H_{max} \cdot \left(\frac{H_{max}}{4 \cdot t}\right)^{0,2}. \quad (1.32)$$

Таким образом, показано, что наряду с повышением производительности обработки и снижением относительного расхода алмаза при заданной температуре резания, предложенный процесс глубинного алмазного шлифования позволяет обеспечить улучшение шероховатости обработки.

Принимая в качестве невзаимосвязанных параметров скорость заготовки и прочность алмазного зерна, аналитически определена максимально возможная производительность обработки с учетом ограничений по шероховатости  $R_a$  и точности  $\delta$  обработки

$$Q = \frac{2,16 \cdot V_{кр} \cdot c \cdot K_{ш} \cdot \delta}{A} \cdot R_a^{0,62} \cdot t^{0,128}, \quad (1.33)$$

где  $c$  - приведенная жесткость технологической системы, Н/м.

Из приведенной зависимости следует, что для обеспечения заданных значений  $R_a$  и  $\delta$  с целью реализации максимально возможной производительности обработки, глубину шлифования следует увеличивать, поддерживая соответствующие соотношения между другими параметрами режима шлифования.

Полученное выше теоретическое решение об экстремальности себестоимости обработки использовано для определения максимально возможной производительности обработки с учетом ограничения по мощности резания  $N$ :

$$Q = \frac{0,042 \cdot N}{A} \cdot \left( \frac{P}{A} \right)^{0,6} \quad (1.34)$$

Как следует из зависимости (1.34), производительность обработки  $Q$  в явном виде не зависит от параметров режимов шлифования, определяется лишь параметрами  $N$ ,  $P$  и  $A$ . Два первых параметра выполняются за счет установления скорости заготовки  $V_{заг}$  и глубины шлифования  $t$  в соответствии с зависимостями:

$$V_{заг} = \frac{7,64 \cdot A \cdot B}{N \cdot \rho} \cdot \left( \frac{m \cdot V_{кр} \cdot P^2}{630\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot A^2} \right) \cdot \left( \frac{P}{A} \right)^{0,2}, \quad (1.35)$$

$$t = \frac{0,0055 \cdot N^2 \cdot \rho}{A^2 \cdot B^2} \cdot \left( \frac{630\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot A^2}{m \cdot V_{кр} \cdot P^2} \right) \cdot \left( \frac{P}{A} \right)^{0,4}. \quad (1.36)$$

Из зависимости (1.36) следует важный вывод, связанный с тем, что повышение прочностных свойств круга с точки зрения повышения производительности обработки менее эффективно, чем увеличение мощности станка. При этом установлено, что максимальные значения  $Q$  изменяются в пределах  $(0,3...60) \cdot 10^3$  мм<sup>3</sup>/мин с учетом  $N=(1...10) \cdot 10^3$  Вт,  $P=1...5$  Н,  $A=(5...20) \cdot 10^5$  Н/м<sup>1,25</sup>. Этим доказана возможность в 2...5 раз повышения производительности обработки, используя новые соотношения параметров режима шлифования, определяемые зависимостями (1.35) и (1.36).

Достоверность установленных в работе теоретических решений проверялась на различных операциях алмазного шлифования и заточки твердосплавных инструментов в лабораторных и производственных условиях. В результате достигнута высокая производительность обработки при круглом наружном шлифовании – 20...30 тыс. мм<sup>3</sup>/мин и более при экономически обоснованном расходе алмаза (в пределах 5 мг/г) и высоком качестве обработанных поверхностей. Это позволяет эффективно использовать алмазные круги как на операциях окончательного, так и предварительного шлифования труднообрабатываемых материалов при съеме больших припусков.

На основе проведенных исследований разработаны высокопроизводительные процессы глубинного алмазного шлифования, в том числе с использованием электроэрозионной правки круга, применительно к обработке твердосплавных и быстрорежущих инструментов и штампов, высокопрочных графитов и ферритов, других труднообрабатываемых материалов. В частности, разработан высокопроизво-



длительный процесс глубинного алмазного круглого наружного шлифования твердосплавных и быстрорежущих многолезвийных инструментов с режимами резания:  $t=0,1\dots 1,0$  мм;  $V_{заг} = 0,5\dots 5,0$  м/мин;  $S_{\delta} \approx 1,0$ .

Рекомендуется использовать алмазные круги, в том числе крупногабаритные диаметром 500 мм, на относительно “мягких” металлических связках типа М1-01 и на более прочных металлических связках типа М2-01 (в режиме непрерывной электроэрозионной правки).

## 1.6. ОБЛАСТИ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Подводя итоги по результатам исследований, можно сделать некоторые выводы практического содержания. Общеизвестно, что на протяжении длительного периода времени развитие станкостроения в области создания шлифовальных станков шло преимущественно в направлении совершенствования технологических процессов шлифования за счет применения новых абразивных материалов, управления процессом шлифования путем введения в зону резания или автономно различной дополнительной энергии, создания новых технических решений по конструктивному исполнению станка и т.д. Естественно, все это позволило добиться определенного повышения эффективности шлифования. Вместе с тем, как показано выше, существуют весьма значительные резервы шлифования, которые до настоящего времени практически не использовались. Такими резервами являются возможности применения новых способов шлифования, реализующих новые нетрадиционные диапазоны изменения параметров режимов шлифования и их соотношений, определяемых условиями  $t < H_{max}$  и  $t > H_{max}$ . Об эффективности применения новых диапазонов режимов шлифования свидетельствует тот факт, что практически все существующие шлифовальные станки, независимо от вида шлифования, реализуют (как показано в предыдущем параграфе) условие  $t \cong H_{max}$ , соответствующее минимальной производительности обработки, тогда как максимум производительности достигается при  $t < H_{max}$  и  $t > H_{max}$ .

Таким образом, переход в область новых диапазонов изменения параметров режимов шлифования и их соотношений, т.е. применение

новых кинематических схем шлифовальных станков, открывает широкие перспективы в станкостроении.

На наш взгляд, значительными возможностями в этом плане располагает реализация условия шлифования  $t < H_{max}$ , которое предполагает применение чрезвычайно больших скоростей круга и заготовки, а соответственно и новых соотношений подач и глубин шлифования. Реализация в конструкциях шлифовальных станков этого условия позволит до 10 раз и выше увеличить производительность обработки при одновременном обеспечении высокого качества обработки поверхностей. Причем, как показано в параграфе 1,5, условие  $t < H_{max}$  может быть реализовано практически для всех групп шлифовальных станков и видов шлифовальных работ, что свидетельствует об универсальности полученного решения.

Не менее важно значение полученных технических решений, вытекающих из условия  $t > H_{max}$ . Необходимо отметить, что частично условие  $t > H_{max}$  использовано в существующих шлифовальных станках. Однако широкого распространения реализация условия  $t > H_{max}$  на практике не получила, что связано с отсутствием в настоящее время конкретных эффективных технических решений и достаточных сведений и технологических возможностях шлифования в случае  $t > H_{max}$ .

Полученные решения позволили впервые в системном виде оценить возможности такого шлифования и подойти к разработке высокопроизводительных процессов шлифования кругами из СТМ, реализующих условие  $t > H_{max}$ . При этом показано, что наиболее полно возможности шлифования для случая  $t > H_{max}$  могут быть использованы в условиях глубинного шлифования с фиксированным тангенциальным усилием. Сделанный вывод указывает на целесообразность создания станков для глубинного шлифования с фиксированным тангенциальным усилием.

Таким образом, основной областью эффективного применения результатов исследований следует рассматривать станкостроение – разработку и создание новых шлифовальных станков, основанных на применении установленных нетрадиционных кинематических схем станков.

Второй, весьма эффективной областью применения полученных теоретических решений, необходимо рассматривать создание новых циклов шлифования, реализованных в виде программного обеспечения

для станков с числовым программным управлением, включающих непрерывную диагностику процесса и управление внутренними (физическими) параметрами обработки, которые наиболее ответственны за формирование выходных технологических параметров шлифования. Перспективность создания таких циклов обусловлена тем, что применяемые в современных станках циклы шлифования весьма далеки от оптимальных. Во-первых, это связано с тем, что в них не предусмотрено выполнение условия равенства “трех сил” (силы резания при врезании, силы резания при черновом шлифовании и упруго-восстанавливающей силы технологической системы); во-вторых, отличие в 4...5 раз радиальной подачи на этапе врезания и на этапе чернового шлифования не компенсируется изменением других режимных параметров; в-третьих, в связи с затуплением круга отсутствует изменение одного из параметров режима шлифования с целью обеспечения в процессе шлифования заданной температуры резания, шероховатости обработки и т.д.; в-четвертых, отсутствует возможность активного контроля в процессе шлифования температуры резания и соответственно отсутствует возможность управления процессом шлифования; в-пятых, отсутствует возможность контроля в процессе шлифования величины нагрузки, действующей на режущие зерна, что не позволяет в максимальной степени использовать предельные (прочностные) возможности рабочей поверхности круга; в-шестых, основная часть припуска снимается по схеме многопроходного шлифования, которая характеризуется сравнительно низкой производительностью обработки.

Разработка новых циклов шлифования позволяет устранить указанные недостатки.

Это достигается, во-первых, тем, что в основу разработки циклов положена новая методология аналитического расчета оптимальных условий шлифования с учетом всех основных ограничений обработки: сил и мощности резания, производительности, шероховатости и точности обработки, себестоимости обработки, температуры резания и износа круга. Здесь, пожалуй, впервые удалось увязать аналитически все основные технологические показатели обработки с характеристиками круга и заготовки (включая физико-механические свойства зерен, связки и обрабатываемого материала), а также со всеми параметрами режима резания и характеристиками технологической системы. Причем, разработанные алгоритмы расчетов охватывают все виды шлифования: круглое (продольное и врезное), наруж-

ное и внутреннее шлифование, плоское шлифование, заточку инструмента (по упругой и жесткой схемам) торцом и периферией круга, прерывистое, вибрационное шлифование и т.д.

Во-вторых, разработка новых высокопроизводительных циклов стала возможной благодаря установлению новых закономерностей глубинного (однопроходного) шлифования, в максимальной степени реализуемых на основе активного контроля ряда параметров (силы резания или мощности шлифования) и по их изменению – управления параметрами режима шлифования (радиальной подачей, скоростью заготовки и т.д.).

Применение таких циклов открывает возможности в 2...10 раз повысить производительность обработки (при требуемом качестве обработки) по сравнению с существующими циклами шлифования. Эффект обработки, в частности, от применения цикла глубинного шлифования, достигается, во-первых, за счет концентрации этапов, во-вторых, за счет чрезвычайно важных особенностей глубинного шлифования – возможности снижения нагрузок, действующих на зерна, и интенсификации обработки, а также получения шероховатости обработки, соответствующей условиям чистового шлифования.

Необходимо отметить, что разработка таких циклов шлифования стала возможной еще и благодаря созданию метода диагностики процесса, когда по экспериментально установленной силе резания появляется возможность пересчетом в системе ЧПУ определить значения температуры резания, шероховатости обработки, нагрузки на зерно и т.д., а по ним – скорректировать радиальную подачу или другие параметры режима шлифования.

Для реализации разработанных циклов не требуется переоборудование шлифовального станка, достаточно в систему ЧПУ внести новое программное обеспечение, а также обеспечить непрерывное измерение в процессе шлифования силы резания и ввод установленных значений в систему ЧПУ, где по ним будет произведен перерасчет параметров режима шлифования. Таким образом, на основе данных о силе резания количественно оценивается режущая способность круга, и корректируются параметры режима шлифования и структура цикла с целью обеспечения заданных значений температуры резания, шероховатости обработки и т.д., не прибегая к экспериментальному определению этих параметров.

Преимущество такого подхода состоит еще и в том, что программное обеспечение не требует использования традиционных нор-

мативов режимов резания и других условий обработки. Система ЧПУ по “пробному” экспериментальному значению силы резания и величине снимаемого припуска может автоматически определять необходимые характеристики обрабатываемого материала и устанавливать для них оптимальные режим резания и структуру цикла.

Эффективной областью применения полученных результатов исследований следует рассматривать также полную замену малопроизводительного шлифования кругами из обычных абразивов на высокопроизводительное глубинное шлифование кругами из СТМ в условиях действующего производства. Для этого необходимо произвести модернизацию шлифовального станка с целью реализации на нем новых диапазонов параметров режимов шлифования. Оптимальные режимы шлифования и другие условия обработки устанавливаются на основе разработанной методики аналитического расчета, реализованной в автоматизированной системе оптимизации и диагностики процесса шлифования, с учетом основных ограничений обработки. Для непрерывного поддержания высокой режущей способности круга из СТМ на металлической связке, который, как правило, работает в режиме затупления, рекомендуется использовать методы электрохимической или электроэрозионной правки круга, получившие достаточно широкое применение в машиностроении.

Как показали результаты экспериментальных исследований, применение глубинного шлифования кругами из СТМ позволяет эффективно решить проблему полной обработки (заточки) твердосплавных и быстрорежущих одно- и многолезвийных инструментов при съеме относительно больших припусков (свыше 1 мм). Благодаря возможности применения схемы глубинного шлифования, при условии поддержания высокой режущей способности круга, производительность обработки может быть увеличена в 2...10 раз, в 5...10 раз снижен износ круга при обеспечении требуемого качества обработки (получение 8-9 классов чистоты обработки).

Положительные результаты получены при глубинном шлифовании деталей из технической керамики, износостойких наплавов и покрытий, инструментальных материалов, включая СТМ и т.д.

В заключение следует обратить внимание на еще один важный в практическом отношении результат исследований. В работе впервые удалось произвести количественную оценку величины нагрузки, действующей на максимально выступающее зерно, непосредственно в процессе шлифования. При этом доказано, что в установившемся

процессе шлифования указанная величина стремится принять предельное значение, соизмеримое с прочностью зерна на раздавливание или, в зависимости от вида связки, соизмеримое с прочностью удержания зерна в связке. Возможность расчетно-экспериментальным путем определения этой величины открывает важные перспективы в изыскании новых резервов шлифования. Во-первых, это создание новых кругов из СТМ, в которых может быть реализовано условие равенства прочности собственно зерен и прочности удержания их в связке, что позволит в максимальной степени использовать высокие режущие возможности СТМ. Во-вторых, это принципиально новый подход к разработке высокопроизводительных процессов шлифования такими кругами, заключающийся в установлении соотношений параметров режима шлифования, которые бы обеспечили реализацию условия примерного равенства “трех сил” – силы, действующей на максимально выступающее зерно, силы, определяющей прочность зерна на раздавливание, и силы, удерживающей зерно в связке. На структурной схеме (рис. 1.17) показаны основные направления применения результатов исследований.



Рис. 1.17. Основные направления применения результатов исследований.

Таким образом, проведенный анализ позволил определить возможные области эффективного применения результатов исследований.

## 1.7. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

### 1.7.1. ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ВЫСОКОПРОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

В настоящее время для повышения долговечности и надежности деталей машин, как при их изготовлении, так и при ремонте, широкое распространение получили высокопрочные покрытия. Номенклатура деталей, рабочие поверхности которых восстанавливаются и упрочняются покрытиями данного класса, включает сотни наименований, применяемых в металлургии, автомобильном, тракторосельхозмашиностроении и т.д. Вместе с тем, расширение областей эффективного применения покрытий в значительной степени сдерживается отсутствием эффективных технологий их обработки. Высокая твердость в сочетании со значительной пластичностью покрытий определяют плохую их обрабатываемость и практически неприемлемость для обработки традиционных методов абразивного шлифования. В особой мере это относится к шлифованию порошковых покрытий твердостью *HRC* 60-62, получивших применение при восстановлении и упрочнении деталей двигателя внутреннего сгорания: клапанов газораспределения, коленчатых валов, кулачковых валов газораспределения и др. При шлифовании таких материалов круг интенсивно изнашивается, засаливается, теряет режущую способность и требует постоянной правки, что приводит к существенному снижению производительности и качества обработки. Все это свидетельствует о необходимости разработки новых высокопроизводительных технологий обработки деталей с высокопрочными покрытиями, в особенности основанных на применении метода алмазно-искрового шлифования, эффективно используемого в настоящее время при обработке труднообрабатываемых материалов, включая твердые сплавы, высокопрочные инструментальные стали и наплавки твердостью *HRC* 45.

Установлено, что основным фактором, определяющим чрезмерно низкую эффективность шлифования деталей с покрытиями является неравномерное расположение нанесенного материала на поверхности детали (наличие чередующихся выступов и впадин). Это приводит, с одной стороны, к увеличению давлений в местах контакта круга с деталью и к интенсивному износу круга, с другой стороны – к снижению контактной жесткости взаимодействия круга с деталью. Это в сочетании с невозможностью жесткого крепления детали пред-

определяет относительно низкую производительность обработки, в частности в условиях автоматизированного цикла круглого врезного многопроходного шлифования, реализованного в современных круглошлифовальных станках типа МШ-197В.

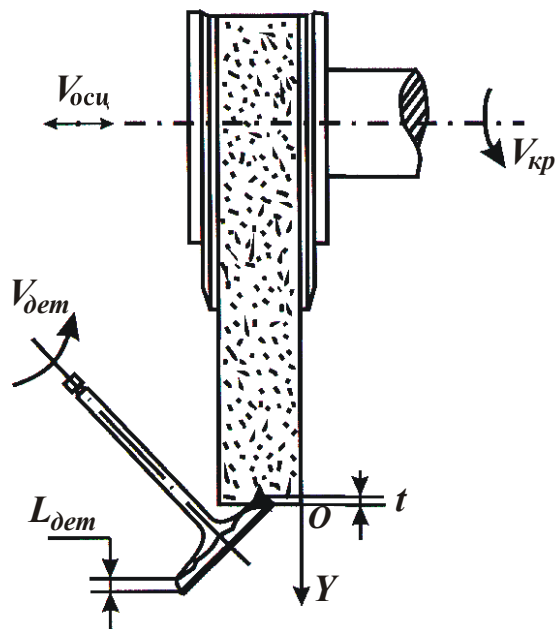


Рис. 1.18. Расчетная схема круглого наружного врезного шлифования фаски клапана.

Поэтому наиболее перспективным путем повышения эффективности обработки в таких условиях следует рассматривать применение алмазно-искрового шлифования с использованием оптимальных схем шлифования и электроэрозионной правки алмазного круга, установленных на основе оптимизационных моделей шлифования с учетом баланса перемещений в технологической системе и функциональных связей параметров алмазно-искрового шлифования.

Рассмотрим процесс круглого наружного врезного шлифования фаски клапана, восстановленной с применением покрытия ПГ-10Н-01 твердостью **HRC** 60-62.

Дифференциальное уравнение баланса перемещений, исходя из расчетной схемы (рис. 1.18), представлено в виде

$$\frac{dv}{d\tau} + M \cdot v = N \cdot \tau, \quad (1.37)$$

где

$$M = \frac{V_{кр} \cdot c \cdot K_{ш}}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}, \quad N = \frac{V_{дет} \cdot t \cdot V_{кр} \cdot c \cdot K_{ш}}{\pi \cdot D_{дет} \cdot \sigma},$$

$v$  - объем сошлифованного материала, мм<sup>3</sup>;  $\tau$  - текущее время, с;  $K_{ш}$  - коэффициент шлифования;  $V_{кр}$  - скорость круга, м/с;  $V_{дет}$  - скорость детали, м/мин;  $t$  - глубина шлифования, мм;  $c$  - приведенная жесткость технологической системы, Н/м;  $l_{дет}$  - длина детали, мм;  $D_{дет}$  - диаметр детали (мм).

Разрешая дифференциальное уравнение (1.37), определена производительность обработки в зависимости от текущего числа вращений детали (соответственно времени шлифования):



$$Q = V_{\text{дем}} \cdot t \cdot l_{\text{дем}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{V_{\text{кр}} \cdot c \cdot K_{\text{ш}} \cdot n}{l_{\text{дем}} \cdot \sigma \cdot V_{\text{дем}}}} \right), \quad (1.38)$$

где  $Q_0 = V_{\text{дем}} \cdot t \cdot l_{\text{дем}}$ .

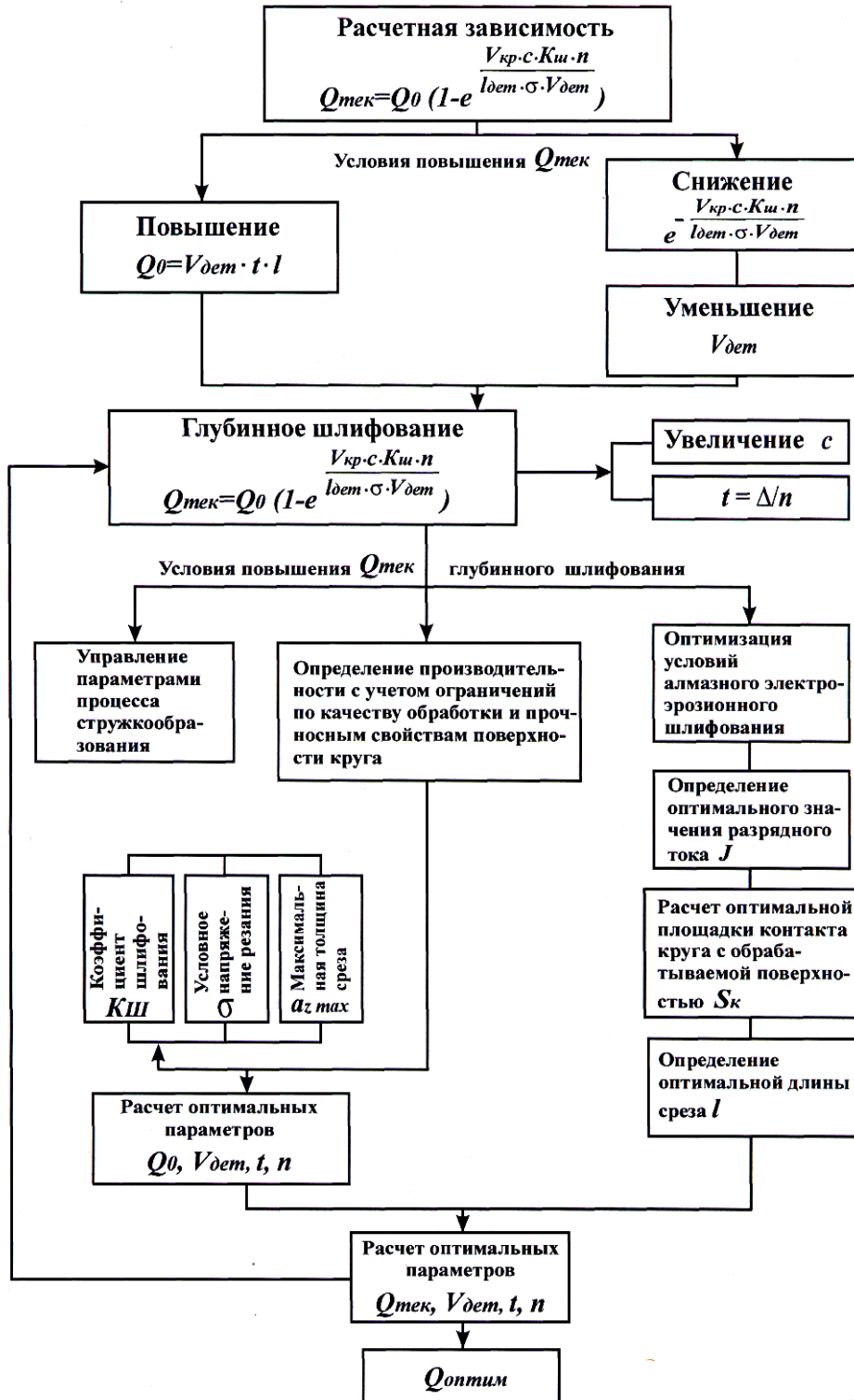
Из зависимости (1.38) следует, что в условиях неустановившегося процесса шлифования фактическая производительность обработки  $Q_{\text{тек}}$  всегда меньше номинальной производительности обработки на величину  $Q_0 \cdot \exp\left[-\frac{V_{\text{кр}} \cdot c \cdot K_{\text{ш}} \cdot n}{l_{\text{дем}} \cdot \sigma \cdot V_{\text{дем}}}\right]$ . На основе полученного решения можно сделать вывод о целесообразности повышения  $Q_{\text{тек}}$  при заданном значении  $Q_0$  путем применения автоматизированного цикла круглого врезного глубинного (однопроходного) шлифования ( $n=1$ ) с относительно небольшой скоростью детали, равной  $V_{\text{дем}} = \frac{Q_0}{l_{\text{дем}} \cdot t}$ . В этом случае съем припуска осуществляется за один оборот детали.

Из зависимости (1.38) также вытекает, что увеличить производительность обработки можно как за счет применения новых соотношений параметров режимов шлифования, так и за счет возможностей увеличения контактной жесткости взаимодействия круга с деталью, определяемой параметром  $c$ .

Для реализации условий высокопроизводительного глубинного алмазно-искрового шлифования, вытекающих из зависимости (1.38), может быть предложена схема оптимизации процесса шлифования, которая предусматривает оптимизацию соотношения параметров  $K_{\text{ш}}$  и  $\sigma$ , определение максимально возможной производительности обработки  $Q_0$  с учетом ограничений по качеству обработки, износу алмазного круга, а также с учетом оптимальных условий электроэрозионной правки круга, рис. 1.19.

Такой подход позволит в максимальной степени использовать режущие возможности алмазного круга, т.к. здесь впервые рассматриваются во взаимосвязи различные по природе параметры, характеризующие состояние технологической системы в переходном режиме, процесс стружкообразования при резании, процесс съема материала и формообразования поверхностей при шлифовании, процесс электроэрозионного воздействия на рабочую поверхность алмазного

круга и деталь.



Расчет оптимальных параметров  
 $Q_{тек}, V_{дет}, t, n$

$Q_{оптим}$

Рис. 1.19. Структурная схема алгоритма расчета максимально возможной производительности и оптимальных условий обработки.

Для раскрытия особенностей обработки покрытий твердостью **HRC** 60-62 и установления факторов, определяющих оптимальное соотношение параметров  $K_{ш}$  и  $\sigma$ , предложена математическая модель стружкообразования при резании отдельным зерном, в которой

процесс стружкообразования представлен как процесс периодического отделения элементарных объемов обрабатываемого материала под действием возникающей со стороны режущего зерна нагрузки (рис. 1.20). Снимаемый слой вследствие криволинейности переднего угла

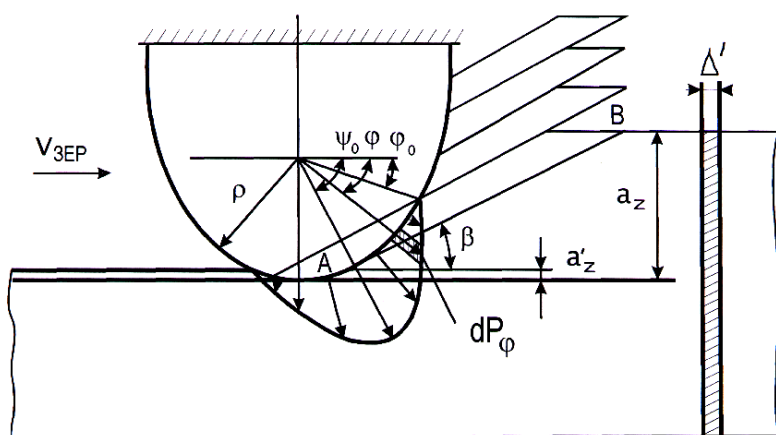


Рис. 1.20. Расчетная схема параметров процесса микрорезания единичным зерном.

режущего зерна разделен на два участка: превращаемого в стружку толщиной  $(a_z - a'_z)$  и подвергнутого лишь упругому и пластическому деформированию толщиной  $a'_z$  (где  $a_z$  - толщина среза зерном).

Условия такого разделения снимаемого слоя обрабатываемого материала описаны системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\tau_{AB}}{d\beta} = 0 \\ \tau_{AB} = \tau_{сдв} \end{cases}, \quad (1.39)$$

где  $\tau_{AB}$  - касательное напряжение, возникающее в плоскости сдвига АВ обрабатываемого материала, Н/мм<sup>2</sup>;  $\tau_{сдв}$  - предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг, Н/мм<sup>2</sup>;  $\beta$  - угол сдвига материала;

$$\tau_{AB} = \frac{P_{AB}}{S_{AB} \cdot v} = \frac{c' \cdot \rho \cdot \sin \beta}{[a_z - \rho \cdot (1 - \cos \beta)]} \times \left[ 1 - \sin(\varphi_0 + \beta) \cdot \left( 1 + \ln \left| \frac{1}{\sin(\varphi_0 + \beta)} \right| \right) \right],$$

$S_{AB} = \frac{a_z - a'_z}{\sin \beta}$  - длина плоскости сдвига АВ;  $a'_z = \rho \cdot (1 - \cos \beta)$ ;  $\rho$  - радиус округления вершины зерна, мм;  $v$  - ширина резания, мм;  $P_{AB}$  - суммарная нагрузка, действующая в плоскости сдвига АВ, Н;  $c'$  - параметр, характеризующий прочностные свойства обрабатываемого материала, Н/мм<sup>3</sup> (например, для обрабатываемого материала покры-

тия ПГ-10Н-01  $c'_{покр} = 1,52 \cdot 10^6$  Н/мм<sup>3</sup>; для обрабатываемого твердого сплава ВК8  $c'_{мс} = 8,72 \cdot 10^6$  Н/мм<sup>3</sup>);  $\varphi_0$  - угол контакта зерна с обрабатываемым материалом.

Уравнения (1.39) содержат две независимые переменные  $\varphi_0$  и  $\beta$ .

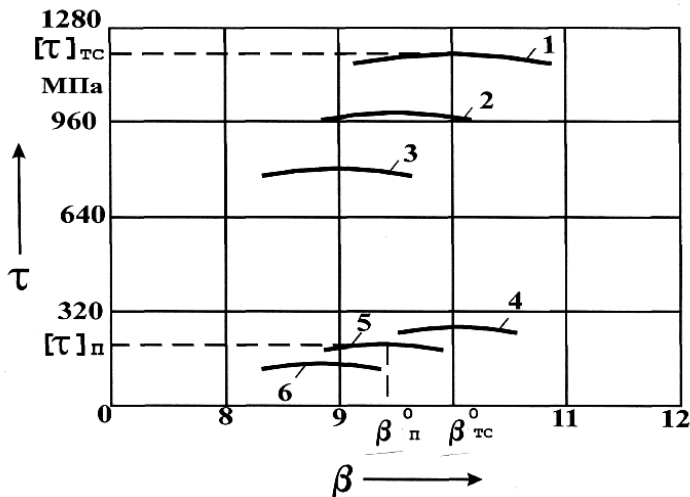


Рис. 1.21. Изменение касательного напряжения  $\tau_{AB}$  в плоскости сдвига от угла сдвига  $\beta$ : 1, 2, 3 – обрабатываемый материал твердый сплав ВК8; 4, 5, 6 – обрабатываемый материал покрытие ПГ-10Н-01; 1, 2, 3 -  $\varphi_0 = 41^\circ, 43^\circ, 46^\circ$ ; 4, 5, 6 -  $\varphi_0 = 41^\circ, 43^\circ, 46^\circ$ ;  $a_z = 20$  мкм;  $\rho = 25$  мкм.

Первое уравнение определяет условие экстремума касательного напряжения в плоскости сдвига  $\tau_{AB}$  в зависимости от угла сдвига  $\beta$ , рис. 1.21.

На основе решения системы уравнений (1.39) установлено, что сравниваемые материалы: высокопрочное покрытие и твердый сплав в одинаковой мере характеризуются плохой обрабатываемостью, а параметры, описывающие процесс:  $K_{ш}$ ,  $\sigma$ ,  $\varphi_0$ ,  $\beta$ ,  $a'_z$ , для обоих материалов имеют сходные значения, хотя по прочностным характеристикам они отличаются.

Анализ процесса микрорезания показал, что важными параметрами, влияющими на обрабатываемость заданного материала, являются угол сдвига  $\beta$  и толщина слоя  $a'_z$ , который не срезается, а лишь подвергается упругому и пластическому деформированию.

Теоретически установлено также влияние на параметры  $K_{ш}$  и  $\sigma$  отношения  $a_z / \rho$ . С его увеличением угол сдвига  $\beta$  увеличивается, а угол  $\varphi_0$  - уменьшается. В этом случае наблюдается снижение интенсивности роста составляющих силы резания  $P_z$ ,  $P_y$  и толщины слоя  $a'_z$ , повышение коэффициента шлифования  $K_{ш}$  и уменьшение условного напряжения резания  $\sigma$ . Условия резания становятся более благоприятными с точки зрения стружкообразования, снижается доля упруго-пластического деформирования в общих энергетических затратах при резании. Такие результаты хорошо согласуются с эксперименталь-

ными данными Филимонова Л.Н. [413-417] и Корчака С.Н. [158].

Таким образом, доказано, что оптимальное соотношение параметров  $K_{ш}$  и  $\sigma$  обусловлено возможностью поддержания в процессе шлифования оптимального соотношения  $a_z / \rho$ . Это достигается, во-первых, выбором условий обработки, позволяющих шлифование производить с предельной (с точки зрения обеспечения условий прочности режущего зерна) толщиной среза  $a_{zmax}$ , во-вторых, применением оптимальной схемы электроэрозионной правки алмазного

круга, позволяющей постоянно поддерживать развитый режущий рельеф круга и, соответственно, минимально возможную величину  $\rho$ .

На основе разработанной математической модели шлифования проведена оптимизация условий глубинного алмазного шлифования с учетом ограничений по шероховатости обработки и предельной толщине среза, определяющей предельные возможности алмазного круга.

Предложенная расчетная схема параметров шлифования (рис. 1.22) представляет собой процесс проектирования профилей зерен круга на вращающуюся диаметрально плоскую плоскость детали с учетом разновысотного выступания зерен над связкой круга и равновероятного участия их в ре-

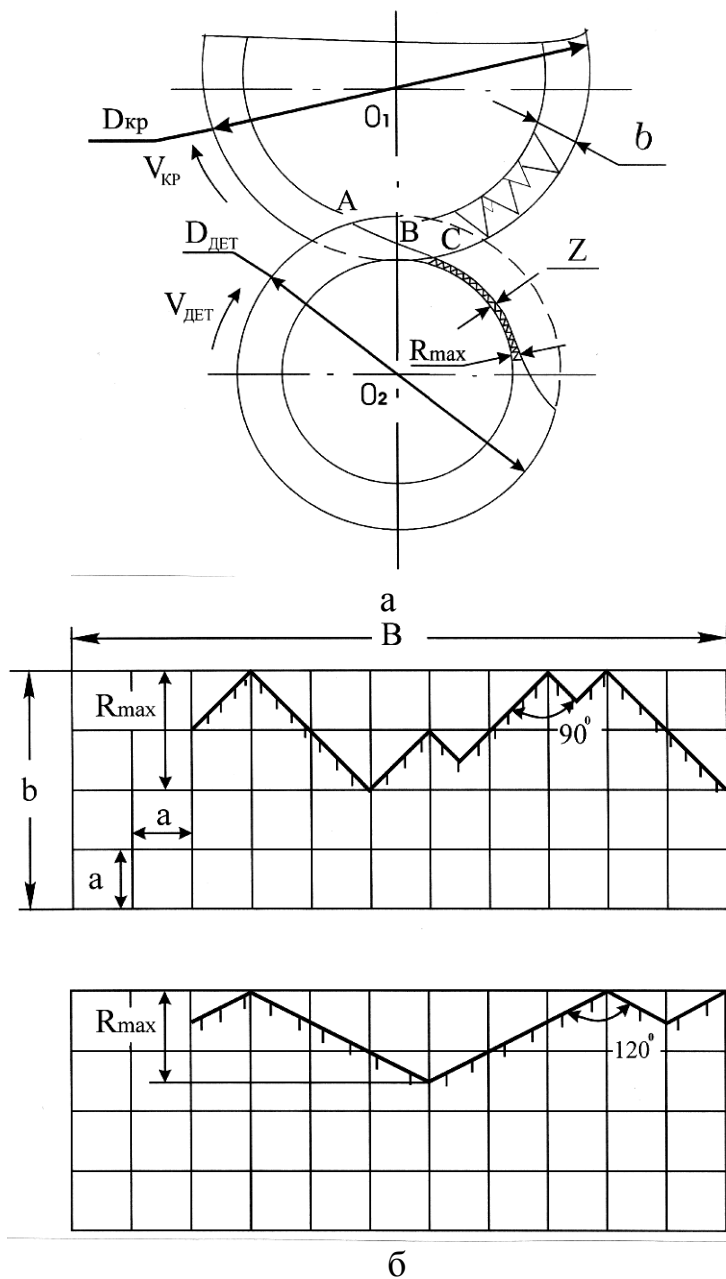


Рис. 1.22. Схема формирования параметров шероховатости при врезном шлифовании (а) и схема расположения вершин зерен над уровнем связки круга (б).

зании. Расчет параметров шлифования, таким образом, существенно упрощен и сведен к установлению размера элементарной ячейки  $a$ , определяющей вероятность положения вершины зерна, которыми условно представлена диаметральная плоскость детали в пределах высоты рельефа круга.

Установлено, что параметр шероховатости обработки  $R_{max}$  определяется зависимостью  $R_{max} = 2 \cdot a$ , где параметр  $a$  определяется режимами шлифования, характеристиками круга и т.д. Аналогичным образом определяется максимальная толщина среза  $a_{zmax}$ . На основе предложенной расчетной схемы шлифования получены зависимости для определения производительности обработки  $Q_0$  и реализующих ее параметров режима шлифования  $V_{дет}$  и  $t$  с учетом технических ограничений обработки  $R_{max}$  и  $a_{zmax}$ :

$$Q_0 = \frac{k \cdot V_{кр} \cdot l_{дет} \cdot a_{xmax}^6}{7 \cdot 10^3 \cdot A^3 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{D_{дет}} + \frac{1}{D_{кр}}\right)} \cdot \sqrt{R_{max}^5}}, \quad (1.40)$$

$$V_{дет} = \frac{k \cdot V_{кр}}{4,2 \cdot 10^2 \cdot A^3} \cdot \sqrt{\frac{R_{max}^5}{\left(\frac{1}{D_{дет}} + \frac{1}{D_{кр}}\right)}}, \quad (1.41)$$

$$t = 0,06 \cdot \frac{a_{xmax}^6}{R_{max}^5}. \quad (1.42)$$

Это позволило вскрыть новые закономерности глубинного алмазного шлифования, связанные с возможностью увеличения  $Q_0$  и одновременного уменьшением  $R_{max}$  при заданной предельной толщине среза  $a_{zmax}$ . При этом установлено, что глубина шлифования  $t$  определяется лишь параметрами  $a_{zmax}$  и  $R_{max}$  (т.е. для каждой глубины шлифования существует оптимальное соотношение параметров  $a_{zmax}$  и  $R_{max}$ ), а скорость детали  $V_{дет}$  не зависит от параметра  $a_{zmax}$ . Такие результаты значительно упрощают оптимизацию алмазного шлифования и подтверждают эффективность применения схемы глубинного (однопроходного) шлифования с точки зрения увеличения  $Q_0$ , т.к. за счет снижения параметра  $R_{max}$  при заданном значении

$a_{zmax}$ , всегда может быть реализована глубина шлифования  $t$ , равная или кратная величина снимаемого припуска.

Показано, что при изменении параметров  $a_{zmax}$  и  $R_{max}$  в пределах  $a_{zmax}=10-15$  мкм;  $R_{max}=2,8-4,4$  мкм ( $V_{кр}=28$  м/с;  $k=100\%$ ;  $A=250/200$  мкм;  $l_{дет}=8$  мм;  $D_{кр}=300$  мм;  $D_{дет}=55$  мм) производительность обработки составляет  $Q_0=9500$  мм<sup>3</sup>/мин. Таким образом доказана возможность в 3-4 раза увеличения производительности обработки  $Q_0$  по сравнению с известными процессами алмазного и алмазно-искрового шлифования.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных шероховатости обработки и других параметров показало их расхождение в пределах 10-15%, что свидетельствует о достоверности разработанной математической модели шлифования.

Проведены также экспериментальные исследования производительности  $Q_0$  и шероховатости обработки  $R_a$ , относительного расхода алмаза  $q_{отн}$  и эффективной мощности шлифования  $N_{эф}$  для различных характеристик круга и условий шлифования. Показано, что, поддерживая в процессе шлифования параметр  $a_{zmax}$  постоянным, относительный расход алмаза  $q_{отн}$  с увеличением глубины шлифования  $t$  непрерывно снижается, а параметры  $Q_0$  и  $N_{эф}$  - возрастают. Этим доказана возможность снижения  $q_{отн}$  в условиях глубинного шлифования, управляя параметром  $a_{zmax}$ . Причем, чем меньше параметр  $R_a$ , тем значительнее снижение  $q_{отн}$ .

На основе проведенной оптимизации процесса установлено, что наиболее эффективно применение при глубинном круглом наружном шлифовании деталей с высокопрочными покрытиями алмазных кругов на металлических связках М2-01, М3-06, М1-10 с зернистостью 160/125...250/200 и 100% концентрации в условиях непрерывной электроэрозионной правки.

На основе полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований, проведено обоснование оптимальных схем и условий электроэрозионной правки алмазного круга для осуществления высокопроизводительного глубинного алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями.

Показано, что условия высокопроизводительного глубинного

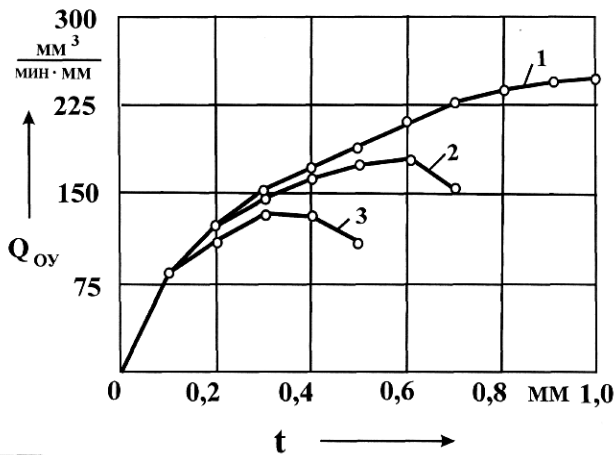


Рис. 1.23. Зависимость производительности от глубины шлифования: 1 -  $I_{cp}=75$  А; 2 -  $I_{cp}=48$  А; 3 -  $I_{cp}=34$  А; обрабатываемый материал – покрытие ПГ-10Н-01; алмазный круг - АС6 250/200 М2-01 4;  $a_{z_{max}}=15$  мкм;  $V_{кр}=28$  м/с.

шлифования покрытий могут быть реализованы лишь с применением дополнительного электроэрозионного воздействия на алмазный круг на металлической связке, который в данном случае интенсивно засаливается и требует непрерывной правки. При этом установлено значительное влияние силы тока (импульсного генератора) при электроэрозионной правке на режущую способность алмазного круга и производительность обработки (рис. 1.23).

Доказано, что для каждого значения производительности обработки должно существовать вполне конкретное значение силы тока, определяемое оптимальным значением концентрации тока, которая в широком диапазоне изменения глубин шлифования равна  $k_T=1,3-1,5$  А/мм<sup>2</sup>. Несоблюдение такого условия приводит к увеличению в 2-5 раз относительного расхода алмазов (в случае превышения силой тока оптимальных значений этой величины, рис. 1.24) или к значительному снижению производительности обработки и последующему прекращению процесса шлифования из-за интенсивного засаливания режущей поверхности круга (в случае, когда величина силы тока меньше оптимального значения).

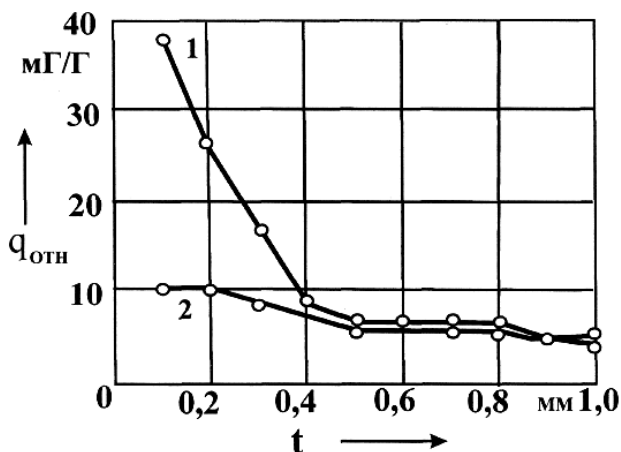


Рис. 1.24. Зависимость относительного расхода алмаза от глубины шлифования: 1 -  $I_{cp}=68$  А; 2 -  $k_T=1,4$  А/мм<sup>2</sup>; обрабатываемый материал – покрытие ПГ-10Н-01; алмазный круг - АС6 250/200 М2-01 4;  $V_{кр}=28$  м/с.

Так установлено, что при силе тока  $I_{cp}=48$  А обеспечивается полное устранение засаливания круга и соблюдение примерного равенства скоростей эрозионного разрушения металлической связки круга и линейного износа



зерен при шлифовании с производительностью обработки, равной  $Q_0=1400 \text{ мм}^3/\text{мин}$  ( $V_{\text{дет}}=0,4 \text{ м/мин}$ ;  $t=0,5 \text{ мм}$ ). С увеличением глубины шлифования наблюдается интенсивное засаливание круга, и ведение процесса в таких условиях становится нецелесообразным. В случае уменьшения глубины шлифования, начиная со значений  $t=0,35 \text{ мм}$ , наоборот, обеспечивается полное устранение засаливания круга, однако имеет место чрезвычайно высокий износ круга, который при дальнейшем уменьшении глубины шлифования резко возрастает.

На основе выполненных экспериментальных исследований установлено существование предельной площади контакта  $S_k$  круга с деталью, при которой эффективно введение в зону резания дополнительной энергии в виде электрических разрядов. Показано, что реализация глубинного круглого наружного шлифования деталей с высокопрочными покрытиями стала возможной благодаря обработке относительно “узкой” поверхности фаски клапана, составляющей  $l_{\text{дет}}=6-8 \text{ мм}$ , т.к. увеличение ширины шлифования сопряжено с повышением величины импульсного тока, выше  $I_{\text{ср}}=80 \text{ А}$ , и отрицательным воздействием электроэрозионных процессов на качество обработанной поверхности. Таким образом, впервые обоснованы условия эффективного применения схемы глубинного алмазно-искрового шлифования, реализующей оптимальные (механические) режимы шлифования. Оптимальные характеристики импульсного тока: частота следования импульсов  $f=1-3 \text{ кГц}$  и скважность  $q_u=1,9-2,5$ . В качестве высокочастотного импульсного генератора рекомендуется использовать ШГИ-80х 2-88 М с  $I_{\text{ном}}=80 \text{ А}$ ,  $f=1-88 \text{ кГц}$ ,  $q_u=1,1-8,1$ .

Были также проведены исследования алмазно-искрового шлифования крупногабаритными алмазными кругами диаметром 500 мм и высотой 25 мм. Установлено, что значительное увеличение площади режущей поверхности круга положительно влияет на стабильность процесса шлифования, на повышение параметров качества и точности обработанной поверхности.

### 1.7.2. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АЛМАЗНОГО ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ШЛИФОВАНИЯ

Оценку возможностей повышения производительности обработки при шлифовании  $Q_{\text{тек}}(\tau)$  произведем по зависимости, полу-

ченной на основе решения уравнения баланса перемещение в технологической системе (1.37) с учетом начального перемещения  $y_0$ :

$$Q_{тек}(\tau) = Q_0 - (Q_0 - c \cdot y_0 \cdot \lambda) \cdot \exp\left(-\frac{c \cdot \lambda \cdot \tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot B}\right), \quad (1.43)$$

где  $Q_0 = B \cdot V_{дет} \cdot t$  - номинальная производительность обработки,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $B$  - ширина шлифования,  $\text{м}$ ;  $V_{дет}$  - скорость детали,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $t$  - глубина шлифования,  $\text{м}$ ;  $\tau$  - время обработки,  $\text{с}$ ;  $c$  - приведенная жесткость технологической системы,  $\text{Н}/\text{м}$ ;  $\lambda$  - удельная интенсивность съема материала,  $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{Н})$ ;  $D_{дет}$  - диаметр детали,  $\text{м}$ ;  $y_0$  - начальное перемещение (натяг) в технологической системе,  $\text{м}$ .

В зависимости от величины  $y_0$  из зависимости (1.43) вытекают три принципиальные решения:  $Q_{тек} > Q_0$ ,  $Q_{тек} = Q_0$ ,  $Q_{тек} < Q_0$ .

Увеличить  $Q_{тек}$  при  $y_0 > \frac{Q_0}{c \cdot \lambda}$  можно, реализуя условие  $y_0 = \Pi$ , где  $\Pi$  - величина снимаемого припуска,  $\text{м}$ .

При  $Q_{тек} = Q_0$  будет протекать устойчивый во времени процесс шлифования. Для этого необходимо создать в технологической системе натяг величиной  $y_0 = \frac{Q_0}{c \cdot \lambda}$  или обработку вести по упругой схеме с фиксированным радиальным усилием  $P_y = Q_0 / \lambda$ . Для обеспечения постоянства во времени параметра  $\lambda$  необходимо использовать эффективную правку круга.

Основным условием повышения производительности обработки  $Q_{тек}$  при условии  $y_0 < \frac{Q_0}{c \cdot \lambda}$  является увеличение параметра  $\lambda$ . Не учитывая при анализе трения связки круга с обрабатываемым материалом в процессе шлифования, параметр  $\lambda$  определяется

$$\lambda = V_{кр} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{\tau_{сдв}} \cdot \left(\frac{a_z}{4 \cdot HV \cdot R}\right)^2}, \quad (1.44)$$

где  $V_{кр}$  - скорость круга,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\tau_{сдв}$ ,  $HV$  - соответственно предел прочности на сдвиг и твердость (по Виккерсу) обрабатываемого материала,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  $a_z$  - толщина среза отдельным зерном круга,  $\text{м}$ ;  $R$  - радиус округления режущей части зерна,  $\text{м}$ .

Из зависимости (1.44) следует, что увеличить параметр  $\lambda$  можно увеличением скорости круга  $V_{кр}$  и соотношения  $a_z / R$ . Чем больше

$\tau_{сдв}$  и  $HV$ , тем меньше  $\lambda$  и хуже обрабатываемость материала. Твердость материала  $HV$  в большей мере влияет на параметр  $\lambda$ , чем прочность материала  $\tau_{сдв}$ , что хорошо согласуется с практикой шлифования.

С учетом преобразований соотношения  $a_z/R$ , зависимость (1.44) принимает вид

$$\lambda = \frac{2 \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta)}{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV}, \quad (1.45)$$

где  $\eta = \sqrt{\frac{0,5\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot HV \cdot x^2}{P_{y1}}}$  - безразмерный параметр, определяю-

щий степень затупления зерна, изменяется в пределах 0...1 (для острого зерна  $\eta \rightarrow 0$ , для затупленного зерна  $\eta \rightarrow 1$ );  $2\gamma$  - угол при вершине конусообразного режущего зерна;  $P_{y1}$  - радиальная составляющая силы резания, действующая на зерно, Н;  $x$  - величина линейного износа зерна, м.

Из зависимости (1.45) следует, что увеличить параметр  $\lambda$  можно путем уменьшения безразмерного параметра  $\eta$  за счет уменьшения величины  $x$  и увеличения  $P_{y1}$ , т.е. за счет поддержания в процессе шлифования высокой остроты режущих зерен и применения алмазных кругов из прочных алмазных зерен и металлических связок.

Производительность обработки  $Q_{тек}$ , соответствующая условию  $Q_{тек} = Q_0$ , определяется

$$Q_{тек} = \frac{2 \cdot V_{кр} \cdot P_y \cdot (1 - \eta)}{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV}. \quad (1.46)$$

Повысить  $Q_{тек}$  можно увеличением  $V_{кр}$ ,  $P_y$  и  $(1 - \eta)$ , т.е. применением скоростного, силового (глубинного) шлифования, в том числе с непрерывной эффективной правкой круга. Последний фактор играет определяющую роль при шлифовании материалов повышенной твердости, поскольку увеличение параметра  $HV$  приводит к уменьшению величины  $(1 - \eta)$  и соответственно производительности обработки  $Q_{тек}$  в соответствии с зависимостью (1.46).

Из зависимости (1.46) также следует, что уменьшить  $P_y$  при фиксированной производительности обработки  $Q_{тек}$  можно уменьшением  $\eta \rightarrow 0$ .

Определены условия образования микросколов на режущих зернах при шлифовании ( $\eta \rightarrow 0$ ), исходя из зависимости для расчета максимального касательного напряжения, возникающего в зерне

$$\tau_{max} = \frac{16 \cdot P_{y1}}{x^2} \cdot (1 - K_{ш})^2 \cdot K_{ш}^3, \quad (1.47)$$

где  $K_{ш} = \sqrt{\frac{4 \cdot \sigma_{сж}}{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV}} \cdot (1 - \eta)$  - коэффициент шлифования;  $\sigma_{сж}$  - предел прочности обрабатываемого материала на сжатие, Н/м<sup>2</sup>.

Произведение  $(1 - K_{ш})^2 \cdot K_{ш}^3$  с увеличением коэффициента шлифования  $K_{ш}$  увеличивается, табл. 1.13.

Таблица 1.13

$K_{ш}$	0	0,1	0,2	0,3	0,5
$(1 - K_{ш})^2 \cdot K_{ш}^3$	0	0,00081	0,005	0,013	0,031

Следовательно, по мере износа зерна (увеличение величины  $x$ ) максимальное касательное напряжение  $\tau_{max}$  уменьшается, причем, интенсивнее с увеличением твердости обрабатываемого материала  $HV$ .

Обеспечить увеличение  $\tau_{max}$  и протекание устойчивого процесса микроразрушения режущих зерен при шлифовании можно увеличением  $P_{y1}$  и применением непрерывной правки круга для удаления затупленных зерен с его рабочей поверхности (с предельной величиной  $x$ , определяемой из условия  $\tau_{max} = \tau_{сдв\ зерн}$ ).

Определены условия реализации процесса электроэрозионного алмазного шлифования, исходя из зависимости для расчета температуры образующихся стружек  $t^0$  (на основе закона Джоуля-Ленца)

$$t^0 = \frac{K_1 \cdot U^2}{\rho \cdot c \cdot \rho_{ом} \cdot l \cdot V_{кр}}, \quad (1.48)$$

где  $K_1$  - тепловой эквивалент работы;  $U$  - напряжение технологического тока, В;  $\rho$  и  $c$  - соответственно плотность и удельная теплоемкость обрабатываемого материала;  $\rho_{ом}$  - удельное сопротивление стружки, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $l$  - толщина межэлектродного зазора, м.

В зависимости от величины  $l$  возможны три случая:

1)  $l > l_{np}$  (где  $l_{np}$  - предельное значение межэлектродного зазора).

Тогда  $t^0 < t_{np}^0$  (где  $t_{np}^0$  - предельное значение температуры, при

которой происходит термическое разрушение стружек и металлической связки алмазного круга), т.е. процесс электроэрозии отсутствует. Согласно зависимости (1.48), необходимо увеличить  $U$  или уменьшить  $V_{кр}$ ;

- 2)  $l = l_{np}$ , тогда  $t^0 = t_{np}^0$ , что указывает на протекание устойчивого процесса электроэрозии, обеспечивающего термическое разрушение стружек и металлической связки круга с интенсивностью, достаточной для поддержания его высокой режущей способности;
- 3)  $l < l_{np}$ , тогда  $t^0 > t_{np}^0$ , что указывает на протекание в начальный период интенсивного процесса электроэрозии, который с течением времени ведет к увеличению  $l$ , уменьшению  $t^0$  до значения  $t_{np}^0$  и стабилизации  $l$ .

В случае автономной электроэрозионной правки алмазного круга температура нагрева поверхностных слоев металлической связки определится

$$t^0 = \frac{K_1 \cdot U^2 \cdot \tau}{\rho \cdot c \cdot \rho_{ом} \cdot l}, \quad (1.49)$$

где  $\tau$  - время контакта фиксированной точки круга с правящим электродом (при постоянной силе тока) или время единичного импульса тока.

Увеличить  $t^0$  (до предельного значения) и обеспечить высокую эффективность процесса электроэрозионной правки можно уменьшением  $l$  и увеличением  $U$  и  $\tau$  за счет увеличения силы прижатия алмазного круга к правящему электроду и применения источника технологического тока повышенной мощности.

### **1.7.3. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ РАВНОВЕСНОГО ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ**

#### **1.7.3.1. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ РАВНОВЕСНОГО ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ БЕЗ УЧЕТА ИЗНОСА ЗЕРЕН КРУГА**

Шлифовальный круг может работать в режиме затупления и самозатачиваивания. В последнем случае происходит равномерный во времени износ круга с постоянной скоростью  $V$ . Время работы круга

до полного износа равно  $\tau = H/V$ , где  $H$  - толщина абразивного слоя круга. Время работы отдельного режущего зерна круга равно  $\tau_1 = a_{z_{max}}/V$ , где  $a_{z_{max}}$  - максимальная толщина среза при шлифовании. Как видим, чем больше  $a_{z_{max}}$ , тем больше время  $\tau_1$ .

Максимальная толщина среза  $a_{z_{max}}$  определяется устойчивостью зерна в связке круга. Поэтому произведем расчет параметра  $a_{z_{max}}$ . Для этого рассмотрим условия устойчивости зерен в связке круга до момента их выпадения в процессе шлифования. Оценим равновесное состояние системы “зерно-связка”, нагруженной со стороны обрабатываемого материала силой  $P_{z1}$ .

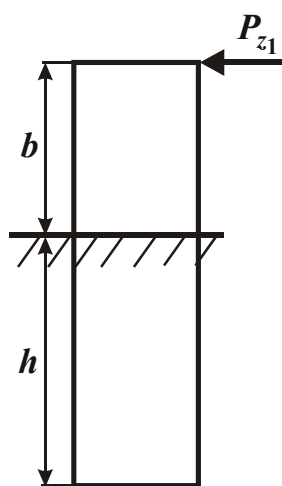


Рис. 1.25. Расчетная схема.

Условием равновесия системы “зерно-связка” будет равенство моментов от силы  $P_{z1}$  и реакции заделки  $m = f(h)$ , рис. 1.25. Примем момент от силы  $P_{z1}$  в виде  $M = P_{z1} \cdot b$  и момент  $m = f(h)$  в виде  $m = a \cdot h$ , где  $b$  - высота выступания зерна над уровнем связки круга, м;  $h$  - глубина заделки зерна в связке круга, м;  $a$  - экспериментальная характеристика, определяющая прочностные свойства связки круга, Н.

Выразим величину  $h$  через  $b$  зависимостью:  $h = \bar{X} - b$ , где  $\bar{X}$  - размер зерна (зернистость круга), м.

Тогда из условия равенства моментов  $M$  и  $m$ , получим

$$P_{z1} = a \cdot \left( \frac{\bar{X}}{b} - 1 \right). \quad (1.50)$$

Как следует из полученной зависимости (1.50), с увеличением параметра  $b$  тангенциальная составляющая силы резания  $P_{z1}$ , действующая на режущее зерно, уменьшается.

Представим  $P_{z1}$  в виде  $P_{z1} = \sigma \cdot S$ , где  $\sigma$  - условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $S = 0,5 \cdot a_{z_{max}}^2$  - площадь поперечного сечения среза отдельным режущим зерном круга, м<sup>2</sup>.

Тогда  $P_{z1}$  определится:

$$P_{z1} = 0,5 \cdot \sigma \cdot a_{z_{max}}^2. \quad (1.51)$$

Тангенциальная составляющая силы резания  $P_{z1}$ , действующая на отдельное зерно круга, тем меньше, чем меньше параметры  $\sigma$  и  $a_{zmax}$ . Подставим зависимость (1.51) в зависимость (1.50), откуда

$$a_{zmax} = \sqrt{\frac{2 \cdot a}{\sigma} \cdot \left( \frac{\bar{X}}{b} - 1 \right)}. \quad (1.52)$$

Максимальная толщина среза  $a_{zmax}$  увеличивается с увеличением параметров  $a, \bar{X}$  и уменьшением  $\sigma$  и  $b$ .

Как видно из зависимости (1.52) между параметрами  $a_{zmax}$  и  $b$  существует вполне однозначная связь: чем больше заданное значение  $b$ , тем меньше  $a_{zmax}$  и наоборот. Это связано с изменением глубины заделки зерна в связке  $h$ .

В пределе параметр  $a_{zmax}$  может быть увеличен до значения  $b$ . Поэтому определим предельное значение  $a_{zmax}$  из условия  $a_{zmax} = b$ . Для этого преобразуем зависимость (1.52) к виду:

$$\frac{a_{zmax}^2 \cdot \sigma}{2 \cdot a} = \frac{\bar{X}}{a_{zmax}} - 1 \quad (1.53)$$

или

$$a_{zmax}^3 + \frac{2 \cdot a}{\sigma} \cdot a_{zmax} - \frac{2 \cdot a}{\sigma} \cdot \bar{X} = 0. \quad (1.54)$$

В результате пришли к трансцендентному уравнению, решить которое можно численным методом. Учитывая важность получения аналитического решения, уравнение (1.53) упростим, пренебрегая слагаемым (-1), стоящим в правой части уравнения. Тогда уравнение (1.53) примет простой вид

$$\frac{a_{zmax}^2 \cdot \sigma}{2 \cdot a} = \frac{\bar{X}}{a_{zmax}}, \quad (1.55)$$

откуда

$$a_{zmax} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot a \cdot \bar{X}}{\sigma}}. \quad (1.55)$$

Как видно из зависимости (1.55), увеличить параметр  $a_{zmax}$  можно увеличением параметров  $a, \bar{X}$  и уменьшением  $\sigma$ . Причем, все

три указанные параметры входят в зависимость (1.55) с одинаковой степенью.

Зная параметр  $a_{z_{max}}$ , можно определить время работы зерна в круге:

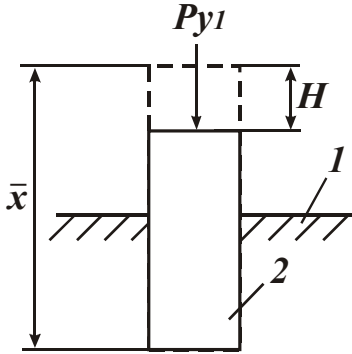


Рис.1.26. Расчетная схема устойчивости зерна в связке: 1 – связка круга; 2 - режущее зерно.

$$\tau_1 = \frac{a_{z_{max}}}{V} = \frac{1}{V} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot a}{\sigma} \cdot \left( \frac{\bar{X}}{b} - 1 \right)}. \quad (1.56)$$

Рассмотрим теперь условия устойчивости зерен в связке круга до момента их выпадения от действия радиальной составляющей силы резания  $P_{y1}$ , рис. 1.26. Условием равновесия системы “зерно-связка” будет равенство радиальной составляющей силы резания  $P_{y1}$  и реакции заделки зерна в связке  $a_1 \cdot h$ , где  $a_1$  - экспериментальная характеристика, определяющая прочностные свойства связки круга,  $h$  - глубина заделки зерна в связке, м.

Учитывая  $h = \bar{X} - b$ , имеем

$$P_{y1} = a_1 \cdot (\bar{X} - b). \quad (1.57)$$

Как следует из зависимости (1.57), радиальная составляющая силы резания  $P_{y1}$  тем больше, чем меньше высота выступания зерна над уровнем связки круга  $b$  и больше параметр  $a_1$ , т.е. прочнее связка круга.

Представим  $P_{y1}$  в виде:

$$P_{y1} = \frac{P_{z1}}{K_{ш}}, \quad (1.58)$$

где  $K_{ш}$  - коэффициент шлифования.

Тогда, с учетом зависимости (1.51) радиальная составляющая силы резания  $P_{y1}$  выразится

$$P_{y1} = \frac{\sigma \cdot a_{z_{max}}^2}{2 \cdot K_{ш}}. \quad (1.59)$$

Выразим условное напряжение резания  $\sigma$  через коэффициент шлифования  $K_{ш}$ , используя известную зависимость:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{K_{ш}}, \quad (1.60)$$



где  $\sigma_{сж}$  - предел прочности обрабатываемого материала на сжатие, Н/м<sup>2</sup>.

Подставляя зависимость (1.60) в зависимость (1.59), имеем

$$P_{y1} = \frac{\sigma \cdot a_{zmax}^2}{K_{ш}^2} . \quad (1.61)$$

Как видно из зависимости (1.61), радиальная составляющая силы резания  $P_{y1}$  тем меньше, чем меньше параметры  $\sigma_{сж}$ ,  $a_{zmax}$  и больше  $K_{ш}$ .

Подставим зависимость (1.61) в зависимость (1.57) и разрешим последнюю относительно параметра  $a_{zmax}$ :

$$a_{zmax} = K_{ш} \cdot \sqrt{\frac{a_1 \cdot (\bar{X} - b)}{\sigma_{сж}}} . \quad (1.62)$$

Таким образом, из условия устойчивости зерен связки круга до момента их выпадения в результате действия на них радиальной составляющей силы резания  $P_{y1}$ , определена максимальная толщина среза  $a_{zmax}$ .

Из зависимости (1.62) следует существенное влияние на  $a_{zmax}$  коэффициента шлифования  $K_{ш}$ : с его увеличением параметр  $a_{zmax}$  пропорционально увеличивается. Увеличение коэффициента шлифования  $K_{ш}$  обусловлено повышением режущей способности круга. Следовательно, чем выше режущая способность круга, тем больше предельное значение максимальной толщины среза  $a_{zmax}$ .

Увеличить  $a_{zmax}$  можно также уменьшением высоты выступа зерна над уровнем связки  $b$  и увеличением прочности связки круга, определяемой параметром  $a_1$ .

### 1.7.3.2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ РАВНОВЕСНОГО ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ С УЧЕТОМ ИЗНОСА ЗЕРЕН КРУГА

Рассмотрим физическую сущность условия равномерного во времени износа алмазного круга, используя расчетную схему, приве-

денную на рис. 1.27. Принятые обозначения:  $V'_{дет}$  - скорость обрабатываемой детали, м/с;  $x$  - величина линейного износа зерна, м;  $H$  - максимальная глубина внедрения обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга, отсчитывая ее от вершины исходного (неизношенного) максимально выступающего над уровнем связки зерна, м;  $H_{max} = (1 - \eta) \cdot H$  - максимальная (вероятностная) толщина среза, м;  $\eta = x / H$  - безразмерный коэффициент, учитывающий степень затупления зерна ( $\eta \rightarrow 0$  - для острого зерна,  $\eta \rightarrow 1$  - для затупленного зерна);  $b$  - максимальная высота выступания зерен над уровнем связки круга, м;  $\Delta$  - толщина слоя межзеренного пространства круга, заполняемого стружками, м;  $2\gamma$  - угол при вершине конусообразного режущего зерна;  $V_{кр}$  - скорость круга, м/с.

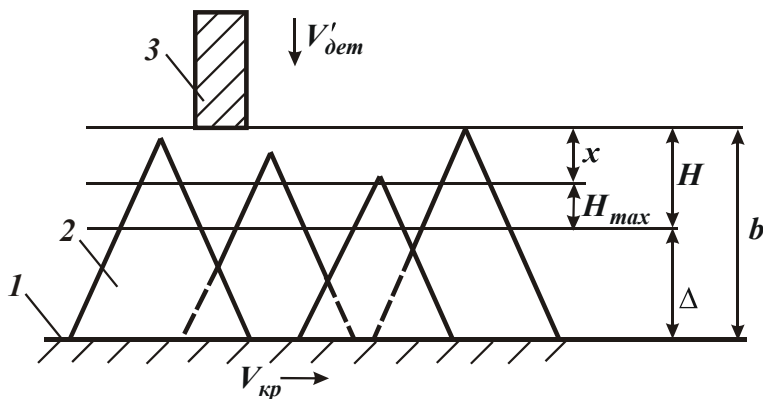


Рис. 1.27. Расчетная схема параметров шлифования: 1 – связка круга; 2 – зерно; 3 – обрабатываемый образец.

Пусть связка круга с течением времени обработки изнашивается со скоростью  $V_{св}$ . Это может быть обусловлено работой круга в режиме самозатачивания или за счет применения непрерывной механической или электроэрозионной (электрохимической)

правки алмазного круга. Тогда, для выполнения условия равномерного во времени износа круга величина  $(b - H)$  должна оставаться постоянной. Это будет достигаться в том случае, если каждая точка уровня  $H$ , определяющая максимальную глубину внедрения обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга, будет перемещаться в вертикальном направлении с постоянной скоростью  $V_{св}$ , а параметры  $x$ ,  $H$  и  $b$  будут оставаться постоянными с течением времени обработки. Скорость движения обрабатываемого прямолинейного образца по нормали к рабочей поверхности круга при этом будет равна  $(V'_{дет} + V_{св})$ .

Тогда время контакта режущего зерна с обрабатываемым материалом до момента его выпадения из связки круга определится:

$$\tau_{св} = \frac{H}{V_{св}}. \quad (1.63)$$

За это время режущее зерно изнашивается на величину  $x$ , т.е. время износа зерна равно

$$\tau_{\text{зер}} = \frac{x}{V_{\text{зер}}}, \quad (1.64)$$

где  $V_{\text{зер}}$  - средняя скорость износа зерна круга, м/с.

Из условия  $\tau_{\text{св}} = \tau_{\text{зер}}$  получим:

$$V_{\text{св}} = V_{\text{зер}} \cdot \frac{H}{x} = \frac{V_{\text{зер}}}{\eta}$$

или

$$\frac{V_{\text{зер}}}{V_{\text{св}}} = \eta. \quad (1.65)$$

Таким образом, получена аналитическая зависимость, увязывающая параметры  $V_{\text{св}}$  и  $V_{\text{зер}}$ .

В теории шлифования принято считать, что условием стабилизации во времени процесса шлифования является равенство скоростей износа зерен и связки круга  $V_{\text{св}} = V_{\text{зер}}$ . В действительности, как следует из зависимости (1.65), стабилизировать процесс шлифования можно при условии  $V_{\text{св}} > V_{\text{зер}}$  ( $0 < \eta < 1$ ). При условии  $V_{\text{св}} = V_{\text{зер}}$  ( $\eta = 1$ ) процесс резания при шлифовании неосуществим. Исключением является лишь процесс шлифования синтетических сверхтвердых материалов, когда практически отсутствует внедрение зерен алмазного круга в обрабатываемый материал и  $x \rightarrow H$ , т.е.  $\eta \rightarrow 1$ .

Необходимо отметить, что скорость износа зерна  $V_{\text{зер}}$  зависит от величины его линейного износа  $x$ . В работе [69] показано, что с увеличением величины  $x$  скорость износа зерна  $V_{\text{зер}}$  уменьшается. При этом безразмерный коэффициент  $\eta = x / H$  увеличивается (при выполнении условия  $H = \text{const}$ ). По сути, скорость износа зерна  $V_{\text{зер}}$  определяется зависимостью  $V_{\text{зер}} = f(1/\eta)$ . Это ведет к еще более интенсивному уменьшению скорости износа связки  $V_{\text{св}}$  с увеличением безразмерного коэффициента  $\eta$  в соответствии с зависимостью (1.65). Следовательно, величина  $x$  оказывает противоположное влияние на параметры  $V_{\text{зер}}$  и  $\eta$ . Это не нарушает закономерности изменения скорости износа связки  $V_{\text{св}}$  от безразмерного коэффициента  $\eta$ , а

лишь усиливает интенсивность изменения  $V_{св}$  от  $\eta$ . Этим доказано, что скорость износа связки круга  $V_{св}$  вполне однозначно определяется безразмерным коэффициентом  $\eta$  и наоборот. Уменьшить скорость износа связки  $V_{св}$  можно увеличением безразмерного коэффициента  $\eta$ , рис. 1.28,а.

Проведем анализ характера изменения параметров  $H, H_{max}, x = H - H_{max}$  и производительности обработки  $Q$  в связи с изменением параметров  $V_{св}$  и  $\eta$ . Данные параметры описываются следующими зависимостями [253]:

$$H = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b \cdot V'_{дем}}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta^2)}}, \quad H_{max} = (1 - \eta) \cdot H,$$

$$Q = V'_{дем} \cdot F = \frac{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta) \cdot F}{9 \cdot b} \cdot \left( \frac{P_{y1}}{2 \cdot \sigma_{сж}} \right)^{1,5},$$

где  $k$  - поверхностная концентрация зерен круга, шт/м<sup>2</sup>;  $F$  - площадь поперечного сечения обрабатываемого образца, м<sup>2</sup>;  $\sigma_{сж}$  - предел прочности обрабатываемого материала на сжатие, Н/м<sup>2</sup>;  $P_{y1}$  - радиальная составляющая силы резания, действующей на зерно, Н.

Как следует из рис. 1.28, уменьшение безразмерного коэффициента  $\eta$  вследствие увеличения скорости износа связки  $V_{св}$  ведет к уменьшению параметра  $H$  (до значения  $H_0$ ), к увеличению параметра  $H_{max}$  (от нуля до значения  $H_0$ ), к уменьшению параметра  $x \rightarrow 0$  и увеличению производительности обработки  $Q$ . Значение  $H_0$  равно значению параметра  $H$  при  $\eta=0$ :

$$H_0 = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b \cdot V'_{дем}}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр}}} = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b \cdot V'_{дем}}{t}}.$$

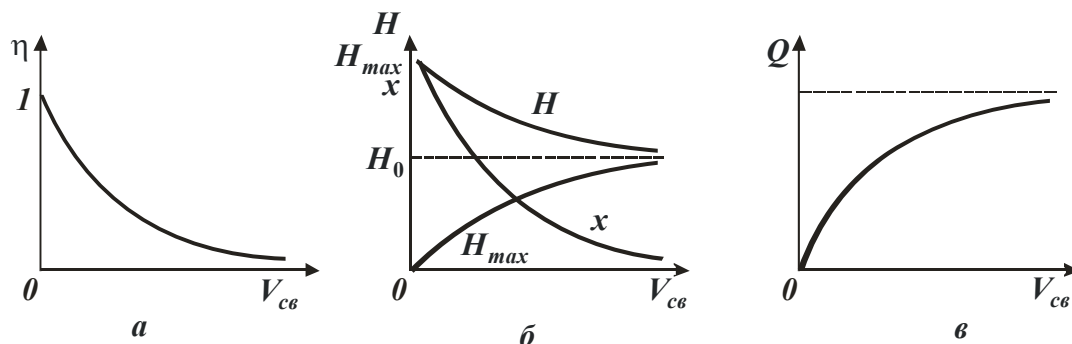


Рис. 1.28. Характер изменения безразмерного коэффициента  $\eta$  и параметров  $H, H_{max}, x, Q$  с изменением скорости износа связки круга  $V_{св}$ .

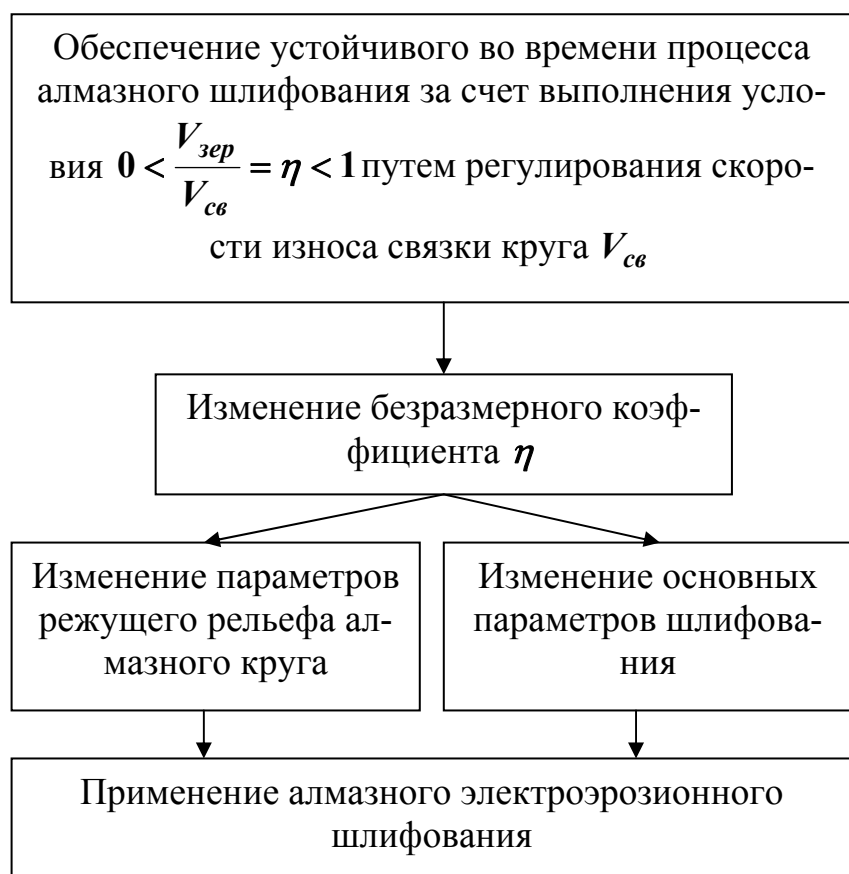


Рис. 1.29. Структурная схема, показывающая влияние скорости износа связки круга  $V_{св}$  на основные параметры шлифования.

Таким образом показано, что увеличение скорости износа связки круга  $V_{св}$  (например, за счет механического, электроэрозионного или электрохимического воздействия на рабочую поверхность алмазного круга) приводит к уменьшению безразмерного коэффициента  $\eta$ , а через него – всех основных параметров шлифования, рис. 1.29.

При обычном алмазном шлифовании скорость износа связки круга  $V_{св}$  обусловлена интенсивностью ее трения с обрабатываемым материалом (продуктами обработки), а при алмазном электроэрозионном шлифовании – интенсивностью электроэрозионного (ударно-термического) разрушения металлической связки круга вследствие действия возникающих электрических разрядов в зоне резания. Очевидно, с увеличением электроэрозионного воздействия на металлическую связку круга будет увеличиваться скорость ее износа и соответственно производительность обработки. Как будет показано ниже, именно этим фактором объясняется основной эффект алмазного электроэрозионного шлифования.

Проведем теоретический анализ путей повышения производи-

тельности алмазного шлифования с учетом разделения максимальной высоты выступания зерен над уровнем связки  $b$  на три составляющие, равные соответственно величине линейного износа максимально выступающего над уровнем связки зерна  $x$ , максимальной толщине среза  $H_{max}$  и толщине слоя  $\Delta$ , заполняемого образующимися стружками и другими продуктами обработки (рис. 1.27):

$$b = 3 \sqrt{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot Q}{m \cdot V_{кр} \cdot B \cdot (1 - \eta^2)}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} + \frac{Q}{V_{кр} \cdot B} \cdot \xi. \quad (1.66)$$

где  $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$  - производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $B$  - ширина круга, м;  $V_{дет}$  - скорость детали при круглом наружном (внутреннем и плоском) шлифовании, м/с;  $t$  - глубина шлифования, м;  $\bar{X}$  - зернистость круга, м;  $m$  - объемная концентрация зерен круга;  $\rho = 1/R_{кр} + 1/R_{дет}$ ;  $R_{кр}$ ,  $R_{дет}$  - соответственно радиусы круга и детали, м;  $\xi$  - коэффициент, учитывающий степень заполнения стружкой межзеренного пространства круга ( $\xi > 1$ ).

Первое слагаемое в правой части уравнения (1.66) определяет глубину внедрения обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга  $H$ , а второе – высоту межзеренного пространства круга, заполняемого стружкой  $\Delta$ . По мере затупления зерен (увеличения безразмерного коэффициента  $\eta \rightarrow 0$ ) при условии  $b = const$  первое слагаемое увеличивается, а второе уменьшается.

Безразмерный коэффициент  $\xi$  зависит от обрабатываемого материала. При обработке твердых сплавов и других хрупких материалов  $\xi \approx 1$ . При обработке пластичных материалов  $\xi > 1$ . Очевидно, при определенных условиях безразмерный коэффициент  $\xi$  может принимать относительно большие значения, тогда второе слагаемое уравнения (1.66) примет значение, близкое к величине  $b$ . В этом случае процесс шлифования практически неосуществим. Этим, собственно, и объясняется низкая эффективность алмазного шлифования высокопрочных сталей, наплавов и других пластичных материалов, когда образуются длинные стружки, полностью заполняющие межзеренное пространство алмазного круга и практически исключают участие зерен в резании.

Для эффективного ведения процесса шлифования необходимо уменьшить безразмерный коэффициент  $\xi$ , например, за счет применения алмазного электроэрозионного шлифования, обеспечивающего

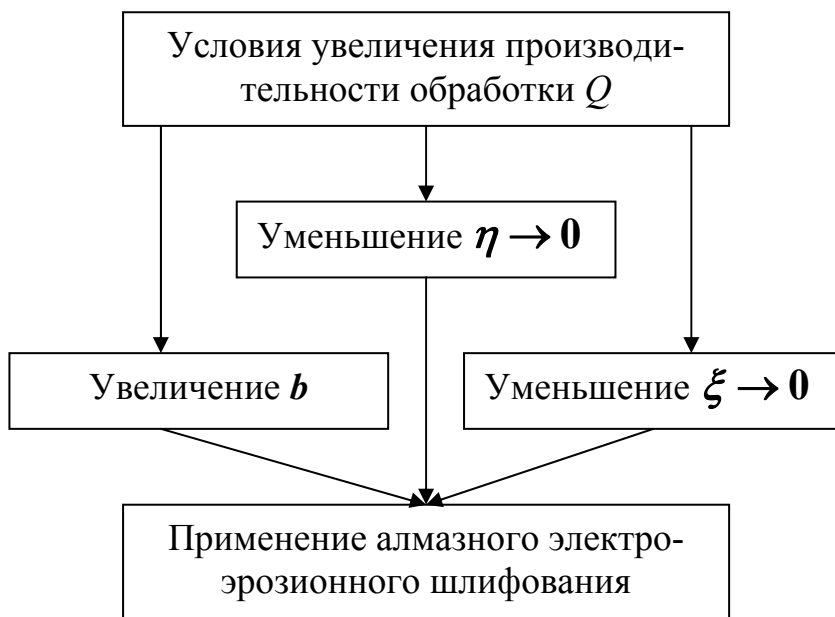


Рис. 1.30. Структурная схема условий увеличения производительности обработки  $Q$ .

Производительности обработки необходимо рассматривать обеспечение высокой остроты режущих зерен. При этом необходимо добиваться увеличенного выступания зерен над уровнем связки (увеличения  $b$ ) и уменьшения коэффициента  $\xi$ . Эффективным техническим решением данной задачи является применение метода алмазного электроэрозионного шлифования. За счет возбуждения в зоне резания электрических разрядов происходит термическое разрушение поверхностных слоев металлической связки алмазного круга и частичное сгорание (испарение) образующихся стружек обрабатываемого металла или сплава. В результате осуществляется целенаправленное принудительное удаление затупившихся зёрен, обеспечиваются основные условия повышения производительности обработки  $Q$  (рис. 1.30): уменьшаются безразмерные коэффициенты  $\eta$  и  $\xi$ , увеличивается параметр  $b$ .

Установим аналитическую зависимость, увязывающую скорость износа связки круга  $V_{св}$  с удельным расходом алмаза  $q$ . Предположим, что за определенное время шлифования  $\tau$  произошел полный износ алмазоносного слоя круга толщиной  $S$ . Масса алмазного порошка, находящегося в этом алмазоносном слое круга, равна  $m_a = \rho_a \cdot V_a$ , где  $\rho_a$  - плотность алмаза, кг/м<sup>3</sup>;  $V_a$  - объем алмазоносного слоя круга, занимаемый алмазным порошком

$$V_a = \pi \cdot D_{кр} \cdot B \cdot S \cdot \alpha, \quad (1.67)$$

частичное сгорание стружек.

Наибольшее влияние на производительность обработки  $Q$  оказывает безразмерный коэффициент  $\eta$ , т.к. при условии  $\eta \rightarrow 1$  первое слагаемое уравнения (1.66) стремится к бесконечности.

Из этого следует, что основным условием существенного увеличения производительности

$D_{кр}$ ,  $B$  - соответственно диаметр и ширина алмазного круга, м;  $\alpha$  - коэффициент, учитывающий плотность связки в зависимости от концентрации алмазных зёрен в круге [136].

За время  $\tau$  с обрабатываемого изделия будет снят материал массой  $m_m = \rho_m \cdot V_m$ , где  $\rho_m$  - плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $V_m$  - объем снятого материала

$$V_m = Q \cdot \tau, \quad (1.68)$$

$Q$  - производительность обработки, м<sup>3</sup>/с.

Удельный расход алмаза  $q$  с учетом зависимостей (1.67) и (1.68) определится

$$q = \frac{m_a}{m_m} = \frac{\rho_a}{\rho_m} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кр} \cdot B \cdot \alpha}{Q} \cdot V_{св}. \quad (1.69)$$

В данной зависимости принято, что отношение  $S/\tau$  равно скорости износа связки круга  $V_{св}$ , которая определяется зависимостью (1.65). Тогда, подставляя зависимость (1.65) в зависимость (1.69), имеем

$$q = \frac{\rho_a}{\rho_m} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кр} \cdot B \cdot \alpha}{Q} \cdot \frac{V_{зеп}}{\eta}. \quad (1.70)$$

Проведем анализ удельного расхода алмаза  $q$  с учетом изменения безразмерного коэффициента  $\eta$ , определяемого из уравнения (1.66). Для этого разрешим уравнение (1.66) относительно  $\eta$ , принимая для упрощения расчетов приближенную зависимость:  $(1 - \eta^2) \approx (1 - \eta)$ , тогда

$$\eta = 1 - \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot Q}{m \cdot V_{кр} \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \cdot \frac{1}{\left(b - \frac{Q \cdot \xi}{V_{кр} \cdot B}\right)^3}. \quad (1.71)$$

Как следует из зависимости (1.71), с увеличением производительности обработки  $Q$  безразмерный коэффициент  $\eta$  уменьшается. Таким образом, получена аналитическая зависимость, в явном виде связывающая производительность обработки  $Q$  и безразмерный коэффициент  $\eta$ .

Проведем анализ зависимости (1.69) для определения удельного расхода алмаза  $q$  с учетом зависимости (1.71). Для этого подставим зависимость (1.71) в (1.69):



$$q = \frac{\rho_a}{\rho_m} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кр} \cdot B \cdot \alpha}{Q} \cdot V_{зер} \cdot \left[ 1 - \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot Q}{m \cdot V_{кр} \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \cdot \frac{1}{\left( b - \frac{Q \cdot \xi}{V_{кр} \cdot B} \right)^3} \right]. \quad (1.72)$$

С увеличением производительности обработки  $Q$  удельный расход алмаза  $q$  первоначально уменьшается, затем увеличивается, проходя точку минимума, рис. 1.31. Проведем исследование функции удельного расхода алмаза  $q$  на экстремум. Для этого упростим зависимость (1.71), принимая в первом приближении  $\left( b - \frac{Q \cdot \xi}{V_{кр} \cdot B} \right) \approx b$ . Тогда зависимость (1.71), разрешенная относительно производительности обработки  $Q$ , примет вид:

$$Q = \frac{m \cdot V_{кр} \cdot B \cdot b^3 \cdot (1 - \eta)}{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3} \cdot \sqrt{\frac{t}{\rho}}. \quad (1.73)$$

Определим удельный расход алмаза  $q$ , для чего подставим зависимость (1.73) в (1.69):

$$q = \frac{\rho_a}{\rho_m} \cdot \frac{630 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^3 \cdot D_{кр} \cdot \alpha \cdot V_{зер}}{m \cdot V_{кр} \cdot b^3} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \cdot \frac{1}{\eta \cdot (1 - \eta)}. \quad (1.74)$$

Как следует из зависимости (1.74), с увеличением безразмерного

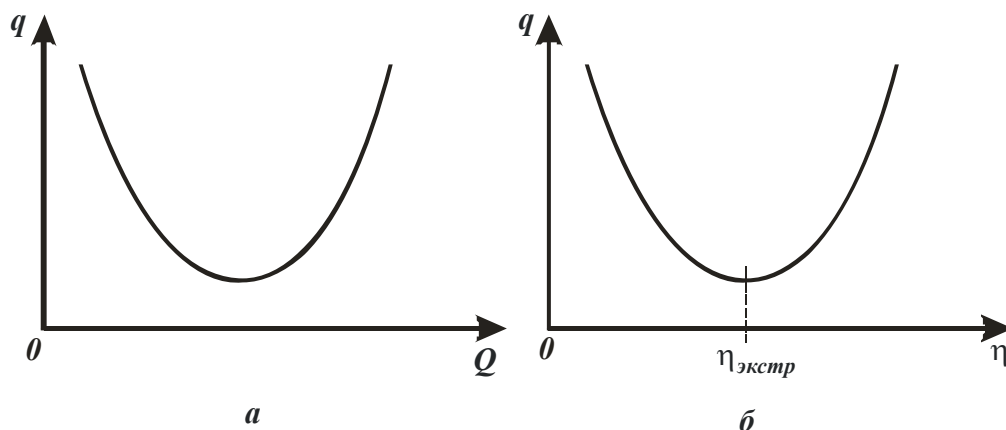


Рис. 1.31. Зависимости удельного расхода алмаза  $q$  от производительности обработки  $Q$  (а) и безразмерного коэффициента  $\eta$  (б).

коэффициента  $\eta$  удельный расход алмаза  $q$  проходит точку экстремума. Для определения экстремального значения  $\eta_{экстр}$  продифференцируем функцию  $q$  по безразмерному коэффициенту  $\eta$  и полученное выражение приравняем к нулю:

$$q'_\eta = \frac{-(1-2\eta)}{\eta^2 \cdot (1-\eta)^2} = 0, \quad \text{откуда} \quad \eta_{экстр} = 0,5. \quad (1.75)$$

Таким образом установлено, что в точке экстремума функции  $q$  безразмерный коэффициент  $\eta$  принимает значение 0,5. Подставляя в зависимость (1.73) это значение, можно определить экстремальное значение производительности обработки  $Q$ .

Докажем, что в точке экстремума функция  $q$  принимает минимальное (а не максимальное) значение. Для этого возьмем вторую производную от функции  $q$  по безразмерному коэффициенту  $\eta$ :

$$q''_\eta = \frac{\eta \cdot (1-\eta) + (1-2\eta) \cdot (1-\eta) - (1-2\eta) \cdot \eta}{\eta^4 \cdot (1-\eta)^4}. \quad (1.76)$$

Подставляя в зависимость (1.76) экстремальное значение безразмерного коэффициента  $\eta_{экстр} = 0,5$ , видим, что вторая производная  $q''_\eta$  принимает положительное значение. Следовательно, в точке экстремума удельный расход алмаза  $q$  принимает минимальное значение, что и требовалось доказать.

Определим технологическую себестоимость обработки  $C$ , для чего воспользуемся расчетной зависимостью, приведенной в работе [118]:

$$C = a_1 \cdot q + \frac{a_2}{Q \cdot \rho_m}. \quad (1.77)$$

где  $a_1$  - стоимость алмаза в круге, коп/мг;  $a_2$  - зарплата рабочего, коп/с;  $q$  - удельный расход алмаза, мг/г;  $Q$  - производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $\rho_m$  - плотность обрабатываемого материала, г/м<sup>3</sup>.

Зависимость (1.77) содержит два слагаемых. С увеличением производительности обработки  $Q$  первое слагаемое (удельный расход алмаза  $q$ ) изменяется по экстремальной зависимости (рис. 1.31), а второе слагаемое уменьшается. Очевидно, технологическая себестоимость обработки  $C$  также будет изменяться по экстремальной зависимости, проходя точку минимума. Однако, экстремальные значения производительности обработки  $Q$  для минимумов удельного расхода алмаза  $q$  и технологической себестоимости обработки  $C$  будут

различны.

Для определения экстремального значения  $Q$ , соответствующего минимуму технологической себестоимости обработки  $C$ , продифференцируем функцию  $C$  по параметру  $Q$  и полученное выражение приравняем нулю

$$a_1 \cdot q'_Q - \frac{a_2}{\rho_m} \cdot \frac{1}{Q^2} = 0. \quad (1.78)$$

Первая производная  $q'_Q$  в точке минимума удельного расхода алмаза  $q$  (рис. 1.31) равна нулю. Исходя из уравнения (1.78), выполняется условие  $q'_Q > 0$ . Следовательно, точка минимума технологической себестоимости обработки  $C$  расположена на восходящей (правой) ветви экстремальной зависимости  $q-Q$ , т.е. смещена в область больших значений производительности обработки  $Q$ , рис. 1.32. Показанные на рисунке значения  $Q_1$  и  $Q_2$  определяют экстремальные значения производительности обработки в точках минимума удельного расхода алмаза  $q$  и технологической себестоимости обработки  $C$ .

Производительность обработки  $Q$  является функцией от безразмерного коэффициента  $\eta$  и определяется зависимостью (1.71). С уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$  производительность обработки  $Q$  увеличивается. Следовательно, минимум технологической себестоимости обработки  $C$  достигается при меньших значениях

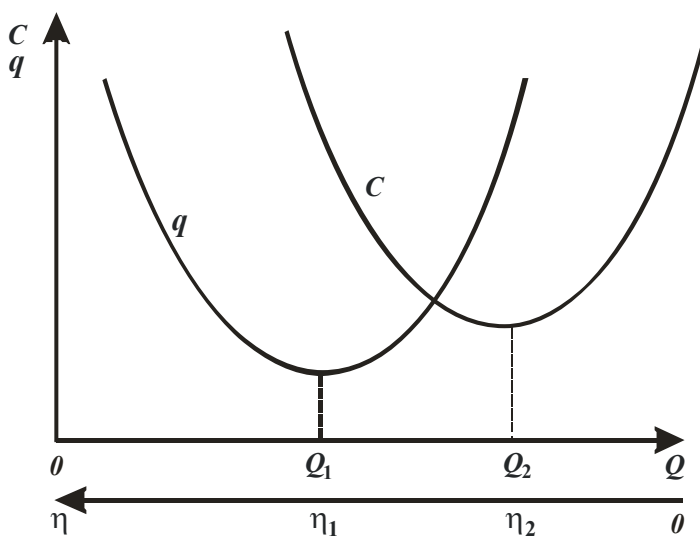


Рис. 1.32. Зависимости удельного расхода алмаза  $q$  и технологической себестоимости  $C$  от производительности обработки  $Q$  и безразмерного коэффициента  $\eta$ .

безразмерного коэффициента  $\eta$  по сравнению с минимумом удельного расхода алмаза  $q$ , рис. 1.32. Показанные на рис. 1.32 значения  $\eta_1$  и  $\eta_2$  определяют экстремальные значения безразмерного коэффициента  $\eta$  в точках минимума удельного расхода алмаза  $q$  и технологической себестоимости обработки  $C$ . В данном случае справедливо

условие  $\eta_1 > \eta_2$ .

Проведенные экспериментальные исследования алмазного электроэрозионного шлифования наплавочного материала 3Х2В8 подтвердили экстремальный характер изменения технологической себестоимости обработки  $C$  от электрического параметра – напряжения  $U$ , рис. 1.33. При изменении напряжения  $U$  до определенного значения наблюдается уменьшение технологической себестоимости обработки  $C$ . При дальнейшем увеличении напряжения  $U$  происходит рост технологической себестоимости обработки  $C$  в связи с уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$  и интенсивным выпадением режущих зерен из связки алмазного круга. Чем прочнее металлическая связка круга, тем больше значение напряжения  $U$ , при котором наблюдается увеличение технологической себестоимости обработки. Наибольшее экстремальное значение напряжения  $U$  имеет место для металлической связки М2-01.

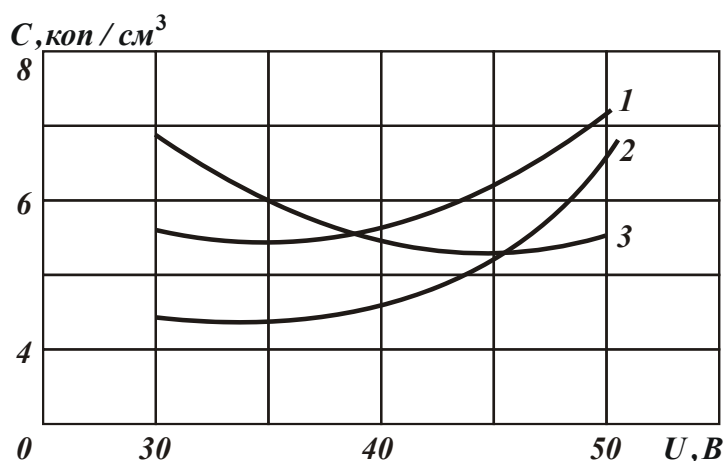


Рис. 1.33. Зависимости технологической себестоимости обработки  $C$  от напряжения  $U$  при алмазном электроэрозионном шлифовании кругами на металлических связках М2-09 (1), М1-10 (2) и М2-01 (3).

При этом экспериментально установлено, что производительность обработки  $Q$  с увеличением напряжения  $U$  увеличивается, а удельный расход алмаза  $q$  изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума. Экстремальные значения напряжения  $U$ , соответствующие точкам минимума технологической себестоимости обработки  $C$  и удельного расхода алмаза  $q$ , не совпадают.

Минимум технологической себестоимости обработки  $C$  достигается при большем значении  $U$ . Это согласуется с приведенным выше теоретическим решением.

Таким образом, теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены закономерности изменения технологической себестоимости обработки, показана связь технологической себестоимости с производительностью обработки, удельным расходом алмаза и безразмерным коэффициентом  $\eta$ . Установлено, что безразмерный коэф-

коэффициент  $\eta$  оказывает определяющее влияние на формирование технологической себестоимости обработки.

Проведем теоретический анализ безразмерного коэффициента  $\eta$  с учетом известного соотношения  $a_z / R$ , определяющего условия стружкообразования при микрорезании отдельным зерном (где  $a_z = H_{max}$  - толщина среза, м;  $R$  - радиус округления вершины зерна). Для этого представим безразмерный коэффициент  $\eta$  в виде:

$$\eta = \frac{x}{H} = \frac{x}{x + H_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{H_{max}}{x}}. \quad (1.79)$$

Используя расчетную схему, приведенную на рис. 1.34, получим тригонометрическое соотношение:

$$\frac{x}{x + R} = \sin \gamma,$$

откуда

$$x = \frac{R}{\left(\frac{1}{\sin \gamma} - 1\right)}. \quad (1.80)$$

Подставляя зависимость (1.80) в (1.79), имеем

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\sin \gamma} - 1\right) \cdot \frac{a_z}{R}}. \quad (1.81)$$

Как следует из зависимости (1.81), с увеличением соотношения  $a_z / R$  безразмерный коэффициент  $\eta$  уменьшается.

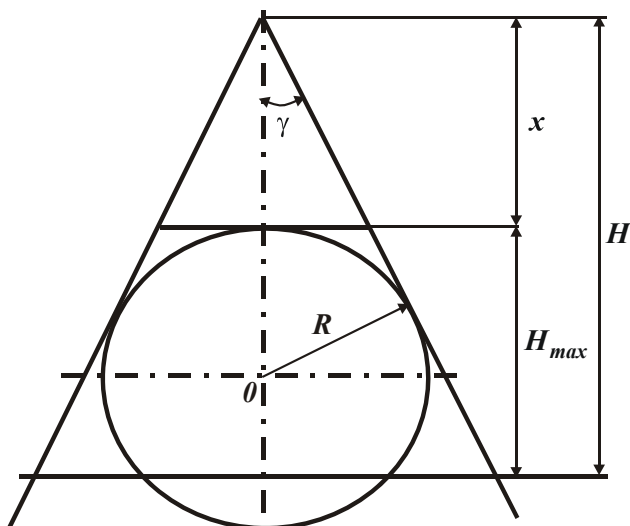


Рис. 1.34. Расчетная схема.

По данным проф. Крагельского И.В., для осуществления процесса микрорезания необходимо выполнить условие  $a_z / R > 0,04$ . Исходя из зависимости (1.81), это соответствует изменению безразмерного коэффициента  $\eta$  в пределах 0,13...0,91, табл. 1.14. Чем больше соотношение  $a_z / R$ , т.е. чем интенсивнее процесс стружкообразования при шли-

фовании, тем меньше значения безразмерного коэффициента  $\eta$  и больше производительность обработки  $Q$ , исходя из уравнения (1.66).

Наибольшему значению  $\eta=0,91$  (при  $\gamma=45^\circ$ ) соответствует наименьшее значение  $a_z/R=0,04$ . Такое же значение  $\eta$  получено экспериментально при шлифовании алмазными зернами с искусственно созданными на них площадками. При этом, по данным Дитиненко С.А., удалось уменьшить шероховатость обработки до значения  $R_a=0,1$  мкм. Начальное значение параметра  $R_a$  (при  $\eta=0$ ) составляло 2,0 мкм, т.е. шероховатость обработки уменьшилась более чем в 10 раз.

Таблица 1.14

Расчетные значения  $\eta$

$a_z/R$ \ $\gamma$ , град	0,04	0,01	0,2	0,3	0,5	1,0
45	0,91	0,805	0,67	0,58	0,45	0,29
60	0,78	0,6	0,43	0,33	0,23	0,13

Установленная связь безразмерного коэффициента  $\eta$  и соотношения  $a_z/R$  позволяет оценить возможности осуществления процесса микрорезания при шлифовании для конкретных значений  $\eta$ , полученных, например, исходя из минимума технологической себестоимости обработки (как это показано во втором разделе) или из условия обеспечения заданной шероховатости и т.д.

Иными словами, установленные по какому-либо критерию оптимальные значения безразмерного коэффициента  $\eta$  необходимо проверить с точки зрения выполнения условия  $a_z/R > 0,04$ . Поскольку при невыполнении данного условия процесс микрорезания неосуществим, необходимо корректировать установленные значения  $\eta$ .

Таким образом, в работе разработана аналитическая модель и проведен анализ параметров устойчивого во времени процесса алмазного шлифования, определены технологические возможности повышения его эффективности.

### 1.7.3.3. МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АЛМАЗНОГО ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ШЛИФОВАНИЯ

Для решения задач выбора оптимальных параметров алмазного электроэрозионного шлифования важно рассмотреть два условия (не-

обходимое и достаточное) его осуществления. Необходимое условие заключается в обеспечении равномерного во времени износа алмазного круга (стабилизации параметров его режущего рельефа) путем введения в зону резания дополнительной энергии в форме электрических разрядов с целью достижения высокой режущей способности круга (вплоть до его полного износа).

Достаточное условие заключается в оптимизации процесса шлифования, т.е. в определении оптимальных параметров режущего рельефа алмазного круга и условий шлифования на основе критериев наибольшей производительности или наименьшей технологической себестоимости обработки с учетом требований к качеству обрабатываемых поверхностей.

Изучению указанных условий в научно-технической литературе уделено довольно большое внимание, получены важные решения. Однако, эти решения получены экспериментальным путем для частных условий обработки, что не позволяет в полной мере раскрыть потенциальные возможности операций алмазного электроэрозионного шлифования и выйти на более высокий уровень технико-экономических показателей обработки.

Поэтому поставим задачу по выявлению и обоснованию новых технологических возможностей операций алмазного электроэрозионного шлифования аналитическим путем. В результате проведенных теоретических исследований нами впервые получена важная аналитическая зависимость

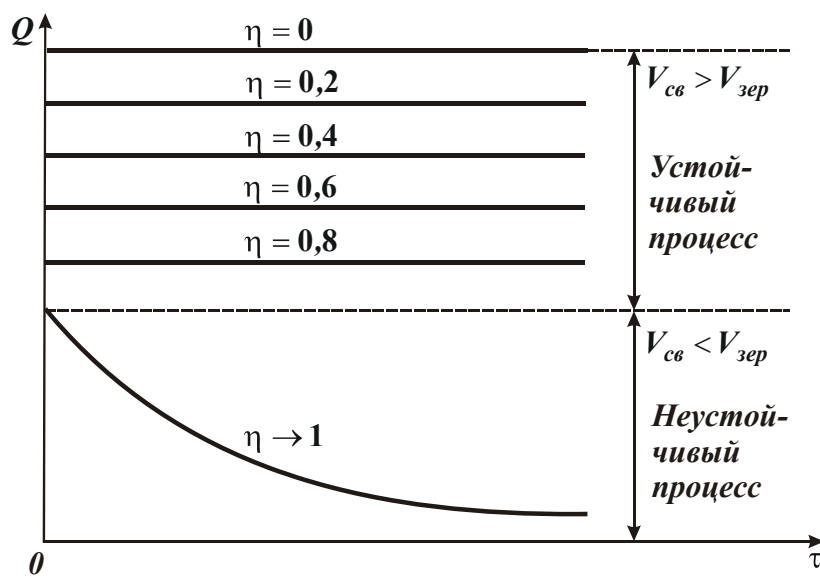


Рис. 1.35. Характер изменения производительности обработки  $Q$  с течением времени шлифования  $\tau$  для различных значений безразмерного коэффициента  $\eta$ .

зависимость (1.65), увязывающая скорости износа связки  $V_{св}$  и зерен  $V_{зер}$  круга посредством безразмерного коэффициента  $\eta$  - обобщенного параметра процесса, определяющего степень затупления зерен и изменяющегося для затупленного

зерна  $\eta \rightarrow 1$ ). Из зависимости (1.65) вытекает условие обеспечения устойчивого во времени процесса шлифования:  $V_{св} > V_{зер}$ . При невыполнении данного условия (т.е. при  $V_{св} < V_{зер}$ ) процесс шлифования будет протекать неустойчиво – алмазный круг будет работать в режиме затупления, что не позволит реализовать его потенциальные возможности.

Например, производительность обработки  $Q$  при условии  $V_{св} < V_{зер}$  с течением времени шлифования  $\tau$  будет непрерывно уменьшаться, а при условии  $V_{св} > V_{зер}$  - оставаться постоянной, рис. 1.35. При этом с уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$  в пределах от 1 до 0 производительность обработки  $Q$  будет увеличиваться.

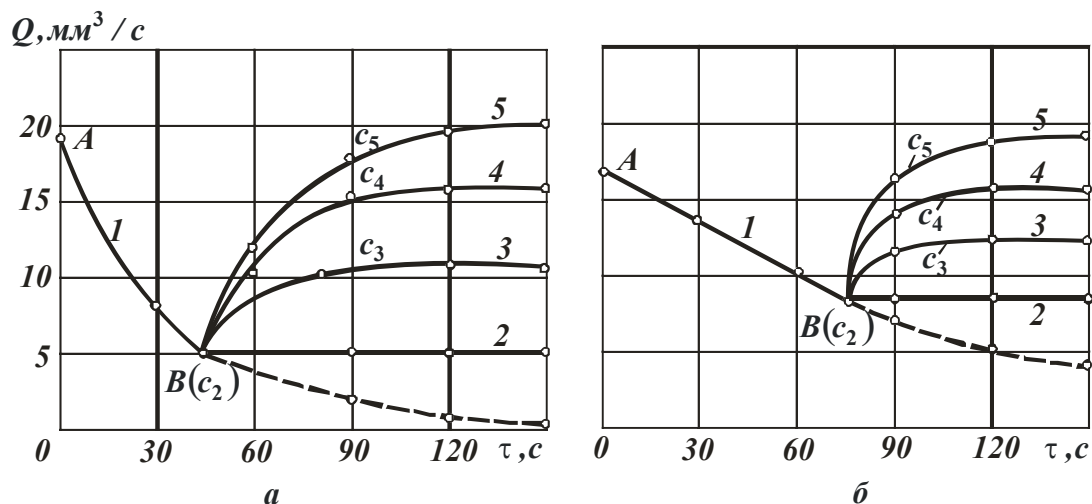


Рис. 1.36. Влияние продолжительности шлифования и условной плотности тока в цепи управления на производительность обработки твердого сплава КНТ-16 (а) и жаропрочного сплава ЭИ-765 (б):

а -  $P_y = 1,8 \text{ МПа}$  (1 -  $i_y = 0$ ; 2 -  $i_y = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ А/мм}^2$ ; 3 -  $i_y = 3 \cdot 10^{-4} \text{ А/мм}^2$ ; 4 -  $i_y = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ А/мм}^2$ ; 5 -  $i_y = 6 \cdot 10^{-4} \text{ А/мм}^2$ );

б -  $P_y = 0,6 \text{ МПа}$  (1 -  $i_y = 0$ ; 2 -  $i_y = 1 \cdot 10^{-4} \text{ А/мм}^2$ ; 3 -  $i_y = 2 \cdot 10^{-4} \text{ А/мм}^2$ ; 4 -  $i_y = 3 \cdot 10^{-4} \text{ А/мм}^2$ ; 5 -  $i_y = 4 \cdot 10^{-4} \text{ А/мм}^2$ ).

Данный теоретический результат хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований, полученными проф. Грабченко А.И. [69] при шлифовании алмазным кругом на металлической связке труднообрабатываемых материалов с применением непрерывной автономной электрохимической правки, рис. 1.36. Как следует из приведенного рисунка, при шлифовании без применения электрохимической правки алмазного круга производительность  $Q$  с течением времени обработки  $\tau$  непрерывно уменьшается. Применение элек-



трохимической правки позволяет стабилизировать во времени производительность обработки  $Q$ . При этом с увеличением условной плотности тока  $i_y$  в цепи управления производительность обработки  $Q$  увеличивается. Из этого вытекает, что кривая 1 (рис. 1.36) соответствует условию  $V_{св} < V_{зер}$  (определяющему неустойчивый процесс шлифования), а кривые 2, ..., 5 – условию  $V_{св} > V_{зер}$  (определяющему устойчивый процесс шлифования). Увеличение условной плотности тока  $i_y$  в цепи управления соответствует уменьшению безразмерного коэффициента  $\eta$  в пределах от 1 до 0.

Из зависимости (1.65) следует, что между скоростью износа связки и безразмерным коэффициентом  $\eta$  существует обратно пропорциональная связь. Увеличение скорости износа связки предполагает уменьшение безразмерного коэффициента  $\eta \rightarrow 0$ , т.е. повышение остроты зерен и соответственно режущей способности алмазного круга.

Из этого можно сделать вывод, что эффект алмазного электроэрозионного шлифования состоит прежде всего в возможности увеличения скорости износа связки  $V_{св}$  и соответственно уменьшения безразмерного коэффициента  $\eta \rightarrow 0$  за счет принудительного удаления с рабочей поверхности алмазного круга затупившихся зерен путем электроэрозионного (ударно-термического) разрушения металлической связки. По сути, полученное теоретическое решение является математическим выражением необходимого условия осуществления процесса алмазного электроэрозионного шлифования, который заключается в стабилизации во времени безразмерного коэффициента  $\eta$ .

Зная безразмерный коэффициент  $\eta$  (для заданной скорости износа металлической связки, обусловленной электроэрозионным воздействием на рабочую поверхность круга), по аналитическим зависимостям можно определить параметры режущего рельефа круга и основные технологические показатели шлифования: производительность, технологическую себестоимость, шероховатость обработки и другие.

На основе аналитических зависимостей, теоретически обосновано достаточное условие осуществления процесса алмазного электроэрозионного шлифования. Его суть состоит в определении оптимальных значений безразмерного коэффициента  $\eta$  по критериям

наибольшей производительности обработки, минимума удельного расхода алмаза и технологической себестоимости обработки, заданной шероховатости обрабатываемой поверхности, силы и мощности резания при шлифовании и т.д. В обобщенном виде структурная схема условий осуществления алмазного электроэрозионного шлифования показана на рис. 1.37.

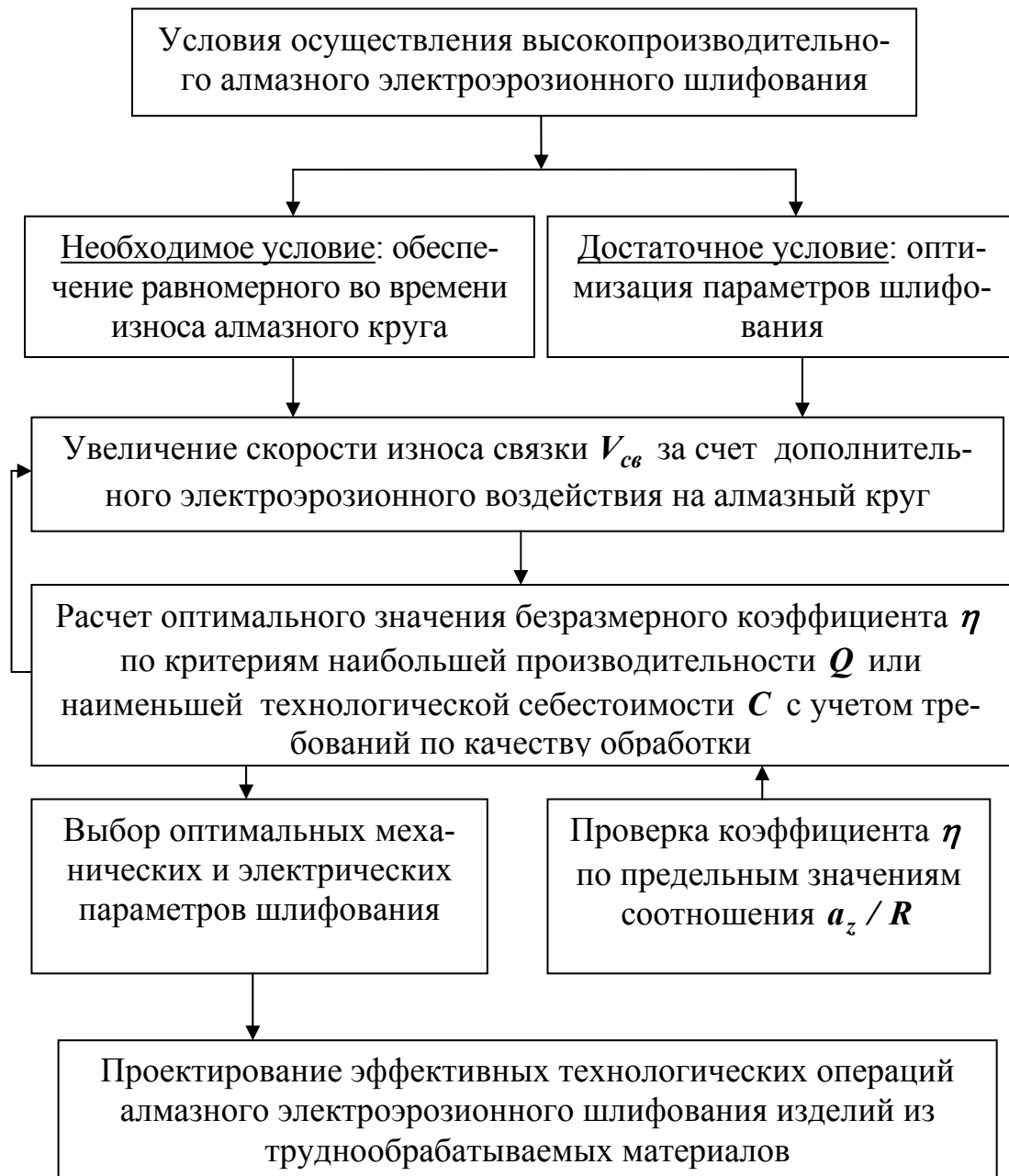


Рис. 1.37. Структурная схема выбора оптимальных условий алмазного электроэрозионного шлифования.

На рис. 1.38 приведена структурная схема оптимизации процесса шлифования, предложенная проф. Грабченко А.И. [324]. Суть ее сводится к тому, что оптимизация процесса шлифования достигается

стабилизацией (за счет применения электрохимической правки алмазного круга на металлической связке) значения высоты выступания контактирующих зерен над связкой  $h$ , оптимизированного по соответствующему выходному показателю шлифования  $Q, q, C, R_z$  (соответственно производительность, удельный расход алмаза, себестоимость обработки и шероховатость обработанной поверхности). Индексы “исх”, “уст”, “опт” (рис. 1.38) относятся к исходным, установленным и оптимизированным параметрам – высоте выступания зерен  $h$ , производительности обработки  $Q$ , удельному расходу алмаза  $q$ , себестоимости  $C$ , шероховатости  $R_z$ ;  $V_z, V_c$  - соответственно интенсивности износа зерна и съема связки;  $\tau$  - длительность шлифования.

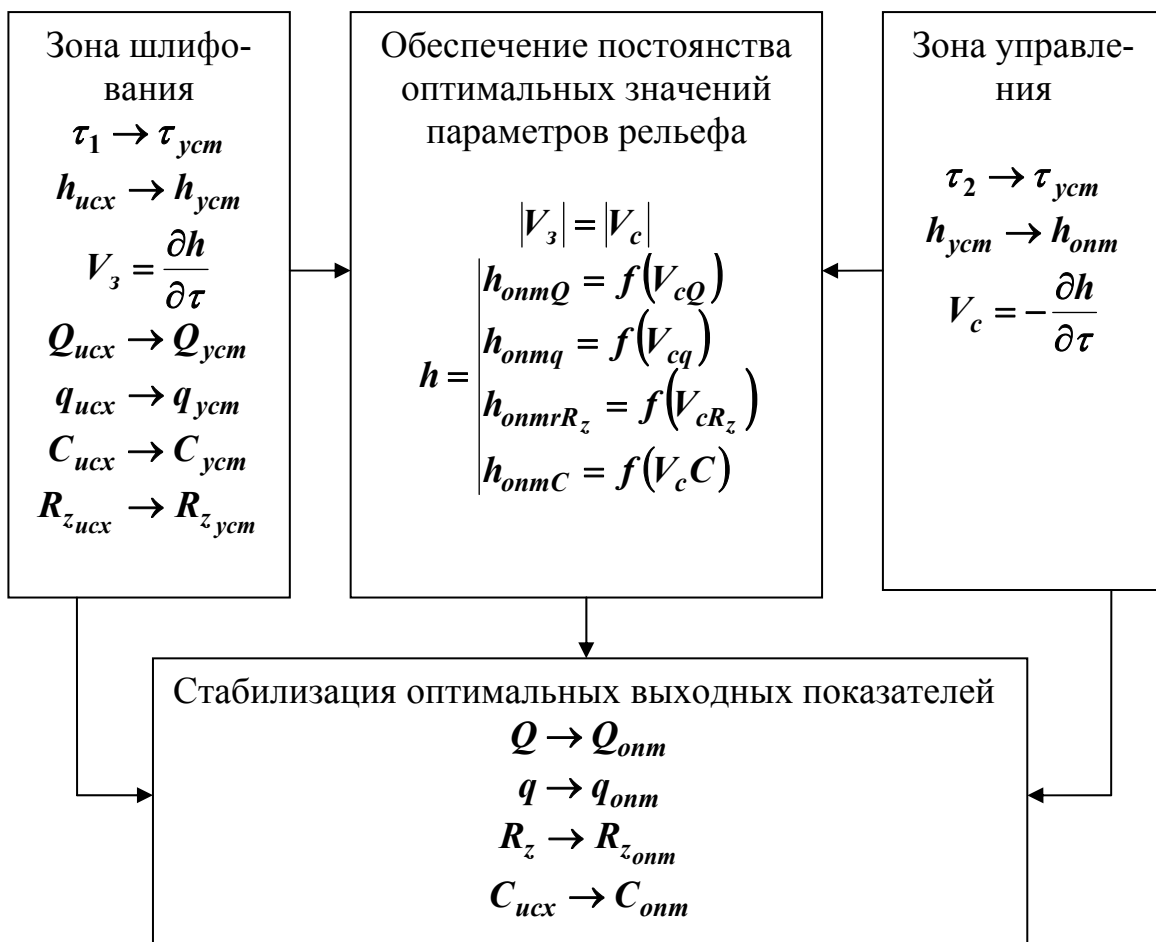


Рис. 1.38. Структурная схема оптимизации процесса шлифования.

Как видно, существует отличие указанной структурной схемы (рис. 1.38) от предложенной нами в работе структурной схемы оптимизации параметров шлифования (рис. 1.37). Оно состоит в том, что в первом случае в основу оптимизации процесса шлифования положена

высота выступания контактирующих зерен над связкой  $h$ . В нашем же случае в основу оптимизации процесса шлифования положена величина линейного износа зерен  $x$  до момента их выпадения из связки круга, определяемая безразмерным коэффициентом  $\eta$ . Высота выступания контактирующих зерен над связкой  $h$  является производной величиной, зависящей от параметров  $x$ ,  $\eta$  и соответственно скорости износа связки круга  $V_{св}$ .

На схеме (рис. 1.38) показано, что для обеспечения устойчивого во времени процесса шлифования интенсивности износа зерна и съема связки должны быть равны. Однако, исходя из полученной нами аналитической зависимости (1.65), данное условие выполняется при  $\eta \rightarrow 1$ , что, как показано выше, отрицает возможность реализации устойчивого процесса шлифования. Вместе с тем, существует “исключение из правил” – это шлифование синтетических сверхтвердых материалов, когда практически отсутствует внедрение режущих зерен алмазного круга в обрабатываемый материал. В этом случае

$x \rightarrow H$ , т.е.  $\eta = \frac{x}{H} \rightarrow 1$ , и поэтому появляется возможность реализации устойчивого процесса шлифования. Следовательно, условие  $V_{св} = V_{зер}$ , обеспечивающее устойчивый процесс шлифования, может быть осуществлено лишь при обработке синтетических сверхтвердых материалов. В остальных случаях, т.е. при шлифовании менее твердых материалов (твердых сплавов, высокопрочных пластичных материалов и т.д.) скорость износа связки  $V_{св}$  должна быть больше скорости износа зерен  $V_{зер}$  круга.

Необходимо отметить, что оптимизация процесса шлифования в соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 1.38, выполняется на основе экспериментальных данных. В нашем же случае оптимизацию параметров шлифования можно производить на основе аналитических зависимостей основных показателей обработки, несомненно, используя и дополнительно экспериментальные данные.

Рассмотрим последовательность выбора оптимальных механических и электрических параметров режима алмазного электроэрозионного шлифования на основе полученных нами теоретических решений. В качестве целевой функции примем технологическую себестоимость обработки. Поставим задачу выбора условий шлифования, обеспечивающих минимум технологической себестоимости обработки  $C \rightarrow \min$ . Для этого воспользуемся аналитической зависимостью

для определения технологической себестоимости обработки (1.77). С учетом зависимостей (1.73) и (1.74) она примет вид:

$$C = \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot A_1}{m \cdot V_{кр} \cdot b^3} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \cdot \frac{1}{(1-\eta)} \cdot \left( \frac{A_1}{\eta} + B_1 \right), \quad (1.82)$$

где  $A_1 = \frac{\rho_a}{\rho_m} \cdot \pi \cdot D_{кр} \cdot B \cdot \alpha \cdot V_{зер} \cdot a_1$ ;  $B_1 = \frac{a_2}{\rho_m}$ .

Как следует из зависимости (1.82), безразмерный коэффициент  $\eta$  оказывает на технологическую себестоимость обработки  $C$  противоположное влияние, т.е. зависимость  $C - \eta$  носит экстремальный характер. Для определения экстремума (минимума) функции  $C$ , продифференцируем ее по безразмерному коэффициенту  $\eta$  и полученное выражение приравняем нулю. В результате имеем:

$$\eta^2 + 2 \cdot z \cdot \eta - z = 0, \quad (1.83)$$

где  $z = \frac{A_1}{B_1} = \pi \cdot D_{кр} \cdot B \cdot \alpha \cdot V_{зер} \cdot \rho_a \cdot \frac{a_1}{a_2}$ .

Пришли к квадратному уравнению относительно неизвестной величины  $\eta$ . Его решение:

$$\eta = -z \pm \sqrt{z^2 + z}. \quad (1.84)$$

В зависимости (1.83) необходимо принять знак “+”, т.к. безразмерный коэффициент  $\eta$  - положительная величина. Для упрощения зависимости (1.84) умножим числитель и знаменатель на сопряженную величину  $z \pm \sqrt{z^2 + z}$ , тогда

$$\eta = \frac{1}{\left( 1 + \sqrt{1 + \frac{1}{z}} \right)}. \quad (1.85)$$

Как следует из зависимости (1.85), безразмерный коэффициент  $\eta$  принимает значения:  $\eta < 0,5$ . Из зависимости (1.73) вытекает, что экстремум (минимум) удельного расхода алмаза  $q$  достигается при  $\eta = 0,5$ . Следовательно, оптимизация параметров шлифования по критерию минимума технологической себестоимости обработки  $C$  позволяет реализовать меньшие значения безразмерного коэффициента  $\eta$ . Согласно зависимости (1.73), это ведет к увеличению множителя  $(1-\eta)$  и соответственно производительности обработки  $Q$  приблизительно в 2 раза.

Таким образом показано, что оптимизация параметров шлифования по критерию минимума технологической себестоимости обработки  $C$  позволяет более полно использовать потенциальные возможности алмазных кругов по сравнению с оптимизацией параметров шлифования по критерию минимума удельного расхода алмаза  $q$ .

Исходя из зависимости (1.85), уменьшить безразмерный коэффициент  $\eta$  можно за счет уменьшения параметра  $z$ , т.е. уменьшения  $D_{кр}, B, \alpha, V_{зер}, \rho_a, a_1$  и увеличения  $a_2$ .

Таким образом, установлено оптимальное значение безразмерного коэффициента  $\eta$ . Однако, как известно, для эффективного ведения процесса алмазного шлифования наряду с обеспечением минимума технологической себестоимости обработки  $C$  (или минимума удельного расхода алмаза  $q$ ) необходимо выполнить требования по параметрам качества обработки. Поэтому определим оптимальные условия шлифования с учетом ограничения по шероховатости обработки.

Проведем анализ аналитической зависимости для определения параметра шероховатости обработки  $R_a$  [257]:

$$R_a = 2 \cdot 5 \sqrt{\frac{(1-\eta)^4 \cdot 4 \cdot \pi^4 \cdot \bar{X}^6 \cdot R_{дет}^2 \cdot S_{np}^2 \cdot \rho}{(1+\eta)^2 \cdot tg^2 \gamma \cdot m^2 \cdot V_{кр}^2 \cdot B^2}}, \quad (1.86)$$

где  $S_{np}$  - скорость продольной подачи, м/с;  $2\gamma$  - угол при вершине режущего зерна.

Зависимость (1.86) содержит безразмерный коэффициент  $\eta$ , параметры режима шлифования, характеристики круга и детали. Принимая требуемое значение  $R_a$  и оптимальное значение безразмерного коэффициента  $\eta$ , по зависимости (1.86) можно определить скорость продольной подачи  $S_{np}$  (при заданных значениях зернистости  $\bar{X}$  и объемной концентрации зерен круга  $m$ , скорости круга  $V_{кр}$ , радиусов круга  $R_{кр}$  и детали  $R_{дет}$ , ширины круга  $B$ ).

В зависимость (1.86) глубина шлифования  $t$  явно не входит. Глубина шлифования  $t$  влияет на параметр шероховатости обработки  $R_a$  через изменение безразмерного коэффициента  $\eta$ . Поэтому обеспечить заданное значение параметра шероховатости обработки  $R_a$  можно за счет реализации оптимального значения безразмерного коэффициента  $\eta$ . Это выполняется путем регулирования интенсивности

электроэрозионного воздействия на рабочую поверхность алмазного круга на металлической связке в процессе алмазно-искрового шлифования.

К сожалению, аналитически установить связь между безразмерным коэффициентом  $\eta$  и интенсивностью подводимой в зону резания электрической энергии весьма сложно. Данная связь может быть установлена лишь экспериментальным путем. Для этого (при заданных механических параметрах режимов шлифования) определяется экспериментальная зависимость шероховатости обработки  $R_a$  от электрического параметра, например, величины силы тока  $I$ . По установленной зависимости, для заданного значения  $R_a$ , определяется оптимальное значение силы тока  $I$ . Полученное таким образом значение  $I$  реализует оптимальное значение безразмерного коэффициента  $\eta$ , т.е. минимум технологической себестоимости обработки  $C$ .

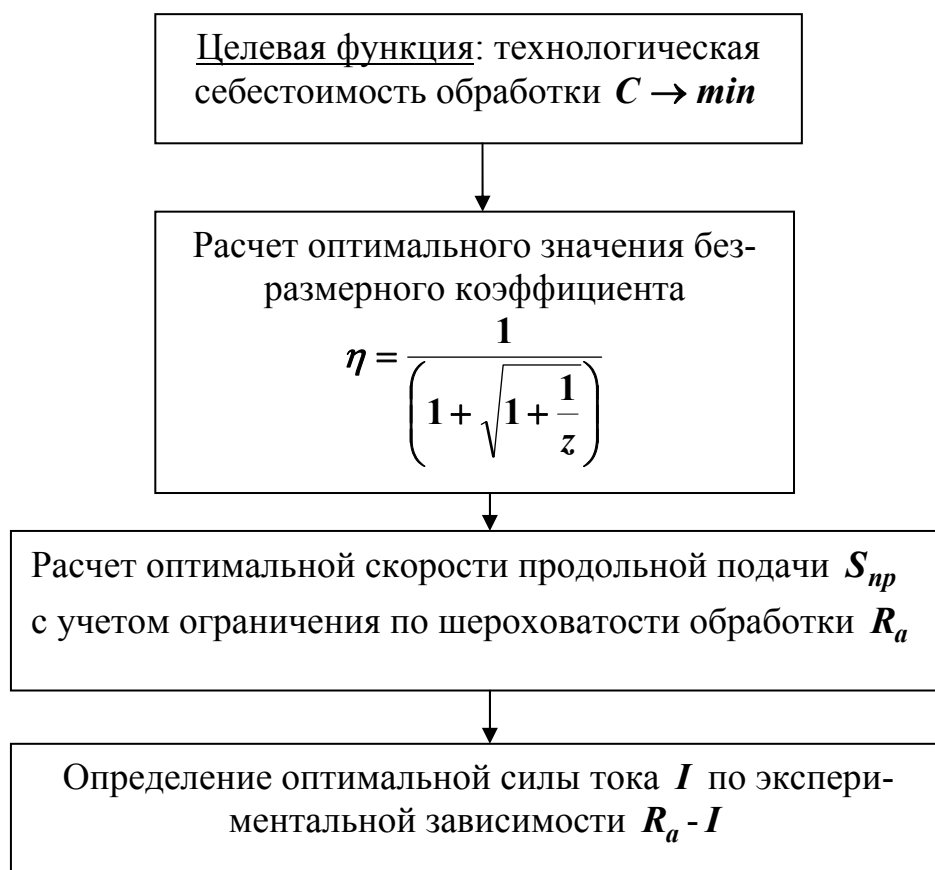


Рис. 1.39. Структурная схема методики выбора оптимальных параметров алмазного электроэрозионного шлифования.

Глубину шлифования  $t$  при этом необходимо устанавливать максимально возможной, что позволит обеспечить наибольшую производительность обработки  $Q$ . Следовательно, методика выбора оп-

тимальных условий алмазного электроэрозионного шлифования является по своей сути расчетно-экспериментальной, рис. 1.39.

Таким образом, предложена новая методика выбора оптимальных условий алмазного электроэрозионного шлифования, позволяющая в максимальной степени использовать высокие потенциальные возможности этого прогрессивного метода обработки.

#### 1.7.4. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

В настоящее время на практике используется достаточно большое количество кинематических схем шлифования, выполняемых периферией и торцом круга с различным характером подач. Это позволяет в каждом конкретном случае выбрать оптимальную схему обработки с учетом требований по производительности, качеству и точности обработки и другим показателям. Вместе с тем, в теории шлифования в полной мере не выявлены технологические возможности данных схем. Поэтому проведем теоретическое обоснование технологических возможностей многообразия известных кинематических схем шлифования периферией и торцом алмазного круга.

Для анализа кинематических схем шлифования с точки зрения производительности обработки  $Q$  рассмотрим известную расчетную зависимость:

$$Q = S_{\text{сумм}} \cdot V_{\text{кр}}, \quad (1.87)$$

где  $S_{\text{сумм}}$  - суммарная мгновенная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга,  $\text{м}^2$ ;  $V_{\text{кр}}$  - скорость круга,  $\text{м/с}$ .

Очевидно, увеличить  $Q$  можно за счет увеличения параметров  $S_{\text{сумм}}$  и  $V_{\text{кр}}$ . Увеличение параметра  $S_{\text{сумм}}$  предполагает увеличение толщин срезов отдельными зернами и количества одновременно работающих зерен (за счет увеличения концентрации круга и площади контакта круга с обрабатываемой деталью). Однако, зависимость (1.87) в явном виде не содержит характеристик круга и, следовательно, не отражает особенностей кинематических схем шлифования.

Известна также расчетная зависимость для определения производительности обработки при круглом наружном (плоском) шлифовании:  $Q = B \cdot t \cdot V_{\text{дет}}$ , где  $B$  - ширина шлифования,  $\text{м}$ ;  $t$  - глубина



шлифования, м;  $V_{дет}$  - скорость детали, м/с. Однако, входящий в зависимость параметр  $V_{дет}$  не связан с характеристиками круга и другими параметрами шлифования. Это не позволяет оценить возможности различных кинематических схем шлифования, отличающихся характером и площадью контакта круга с деталью, в данном случае определяемой произведением параметров  $B \cdot t$ .

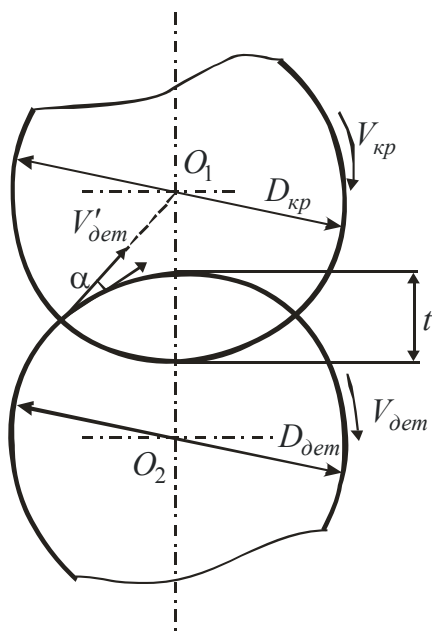


Рис. 1.40. Расчетная схема параметров круглого наружного шлифования.

Поэтому получим новую зависимость с учетом расчетной схемы, приведенной на рис. 1.40. Представим  $V_{дет} = V'_{дет} / \cos \alpha$ ;  $B \cdot t = F \cdot \cos \alpha$ , где  $V'_{дет}$  - составляющая вектора скорости детали  $V_{дет}$ , направленная по нормали к рабочей поверхности круга и определяемая зависимостью:

$$V'_{дет} = \frac{k \cdot V_{кр}}{8,35 \cdot 10^2} \cdot \left( \frac{a_{zmax}}{A} \right)^3, \quad (1.88)$$

$F = B \cdot l$  - площадь контакта круга с деталью, м<sup>2</sup>;  $l$  - длина дуги контакта круга с деталью, м;  $k$  - поверхностная концентрация зерен круга, шт/м<sup>2</sup>;  $A$  - зернистость круга, м;  $a_{zmax}$  - максимальная толщина среза отдельным зерном круга, м;  $D_{кр}$ ,  $D_{дет}$  - соответственно диаметры круга и детали, м;

$$\cos \alpha = \sqrt{2 \cdot t \cdot \left( \frac{2}{D_{кр}} + \frac{2}{D_{дет}} \right)}. \quad (1.89)$$

Тогда производительность обработки определится:

$$Q = V'_{дет} \cdot F. \quad (1.90)$$

Таким образом, полученная зависимость (1.90) позволяет отдельно учесть характеристики круга и параметры зоны контакта круга с деталью, т.к. первый параметр  $V'_{дет}$  зависит лишь от характеристик круга и скорости круга, а второй  $F$  определяет площадь контакта круга с деталью. Принимая первый параметр  $V'_{дет}$  постоянным ( $a_{zmax} = const$ ), по величине  $F$  можно оценить технологические возможности различных кинематических схем шлифования.

При шлифовании периферией круга параметр  $F$  выражается:

$$F = B \cdot \sqrt{\frac{t \cdot D_{кр} \cdot D_{дет}}{(D_{кр} + D_{дет})}} \quad (1.91)$$

Следовательно, наибольшие значения  $F$  и соответственно  $Q$  имеют место при внутреннем шлифовании. Затем, в порядке убывания – при плоском и круглом наружном шлифовании, которые характеризуются меньшей длиной дуги контакта круга с деталью. Однако на практике реализовать высокую производительность внутреннего шлифования не удастся в связи с небольшим диаметром круга.

Исходя из зависимости (1.91), основным путем увеличения параметров  $F$  и  $Q$  является увеличение глубины шлифования  $t$ , т.е. повышение длины дуги контакта круга с деталью. С этой точки зрения наиболее производительной следует рассматривать схему глубинного шлифования и схему резки материалов, когда глубина шлифования достигает радиуса круга и выше. При этом необходимо иметь в виду, что скорость детали  $V_{дет}$  должна устанавливаться из условия  $V_{дет} = V'_{дет} / \cos \alpha$ , т.е. с увеличением глубины шлифования  $t$  скорость детали  $V_{дет}$  должна уменьшаться (при условии  $a_{z_{max}} = const$ ).

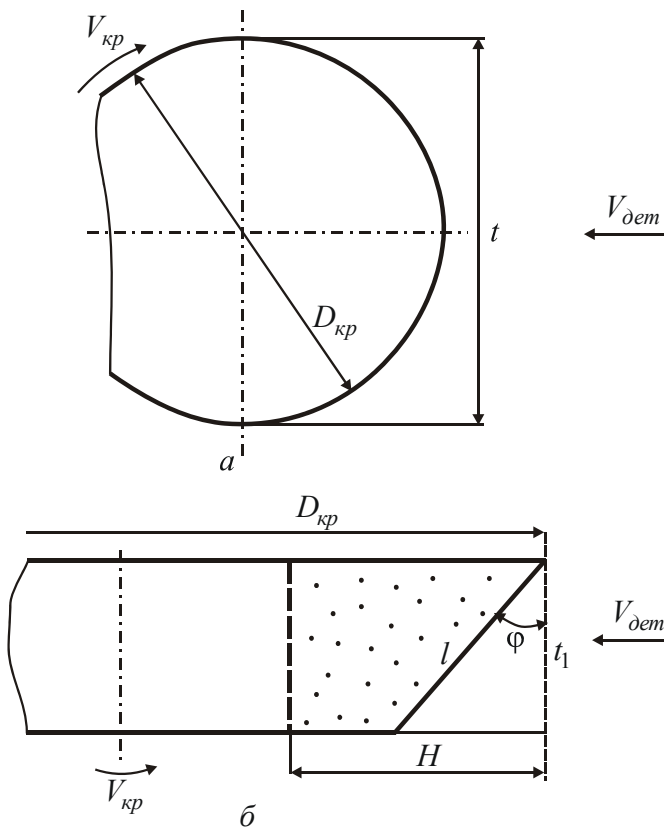


Рис. 1.41. Расчетные схемы плоского шлифования торцом круга.

Как видим, эффективность глубинного шлифования состоит в том, что при линейном увеличении глубины шлифования  $t$  скорость детали  $V_{дет}$  уменьшается по гиперболическому закону  $1/\sqrt{t}$ . В результате, производительность обработки  $Q$  увеличивается по закону  $\sqrt{t}$ .

Наибольшую производительность обработки можно достичь при глубине шлифования, равной диаметру круга  $t = D_{кр}$ , реализуя схему плоского шлифования

торцом круга, рис. 1.41,а. Площадь контакта  $F$  в данном случае равна  $D_{кр} \cdot t$ , где  $t$  - глубина шлифования при торцовом шлифовании, м. Увеличить  $F$  можно за счет создания на торце круга заборного конуса с углом  $\varphi$ , рис. 1.41,б. Тогда площадь контакта  $F$  определится

$$F = D_{кр} \cdot l \cdot \cos \varphi, \quad (1.92)$$

где  $l$  - длина контакта круга с деталью, м.

При условии  $\varphi \rightarrow 90^\circ$ , имеем:  $\cos \varphi \rightarrow 1$ ,  $l \rightarrow H$  (с учетом  $H \gg t$ ), где  $H$  - ширина рабочей части торца круга (м), т.е.

$$F = D_{кр} \cdot H. \quad (1.93)$$

Следовательно, площадь контакта  $F$  определяется геометрическими параметрами рабочей части круга: чем больше диаметр и ширина рабочей части круга, тем больше  $F$  и соответственно производительность обработки  $Q$ . Этим объясняется чрезвычайно высокая эффективность применения кинематических схем плоского шлифования торцом алмазного круга (на станках с прямолинейным и вращающимся столами) твердосплавных пластин, деталей из высокопрочных керамик и ферритов, при шлифовании и полировании пластин из твердых пород камня и т.д.

Сравним значения производительности обработки при плоском шлифовании торцом и периферией круга.

В первом случае производительность обработки равна:  $Q_1 = F \cdot V'_{дет} = H \cdot l \cdot V'_{дет}$ , где  $F = H \cdot l$  - площадь контакта обрабатываемой поверхности (пластины) с рабочей поверхностью торца круга, м<sup>2</sup>;  $H$ ,  $l$  - соответственно ширина и длина обрабатываемой поверхности, м.

Во втором случае производительность обработки равна:  $Q_2 = H \cdot t \cdot V_{дет}$ .

Как показано выше, между параметрами  $V'_{дет}$  и  $V_{дет}$  для плоского шлифования периферией круга диаметром  $D_{кр}$  существует

связь:  $V'_{дет} = V_{дет} \cdot \sqrt{\frac{4t}{D_{кр}}}$ . Тогда отношение значений производительности обработки  $Q_1$  и  $Q_2$  равно:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{2 \cdot l}{\sqrt{t \cdot D_{кр}}}. \quad (1.94)$$

Пример расчета. Для  $t = 0,01$  мм;  $D_{кр} = 300$  мм;  $l = 10$  мм, имеем

$$Q_1/Q_2=11,56.$$

Как видим, схема плоского шлифования торцом круга более производительна.

Этим можно объяснить эффективность заточки торцом круга твердосплавных и быстрорежущих инструментов по жесткой схеме. Площадь контакта круга с обрабатываемым инструментом  $F$  определяется  $F = H \cdot l$ . Очевидно, чем больше  $H$  и  $l$ , тем больше  $F$  и соответственно производительность обработки  $Q$ .

Добиться такой высокой производительности обработки при шлифовании периферией круга весьма сложно, т.к. при одинаковой ширине шлифования  $H$  длина дуги контакта периферии круга с деталью  $l$  будет меньше длины контакта торца круга с деталью. Этим объясняется тот факт, что заточка инструментов в основном выполняется по схеме торцового шлифования с применением алмазных кругов.

Для реализации процесса заточки важно обеспечить высокую режущую способность алмазного круга на металлической связке, поскольку увеличенная площадь контакта  $F$  затрудняет эффективную непрерывную электроэрозионную или электрохимическую правку круга. Необходимо отметить, что в отличие от шлифования периферией круга, при торцовом шлифовании заборным конусом круга глубина шлифования  $t$  не влияет на значения  $F$  и  $Q$ , т.е. схемы торцового многопроходного и глубинного шлифования равносильны по производительности обработки.

Исходя из зависимости (1.90), значительными возможностями в плане повышения производительности обработки располагают схемы врезного шлифования, в частности, твердосплавных пластин на станках типа “Wendt”. В данном случае обрабатываемая пластина движется по нормали к торцу алмазного круга. В связи с большой площадью контакта круга с обрабатываемой пластиной существенно увеличивается производительность обработки.

Аналогичная схема шлифования положена в основу заточки инструментов с фиксированной силой прижатия круга и обрабатываемого инструмента. Чем больше площадь обработки, тем выше производительность. Для поддержания скорости  $V'_{дет}$  на достаточно высоком уровне используются алмазные круги на органических и керамических связках, работающие в режиме самозатачивания, и алмазные круги на металлических связках, работающие в режиме непрерывной или пери-

одической электроэрозионной или электрохимической правки.

Таким образом, теоретически показано, что эффект увеличения производительности обработки  $Q$  состоит, прежде всего, в увеличении площади контакта круга с обрабатываемой поверхностью  $F$ . В связи с этим, представляется эффективным использование ленточно-го, охватывающего шлифования и других кинематических схем обработки, характеризующихся большой площадью контакта круга с обрабатываемой поверхностью.

## ГЛАВА 2

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СБОРНЫХ ФАСОННЫХ ФРЕЗ

#### 2.1. ГРАФЫ, КАК МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ СБОРНЫХ ФАСОННЫХ ФРЕЗ

В CAD/CAM системе сборных фасонных фрез, на базе геометрической теории формирования поверхностей, фреза рассматривается в системе её функционального назначения, определяя связь отдельных элементов её конструкции (например, СМП) с производящими элементами, а последние с параметрами формируемых фасонных поверхностей. Рассмотрев объекты системы, все элементы конструкции проектируемой фрезы, основное и вспомогательное оборудование с соответствующими инструментами для изготовления, использования, контроля, восстановления режущих свойств и т.д. проектируемой фрезы, наложив на них связи, получим столь необходимую математическую модель проектирования, изготовления и эксплуатации сборной фасонной фрезы.

Таким образом, из всего выше сказанного возникает необходимость описания структуры и взаимосвязи системы. В работе [204] данную необходимость реализуют в виде графа, где объектам соответствуют узлы графа, а их связям - дуги графа. При описании, как в нашем случае, столь обширной системы возможно использование вложенных графов [204], когда узел графа представляется другим графом; множественные графы, когда один и тот же объект может входить в графы, используемые для различных прикладных назначений. Связи рассматриваемой системы из  $N$  объектов характеризуются направлением - прямым или обратным, кинематикой - статичной или динамичной, детерминированной (устойчивой) или стохастичной (нарушаемой случайным образом), определением - задаются минимальным количеством  $(N-1)$  и различными способами, а остальные рассчитываются в количестве  $(N-1)^2$ .

#### 2.2. ЛИНЕЙНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КООРДИНАТ

Пусть имеются две системы координат  $(X_1Y_1Z_1)$  и  $(X_2Y_2Z_2)$ , а  $(x_1, y_1, z_1)$  есть координаты некоторой точки относительно  $(X_1Y_1Z_1)$ . Тогда положение этой же точки относительно  $(X_2Y_2Z_2)$

будет определяться отношением этих систем координат или связью  $(X_1Y_1Z_1)$  с  $(X_2Y_2Z_2)$ , оформленной в виде матрицы перехода  $(X_1Y_1Z_1 \xrightarrow{M_{12}} X_2Y_2Z_2)$  и имеющей вид [204, 291]:

$$M_{12}(x, y, z, \beta_x, \beta_y, \beta_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x & -y & -z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_x & \sin \beta_x & 0 \\ 0 & -\sin \beta_x & \cos \beta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_y & 0 & -\sin \beta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta_y & 0 & \cos \beta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_z & \sin \beta_z & 0 & 0 \\ -\sin \beta_z & \cos \beta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $x, y, z$  - координаты начала второй системы координат относительно первой;  $\beta_x, \beta_y, \beta_z$  - углы последовательных поворотов второй системы координат вокруг собственных осей, углы считаются положительными, если поворот со стороны положительного направления оси происходит по часовой стрелке.

Таким образом, линейное преобразование координат точки запишется в матричном виде  $[x_2 \ y_2 \ z_2 \ 1] = [x_1 \ y_1 \ z_1 \ 1]M_{12}$ , и будет называться координатным. При этом легко осуществить обратные преобразования путем умножения координат на обратную матрицу  $[x_1 \ y_1 \ z_1 \ 1] = [x_2 \ y_2 \ z_2 \ 1]M_{12}^{-1}$ .

### 2.3. ГРАФ РАСЧЕТА СБОРНЫХ ФАСОННЫХ ФРЕЗ

Узловой задачей при проектировании сборных фасонных фрез является координация баз крепления СМП на корпусе фрезы [204], обеспечивающей дискретное представление производящей поверхности фрезы массивом формообразующих точек режущих кромок СМП, при котором достигаются оптимальные условия формообразования.

Для решения этой задачи рассмотрим граф на рис. 2.1. Штриховые дуги считаем альтернативными, полагая, что в каждом

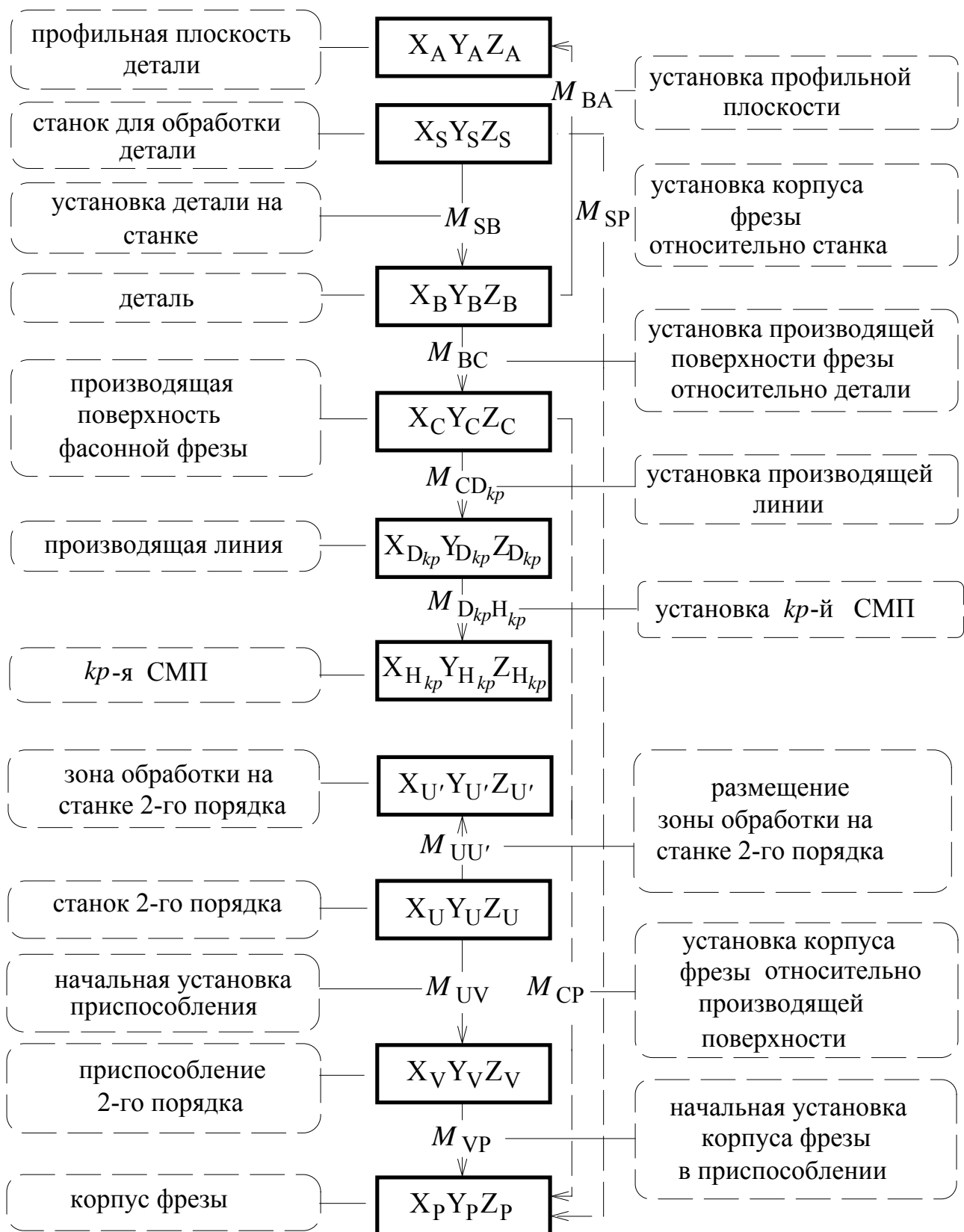


Рис.2.1. Граф проектирования сборных инструментов.

конкретном случае присутствует одна из них. Пусть на станке (система координат  $X_S Y_S Z_S$ ) установлена деталь ( $X_B Y_B Z_B$ ) с известной матрицей перехода  $X_S Y_S Z_S \xrightarrow{M_{SB}} X_B Y_B Z_B$ . Образую-



щая детали задана в системе координат  $X_A Y_A Z_A$ . Способы задания поверхности детали, расчета производящей поверхности ( $X_C Y_C Z_C$ ) и производящей линии ( $X_{D_{kp}} Y_{D_{kp}} Z_{D_{kp}}$ ) с соответствующими матрицами переходов  $M_{BC}$  и  $M_{CD_{kp}}$  будут рассмотрены далее. Размещение СМП ( $X_{H_{kp}} Y_{H_{kp}} Z_{H_{kp}}$ ,  $p = \overline{1, P_k}$ ,  $k = \overline{1, K}$ ) вдоль производящих линий характеризуется постоянными либо переменными конструктивными подачами  $S_{kp}$  и  $\Sigma_k$ . СМП имеют произвольную форму, а их режущие кромки в общем случае - единственную формообразующую точку. В каждой  $j$ -той точке  $kp$ -й производящей линии может размещаться своя СМП с рассчитанной матрицей  $M_{D_{kp}H_{kp}}$ . Гнездо под СМП оформляется в системе координат  $X_{H_{kp}} Y_{H_{kp}} Z_{H_{kp}}$  с учетом ее геометрии, наличия опорной пластины, стружколома, вида механизма крепления. Гнездо располагается в корпусе инструмента ( $X_P Y_P Z_P$ ), положение которого фиксируем либо относительно производящей поверхности инструмента  $X_C Y_C Z_C \xrightarrow{M_{CP}} X_P Y_P Z_P$ , либо относительно опорных баз станка  $X_S Y_S Z_S \xrightarrow{M_{SP}} X_P Y_P Z_P$ . Обработка гнезд выполняется на станке 2-го порядка ( $X_U Y_U Z_U$ ) в установленном на нем приспособлении ( $X_V Y_V Z_V$ ) с известной матрицей начальной установки  $M_{UV}$ , в фиксированной зоне обработки станка ( $X_{U'} Y_{U'} Z_{U'}$ ), положение которой задано матрицей  $M_{UU'}$  относительно станка 2-го порядка и где заранее определена программа обработки гнезда. Положение  $kp$ -го гнезда относительно корпуса инструмента определяется матрицами

$$M_{PH_{kp}} = M_{SP}^{-1} M_{SB} M_{BC} M_{CD_{kp}} M_{D_{kp}H_{kp}} \text{ или}$$

$$M_{PH_{kp}} = M_{CP}^{-1} M_{CD_{kp}} M_{D_{kp}H_{kp}}$$

в зависимости от того, какая из матриц -  $M_{SP}$  или  $M_{CP}$  - задана. Моделирование матриц  $\{M_{PH_k}\}_{k=\overline{1, K}}$  приводит к параметрам наладки, реализация которых на станке и приспособлении 2-го порядка переводит корпус инструмента в такое положение, когда становится возможным выполнение параметризованных программ обработки гнезд под СМП на корпусе сборного инструмента.

#### 2.4. ГРАФ КОНСТРУКЦИИ СБОРНЫХ ФАСОННЫХ ФРЕЗ

Существует большое количество вариантов конструктивного оформления сборных фасонных фрез, которое в первую очередь зависит от принятого способа крепления СМП, технологических особенностей изготовления фрезы и многого другого. Учесть все варианты на практике не представляется возможным, однако в общем виде конструкцию фасонной фрезы можно представить в виде следующего графа (рис. 2.2).

Отметим, что на графе все элементы конструкции фрезы условно разделены на две группы:

1. Элементы предназначенные для установки и крепления СМП в корпусе фрезы ( $X_{B_{kpj}} Y_{B_{kpj}} Z_{B_{kpj}}$ , где  $j = \overline{1, J_k}$ ;  $J_k$  - число крепежных элементов  $k$ -й СМП;  $k$  - число СМП расположенных вдоль производящей линии, т.е. формирующей обрабатываемый профиль). Крепежные элементы каждой  $kp$ -й СМП связаны с ней матрицей перехода  $M_{H_{kp} B_{kpj}}$  и их положение в корпусе полностью определяется положением СМП. К таким элементам можно отнести например, опорную пластину, запирающий клин СМП, крепежные винты СМП и т.д.
2. Элементы корпуса ( $X_{E_{nm}} Y_{E_{nm}} Z_{E_{nm}}$ ,  $n = \overline{1, N}$ ,  $m = \overline{1, M_n}$ ), которые применяются чаще всего для соединения частей сборного корпуса ( $X_{P_i} Y_{P_i} Z_{P_i}$ ). Их положение может быть задано, либо относительно  $i$ -й части корпуса  $M_{P_i E_{nm}}$ , либо относительно собранного корпуса  $M_{PE_{nm}}$ . К этим элементам относятся всевозможные винты, штифты, втулки и т.д.

Положение любого элемента конструкции фрезы относительно сборного корпуса может быть определено матрицами  $M_{PE_{nm}}$  или  $M_{PE_{nm}} = M_{PP_i} \cdot M_{P_i E_{nm}}$  или  $M_{PB_{kpj}} = M_{PH_{kp}} \cdot M_{H_{kp} B_{kpj}}$ . А положение элемента конструкции фрезы относительно  $i$ -й части сборного корпуса может быть определено матрицами  $M_{P_i E_{nm}}$  или  $M_{P_i E_{nm}} = M_{PP_i}^{-1} \cdot M_{PE_{nm}}$  или  $M_{P_i B_{kpj}} = M_{PP_i}^{-1} \cdot M_{PH_{kp}} \cdot M_{H_{kp} B_{kpj}}$ .

Расположение связей на графе подобным образом позволит в дальнейшем, при изменении положения СМП, легко скоординировать эти элементы относительно корпуса фрезы и его частей, а вме-

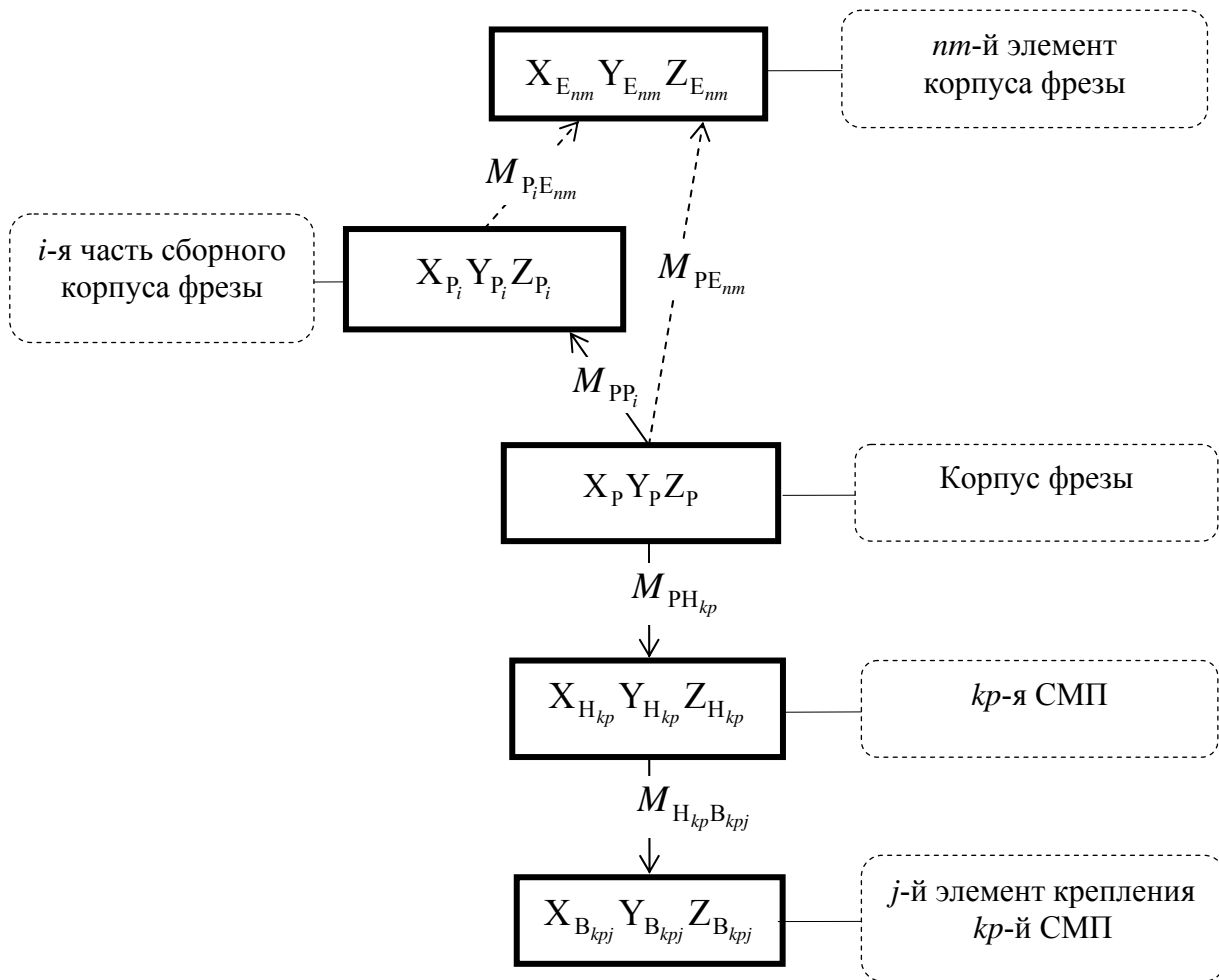


Рис.2.2. Граф конструкций сборных фасонных фрез.

сти с ними пазы, отверстия и т.д. необходимые для их установки.

## 2.5. ГРАФ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА СБОРНЫХ ФАСОННЫХ ФРЕЗ

Граф конструкции сборного корпуса фрез (рис. 2.3) является расширением графа конструкции сборной фасонной фрезы (рис. 2.2). Все элементы конструкции условно разделены на четыре группы:

1. Элементы предназначенные для установки  $kp$ -й СМП (гнезда) в  $i$ -й части корпуса фрезы ( $X_{L_{ikpq}}, Y_{L_{ikpq}}, Z_{L_{ikpq}}$ , где  $q = \overline{1, Q_{ki}}$ ;  $Q_{ki}$  - число элементов необходимых для размещения  $kp$ -й СМП в  $i$ -й части корпуса) или элементы непосредственно с ней связанные (например, стружечные канавки). Данные элементы связаны с СМП матрицей перехода  $M_{H_{kp} L_{ikpq}}$  и их положение относительно  $i$ -й части корпуса полностью определяется положением СМП  $M_{P_i L_{ikpq}} = M_{PP_i}^{-1} \cdot M_{PH_{kp}} \cdot M_{H_{kp} L_{ikpq}}$ .

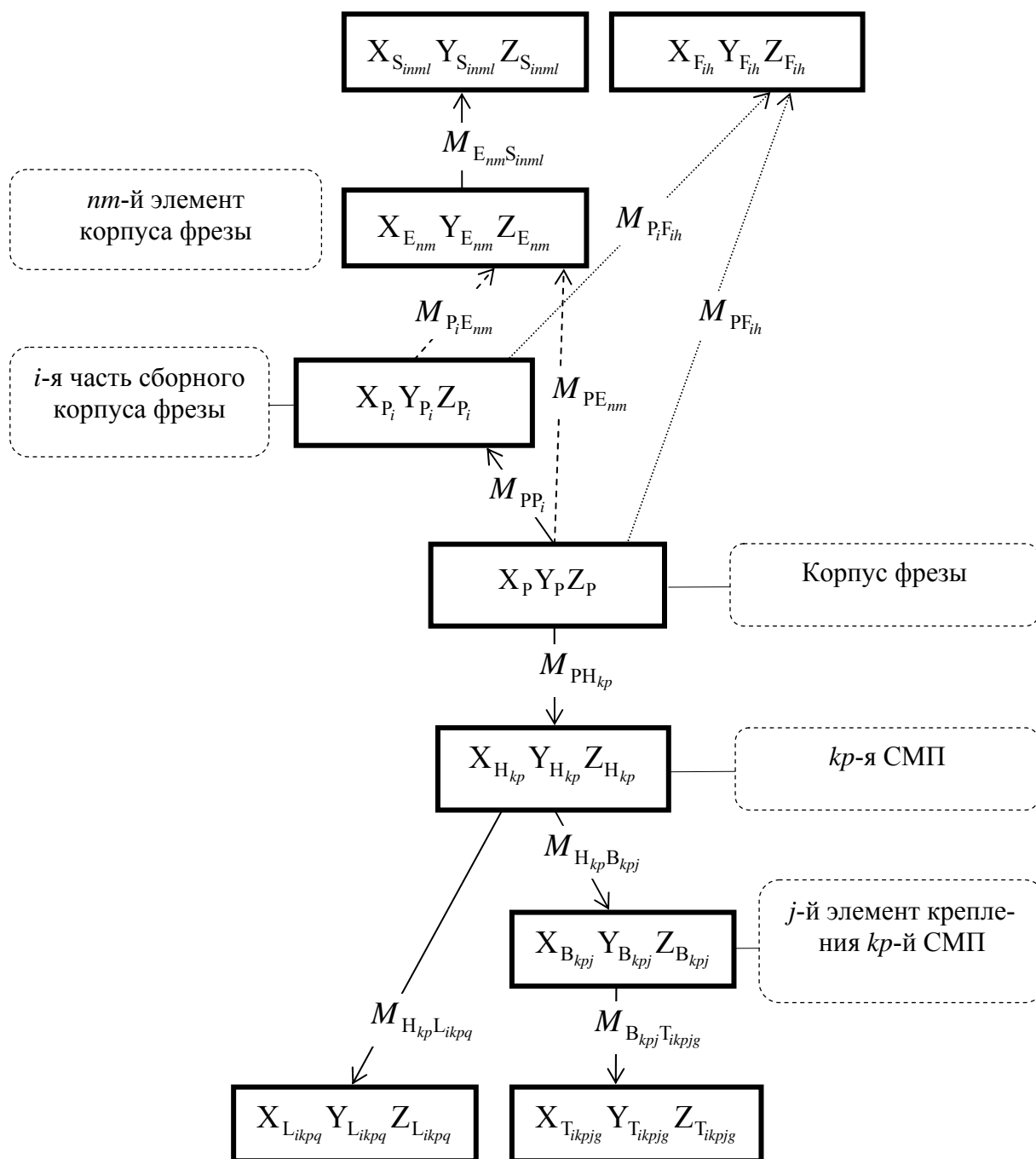


Рис.2.3. Граф конструкций корпуса сборных фасонных фрез.

2. Элементы, предназначенные для размещения  $j$ -го крепежного элемента  $kp$ -й СМП в  $i$ -й части корпуса ( $X_{T_{ikpij}} Y_{T_{ikpij}} Z_{T_{ikpij}}$ ,  $g = \overline{1, G_{kji}}$ ,  $G_{kji}$  - число элементов необходимых для размещения  $j$ -го крепежного элемента  $kp$ -й СМП в  $i$ -й части корпуса). Их положение задается относительно  $j$ -го крепежного элемента  $kp$ -й СМП ( $X_{B_{kpij}} Y_{B_{kpij}} Z_{B_{kpij}}$ ) матрицей  $M_{B_{kpij}T_{ikpij}}$ , а относительно  $i$ -й части корпуса их положение определяется как

$$M_{P_i L_{ikpq}} = M_{PP_i}^{-1} \cdot M_{PH_{kp}} \cdot M_{H_{kp} B_{kpj}} \cdot M_{B_{kpj} T_{ikpjg}}.$$

3. Элементы  $(X_{F_{ih}} Y_{F_{ih}} Z_{F_{ih}}, h = \overline{1, H_i})$ , которые являются вспомогательными (например, технологические отверстия) и никак не связаны с расположением СМП. Их положение может быть задано, либо относительно  $i$ -й части корпуса  $M_{P_i F_{ih}}$ , либо относительно сборного корпуса  $M_{PF_{ih}}$ .
4. Элементы  $(X_{S_{inml}} Y_{S_{inml}} Z_{S_{inml}}, l = \overline{1, L_{in}})$ , которые применяются для расположения соединительных элементов сборного корпуса  $(X_{P_i} Y_{P_i} Z_{P_i})$ . Их положение задается относительно  $nm$ -го элемента корпуса  $(X_{E_{nm}} Y_{E_{nm}} Z_{E_{nm}})$  матрицей  $M_{E_{nm} S_{inml}}$ , а относительно  $i$ -й части корпуса определяется как  $M_{P_i S_{inml}} = M_{P_i E_{nm}} \cdot M_{E_{nm} S_{inml}}$  или  $M_{P_i S_{inml}} = M_{PP_i}^{-1} \cdot M_{PE_{nm}} \times M_{E_{nm} S_{inml}}$ .

## 2.6. ДИСКРЕТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В работе [204] подробно рассмотрен вопрос о математическом представлении описании различных поверхностей, поэтому мы рассмотрим лишь некоторые моменты, которые в большей мере применимы для сборных фасонных фрез.

Поверхности, которые формируются фасонными фрезами можно отнести к разряду «жестких» поверхностей, которые допускают три способа дискретного представления [204]:

- 1) дискретное представление множеством точек с известными в них функциями и значениями параметров:

$$\{RP(\varphi_{1i}, \varphi_{2j}), \varphi_{1i}, \varphi_{2j}\}_{i=\overline{1, I}, j=\overline{1, J}};$$

- 2) дискретное представление множеством направляющих:

$$\{RP(\varphi_{1i}, \varphi_2), \varphi_{1i}\}_{i=\overline{1, I}};$$

- 3) дискретное представление множеством образующих:

$$\{RP(\varphi_1, \varphi_{2j}), \varphi_{2j}\}_{j=\overline{1, J}}.$$

## 2.7. ОБРАЗУЮЩАЯ (НАПРАВЛЯЮЩАЯ) ПОВЕРХНОСТИ

Каждая образующая определяется набором конструктивных параметров. Большинство образующих представляют собой различные сочетания ограниченного числа “типовых” кривых [204] (отрезок прямой, дуга окружности, отрезок архимедовой спирали и т.д.). Каждая кривая определяется своими параметрами и координатами опорных точек. Для задания образующей в каноническом виде используют его дискретное представление множеством точек с предварительно рассчитанными в каждой из них координатами, профильным углом, радиусом кривизны и длиной дуги профиля (рис. 2.4.)

$$\{x_{0j}, y_{0j}, \sigma_{0j}, \rho_{0j}, S_{0j}\}_{j=1, \overline{J}},$$

где  $x_{0j}, y_{0j}$  - координаты  $j$ -й точки;  $\sigma_{0j}$  - профильный угол;  $\rho_{0j}$  - радиус кривизны;  $S_{0j}$  - длина дуги  $j$ -го участка профиля;  $J$  - число точек дискретного представления.

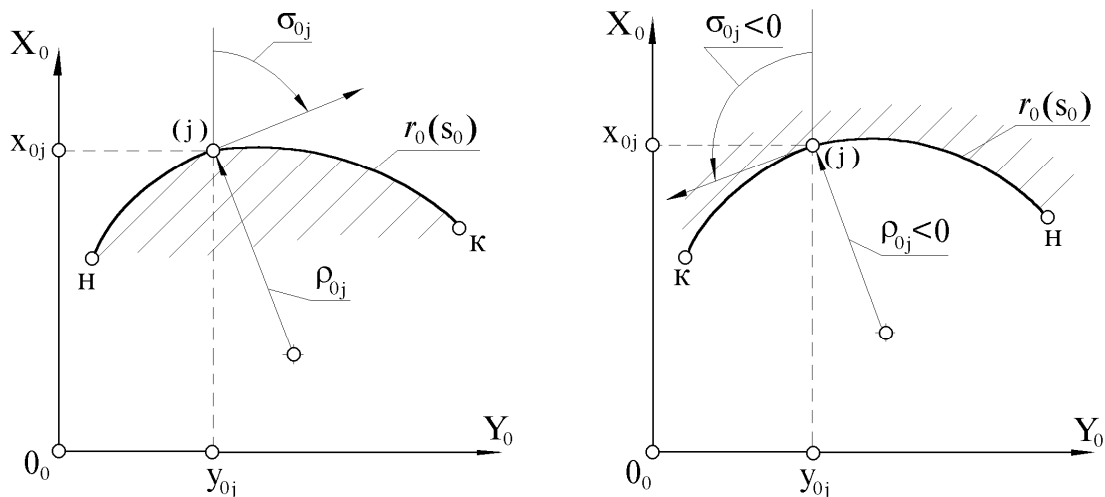


Рис.2.4. Функции профиля.

Образующая может быть пространственной либо плоской кривой. Переход от пространственной к плоской (плоскость  $X_0O_0Y_0$ ) образующей - профилю - позволяет учитывать расположение материала относительно профиля с помощью всего лишь одной скалярной функции - профильного угла  $\sigma_0$ . Действительно, изменение направления отсчета длины дуги профиля  $S_0$  приводит к изменению профильного угла  $\sigma_0$  и знака радиуса кривизны профиля  $\rho_0$ . Поэтому, введя определенное правило отсчета направления длины дуги профиля, с помощью каждой из этих функций можно отразить нахождение материала с одной из сторон профиля. Для этого условимся направ-

лением обхода из начальной точки (н) в конечную точку (к) профиля при его рассмотрении из области отрицательных значений оси  $Z_0$  считать такое, при котором материал остается справа по ходу движения. В результате получим следующие правила отсчета (рис. 2.4):

$\sigma_0$  - отсчитывается от оси  $X_0$  по часовой стрелке со знаком плюс до вектора, касательного к профилю в рассматриваемой точке и совпадающего по направлению с направлением обхода профиля;

$\rho_0$  - положителен на выпуклых и отрицателен на вогнутых участках профиля.

В параметрическом виде образующую поверхности можно описать функцией:

$$\{\bar{r}_0(\varphi_1), \bar{r}_{0\varphi_1}(\varphi_1), \bar{r}_{0\varphi_1\varphi_1}(\varphi_1), \bar{N}_0(\varphi_1), \bar{M}_0(\varphi_1), \bar{N}_{0\varphi_1}(\varphi_1), \bar{M}_{0\varphi_1}(\varphi_1)\}$$

с независимым параметром  $\varphi_1$ . Здесь в качестве функций образующей добавлены два неколлинеарных единичных вектора  $\bar{N}_0(\varphi_1)$  и  $\bar{M}_0(\varphi_1)$  нормальных к образующей и их первые производные. Эти векторы могут нести дополнительную информацию как векторы нормали в точке образующей к поверхностям, в результате пересечения которых она получена. Важно отметить коллинеарность их векторного произведения и касательного к образующей вектора.

Вычисление функций образующих зависит от статуса параметра  $\varphi_1$  - является ли он свободным, т.е. назначается, или - связанным, т.е. рассчитывается. В обоих случаях целесообразно перейти к дискретному представлению образующей множеством  $j = \overline{1, J}$  точек, в каждой из которых рассчитаны значения функций для значений  $\{\varphi_{1j}\}_{j=\overline{1, J}}$  параметра  $\varphi_1$ . При этом расчет дискретного представления

сопровождается переходом от параметра  $\varphi_1$  к длине дуги  $S_0$  кривой и соответствующим ей функциям, считая  $S_0$  в дальнейшем независимым параметром кривой с тем, чтобы не использовать производные  $S_{0\varphi_1} = 1, S_{0\varphi_1\varphi_1} = 0$ . Несмотря на индивидуальный характер расчета

дискретного представления  $\{r_{0j}, r_{0S_{0j}}, r_{0S_0S_{0j}}, \bar{N}_{0j}, \bar{M}_{0j}, \bar{N}_{0S_{0j}}, \bar{M}_{0S_{0j}}, S_{0j}\}_{j=\overline{1, J}}$  пространственных образующих или  $\{x_{0j}, y_{0j}, \sigma_{0j}, \rho_{0j}, s_{0j}\}_{j=\overline{1, J}}$  профилей (для последних он допускает

существенную унификацию), главное его достоинство состоит в одноразовом исполнении, предшествующем каким-либо расчетам с

участием образующих. Далее в случае свободного параметра  $\varphi_1$  рассчитанное дискретное представление непосредственно используем в последующих расчетах, а в случае связанного параметра  $\varphi_1$  целесообразно вслед за дискретным представлением и на его основе восстановить единой для всех образующих процедурой аналитическое представление: профилей - двумя кубическими сплайн-функциями  $x_0 = x_0(S_0)$  и  $y_0 = y_0(S_0)$ , а пространственных образующих - девятью сплайн-функциями  $\bar{r}_0 = \bar{r}_0(S_0)$ ,  $\bar{N}_0 = \bar{N}_0(S_0)$  и  $\bar{M}_0 = \bar{M}_0(S_0)$ , наличие которых обеспечит единообразный расчет функций

$$\{x_0(S_0), y_0(S_0), \sigma_0(S_0), \rho_0(S_0)\}, \quad (2.1)$$

$$\{\bar{r}_0(S_0), \bar{r}_{0S_0}(S_0), \bar{r}_{0S_0S_0}(S_0), \bar{N}_0(S_0), \bar{M}_0(S_0), \bar{N}_{0S_0}(S_0), \bar{M}_{0S_0}(S_0)\} \quad (2.2)$$

профилей и пространственных образующих при изменении параметра  $S_0$ .

В работе [204] дискретное представление образующей реализовано в три этапа:

1. Расчет по конструктивным параметрам образующей параметры и координаты опорных точек участков “типовых” кривых. Выполняемая функция имеет вид: {набор конструктивных параметров образующей}  $\rightarrow \{K[...], P[...]\}$ , где  $K[...]$  - массив кодов участков;  $P[...]$  - массив параметров и координат опорных точек участков.
2. Расчет дискретного представления “типовых” кривых. После определения массивов  $K$  и  $P$  рассчитываются параметры дискретного представления образующей  $\{x_{0j}, y_{0j}, \sigma_{0j}, \rho_{0j}, S_{0j}\}_{j=1, \overline{J}}$ .
3. Объединения дискретного представления участков “типовых” кривых в одно общее дискретное представление.

Методика выполнения подобного расчета, а также выполнение сплайн-интерполяции полученных дискретных образующих подробно рассмотрена в работе [204].

## 2.8. ПОВЕРХНОСТЬ ДЕТАЛИ И ЗАГОТОВКИ

Согласно принятой схемы создаются массивы кодов участков и параметров и координат опорных точек участков, которые обозначим, как  $K_B[...]$  и  $P_B[...]$ . Параметры образующей поверхности дета-



ли рассчитывается в системе координат  $X_A \mathbf{0}_A Y_A$  (рис.2.1):

$$\{\bar{r}_{Aj}, \bar{r}_{AS_{Aj}}, \bar{r}_{AS_{A}S_{Aj}}, \sigma_{Aj}, \rho_{Aj}, S_{Aj}\}_{j=1, \overline{J_A}},$$

где  $\bar{r}_{Aj} = [x_{Aj} \quad y_{Aj} \quad 0 \quad 1]$ ;  $\bar{r}_{AS_{Aj}} = [x_{AS_{Aj}} \quad y_{AS_{Aj}} \quad 0 \quad 0]$ ;  
 $\bar{r}_{AS_{A}S_{Aj}} = [x_{AS_{A}S_{Aj}} \quad y_{AS_{A}S_{Aj}} \quad 0 \quad 0]$ ;  $J_A$  - количество точек на образующей поверхности детали.

Кубическая сплайн интерполяция позволяет рассчитать функции

$$\{\bar{r}_A(S_A), \bar{r}_{AS_A}(S_A), \bar{r}_{AS_{A}S_A}(S_A), \sigma_A(S_A), \rho_A(S_A)\}.$$

Тогда поверхность детали можно описать как

$$\begin{cases} RP^{(B)}(S_A, h) = \bar{r}_A(S_A) \cdot M_{BA}^{-1} \cdot M_B(h), \\ S_{A_{min}} \leq S_A \leq S_{A_{max}}, \\ h_{min} \leq h \leq h_{max}, \end{cases}$$

где  $h$  – параметр преобразования;  $M_B(h)$  - матрица отображающего преобразования, которая для поверхностей, имеющих прямолинейную направляющую, будет равна  $M_B(h) = M(x=0, y=0, z=h, \beta_X=0, \beta_Y=0, \beta_Z=0)$ , а для поверхности, имеющей круговую направляющую,  $M_B(h) = M(x=0, y=0, z=0, \beta_X=0, \beta_Y=0, \beta_Z=h)$  и т.д.

Когда поверхность заготовки имеет сложную форму, возникает необходимость представления ее поверхности, которое выполняется по аналогичной схеме. Результатом такого представления являются сформированные массивы  $K_{B'}[...]$  и  $P_B[...]$ , а так же рассчитанные параметры

$$\{\bar{r}_{A'j}, \bar{r}_{A'S_{A'}j}, \bar{r}_{A'S_{A'}S_{A'}j}, \sigma_{A'j}, \rho_{A'j}, S_{A'j}\}_{j=1, \overline{J_{A'}}},$$

$$\{\bar{r}_{A'}(S_{A'}), \bar{r}_{A'S_{A'}}(S_{A'}), \bar{r}_{A'S_{A'}S_{A'}}(S_{A'}), \sigma_{A'}(S_{A'}), \rho_{A'}(S_{A'})\},$$

$$\begin{cases} RP^{(B')}(S_{A'}, h') = \bar{r}_{A'}(S_{A'}) \cdot M_{B'A'}^{-1} \cdot M_{B'}(h'), \\ S_{A'_{min}} \leq S_{A'} \leq S_{A'_{max}}, \\ h'_{min} \leq h' \leq h'_{max}. \end{cases}$$

## 2.9. ПРОИЗВОДЯЩАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ФРЕЗЫ

Для дискретного представления производящей линии фрезы, помимо конструктивных параметров обрабатываемой детали, необходимо задать дополнительный параметр – начальный диаметр фрезы ( $D_\phi$ ). Тогда расчет дискретного представления можно выполнить по двум различным схемам.

### 1. Аналогично представлению образующей поверхности детали

Создаются массивы кодов участков и параметров и координат опорных точек участков, которые обозначим, как  $K_D[\dots]$  и  $P_D[\dots]$  на основе которых рассчитываются параметры производящей линии в системе координат  $X_D O_D Y_D$  (рис. 2.1):

$$\{\bar{r}_{Dj}, \bar{r}_{DS_{Dj}}, \bar{r}_{DS_{Dj}S_{Dj}}, \sigma_{Dj}, \rho_{Dj}, S_{Dj}\}_{j=1, \overline{J_D}},$$

где  $\bar{r}_{Dj} = [x_{Dj} \quad y_{Dj} \quad 0 \quad 1]$ ;  $\bar{r}_{DS_{Dj}} = [x_{DS_{Dj}} \quad y_{DS_{Dj}} \quad 0 \quad 0]$ ;  $\bar{r}_{DS_{Dj}S_{Dj}} = [x_{DS_{Dj}S_{Dj}} \quad y_{DS_{Dj}S_{Dj}} \quad 0 \quad 0]$ ;  $J_D$  - количество точек на производящей линии.

Кубическая сплайн интерполяция позволяет рассчитать функции

$$\{\bar{r}_D(S_D), \bar{r}_{DS_D}(S_D), \bar{r}_{DS_{Dj}S_{Dj}}(S_D), \sigma_D(S_D), \rho_D(S_D)\}.$$

Тогда производящую поверхность фрезы можно описать как,

$$\begin{cases} RP^{(C)}(S_D, \varphi) = \bar{r}_D(S_D) \cdot M_{CD}^{-1} \cdot M_C(\varphi), \\ S_{D_{min}} \leq S_D \leq S_{D_{max}}, \\ 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \end{cases}$$

где  $\varphi$  – параметр преобразования, угол поворота относительно оси  $Z_C$ ;  $M_C(\varphi)$  - матрица отображающего преобразования, которая для производящих поверхностей фасонных фрез равна  $M_C(\varphi) = M(x=0, y=0, z=0, \beta_X=0, \beta_Y=0, \beta_Z=\varphi)$  и т.д.

### 2. Пересчет параметров точек образующей в параметры точек производящей линии

Для этого определим номер точки  $j'$  на образующей поверхности детали, у которой величина  $\bar{j}_A \cdot \bar{r}_{Aj} = \min$ , т.е. номер точки, которая ближе всего расположена к оси  $Y_A$  и зададим номера начала  $j_H$  и конца  $j_K$  точек выполнения функции пересчета. Если вся образу-

щая участвует в пересчете, то  $j_H = 1$ , а  $j_K = J_A$ .

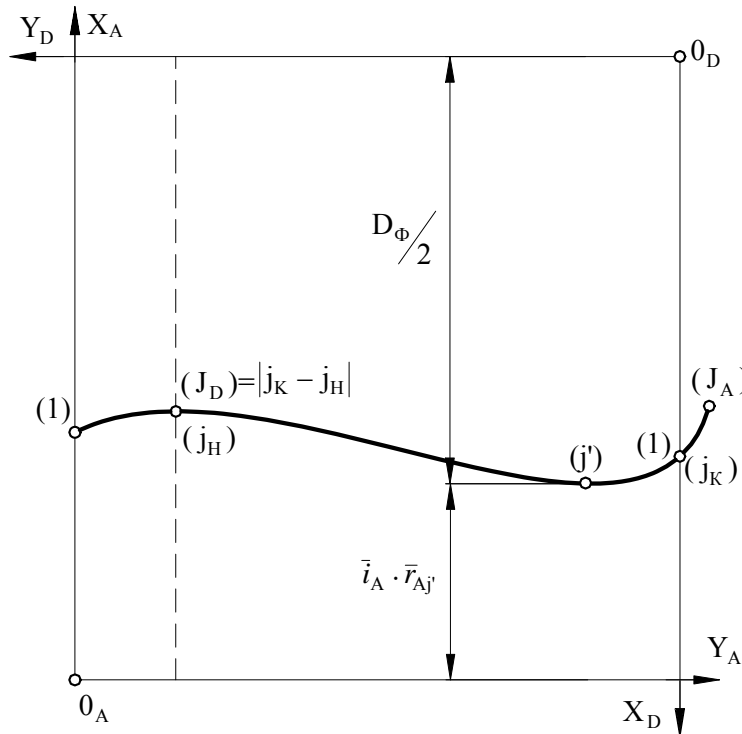


Рис.2.5. Схема пересчета образующей поверхности детали в производящую линию.

Тогда, параметры производящей линии  $\{\bar{r}_{Dj}, \bar{r}_{DS_{Dj}}, \bar{r}_{DS_{Dj}} S_{Dj}, \sigma_{Dj}, \rho_{Dj}, S_{Dj}\}_{j=1, J_D}$ , могут быть рассчитаны как (рис. 2.5),

$$\left. \begin{aligned} \bar{r}_{Dj} &= \bar{r}_A(j_K - j + 1) \cdot M_{AD}, \quad \bar{r}_{DS_{Dj}} = -\bar{r}_A S_A(j_K - j + 1) \cdot M_{AD}, \\ \bar{r}_{DS_{Dj}} S_{Dj} &= -\bar{r}_A S_A S_A(j_K - j + 1) \cdot M_{AD}, \\ \sigma_{Dj} &= \sigma_A(j_K - j + 1) - \pi, \quad \rho_{Dj} = -\rho_A(j_K - j + 1), \\ S_{Dj} &= |S_{Aj_K} - S_{A(j_K - j + 1)}| \end{aligned} \right\}_{j=1, J_D},$$

где  $J_D = |j_K - j_H|$  - количество точек на производящей линии;  $M_{AD} = M(x = \bar{i}_A \cdot \bar{r}_{Aj'}, y = \bar{j}_A \cdot \bar{r}_{Aj_K}, z = 0, \beta_X = 0, \beta_Y = 0, \beta_Z = \pi)$ .

Далее выполняется расчет, аналогичный предыдущей схеме.

## 2.10. ПОВЕРХНОСТЬ, ОПИСЫВАЕМАЯ РЕЖУЩИМИ КРОМКАМИ СМП ПРОЕКТИРУЕМЫХ ФРЕЗ В ПРОЦЕССЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Поверхность, описываемую режущими кромками СМП фрезы в процессе фрезерования представим в следующей форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{Q}_{kp}[s_k, t_1(t), \dots, t_N(t)] = \bar{r}_k(s_k) M_{D_{kp}H_{kp}}^{-1} M_{CD_{kp}}^{-1} M_{BC}^{-1} \{q_1[t_1(t), \dots, t_N(t)], \dots, \\ q_6[t_1(t), \dots, t_N(t)]\} M_{BA}, \\ s_{k_{min}} \leq s_k \leq s_{k_{max}}, k = \overline{1, K} \\ t_{n_{min}} \leq t_n \leq t_{n_{max}}, n = \overline{1, N}, \end{array} \right.$$

где  $s_k$  - длина дуги  $k$ -й режущей кромки СМП;  $r_k(s_k)$  -  $k$ -я режущая кромка СМП фрезы;  $M_{BC} \{q_1[t_1(t), \dots, t_N(t)], \dots, q_6[t_1(t), \dots, t_N(t)]\}$  - матрица перехода от системы координат  $X_B Y_B Z_B$  обрабатываемой детали к системе координат  $X_C Y_C Z_C$  производящей поверхности фрезы с учетом выполняемых фрезой и заготовкой движений в процессе фрезерования;  $t_1(t), \dots, t_N(t)$  - параметры движений.

Необходимые производные:

- 1) производная поверхности по длине дуги режущей кромки СМП фрезы

$$\begin{aligned} \overline{Q}_{kps_k}(s_k, t_1, \dots, t_N) &= \\ &= \bar{r}_{ks_k}(s_k) M_{D_{kp}H_{kp}}^{-1} M_{CD_{kp}}^{-1} M_{BC}^{-1} [q_1(t_1, \dots, t_N), \dots, q_6(t_1, \dots, t_N)] M_{BA}; \end{aligned}$$

- 2) производная по параметрам движения фрезы и заготовки

$$\begin{aligned} \overline{Q}_{kpt_n}(s_k, t_1, \dots, t_N) &= \bar{r}_k(s_k) M_{D_{kp}H_{kp}}^{-1} M_{CD_{kp}}^{-1} \times \\ &\times \left\{ \sum_{j=1}^6 M_{BC}^{-1} q_j [q_1(t_1, \dots, t_N), \dots, q_6(t_1, \dots, t_N)] q_{jt_n}(t_1, \dots, t_N) \right\} M_{BA}, n = \overline{1, N}, \end{aligned}$$

где  $M_{BC}^{-1} q_j [q_1(t_1, \dots, t_N), \dots, q_6(t_1, \dots, t_N)]$  - производная матрицы по  $j$ -му параметру установки  $q$  (ее расчет будет рассмотрен далее);

- 3) 
$$\overline{Q}_{kpt}[s_k, t_1(t), \dots, t_N(t)] = \sum_{n=1}^N \overline{Q}_{kpt_n}(s_k, t_1, \dots, t_N) V_n(t),$$

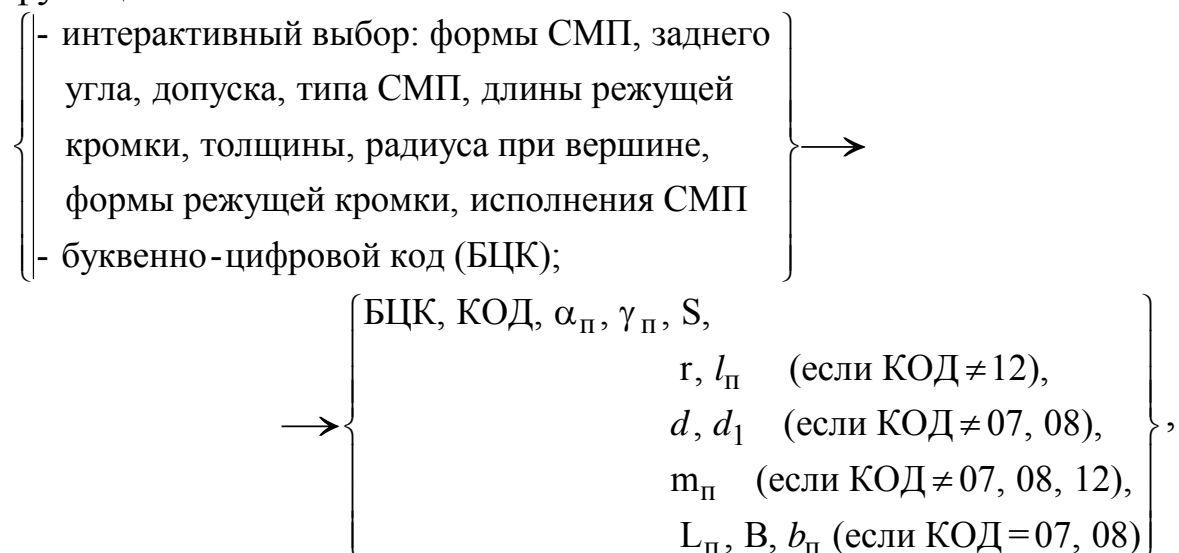
где  $V_n(t) = \frac{\partial t_n}{\partial t}$  скорость  $n$ -го движения.

## 2.11. ДИСКРЕТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СМП

Установка СМП на корпусе фрезы зависит от ее формы и параметров, определенных ГОСТ 19042-80 ... 19086-80, 24247-80 ...

24257-80. Пусть  $k$ -я СМП (система координат  $X_{H_k} Y_{H_k} Z_{H_k}$ ), размещаемая в  $j$ -й точке производящей линии, характеризуется: формой, передним  $\gamma_{nk}$  и задним  $\alpha_{nk}$  углами, толщиной  $S_{nk}$ , радиусом скругления вершины  $r_k$ , расстоянием от центра СМП до ее вершины  $L_{nk}$ , половиной угла при вершине  $\eta_{nk}$  (или углами  $\eta_{nk}$  и  $\eta_{2nk}$  для несимметричных пластин), фаской  $f_{nk}$ , количеством точек на типовом участке режущей кромки СМП  $N_{Tk}$ , которые выбираются в соответствии с ГОСТами, либо рассчитываются на основании приведенных в них параметров.

Для выбора режущей пластины и ее параметров целесообразно использовать информационно-поисковую систему с выполняемой ею функцией:



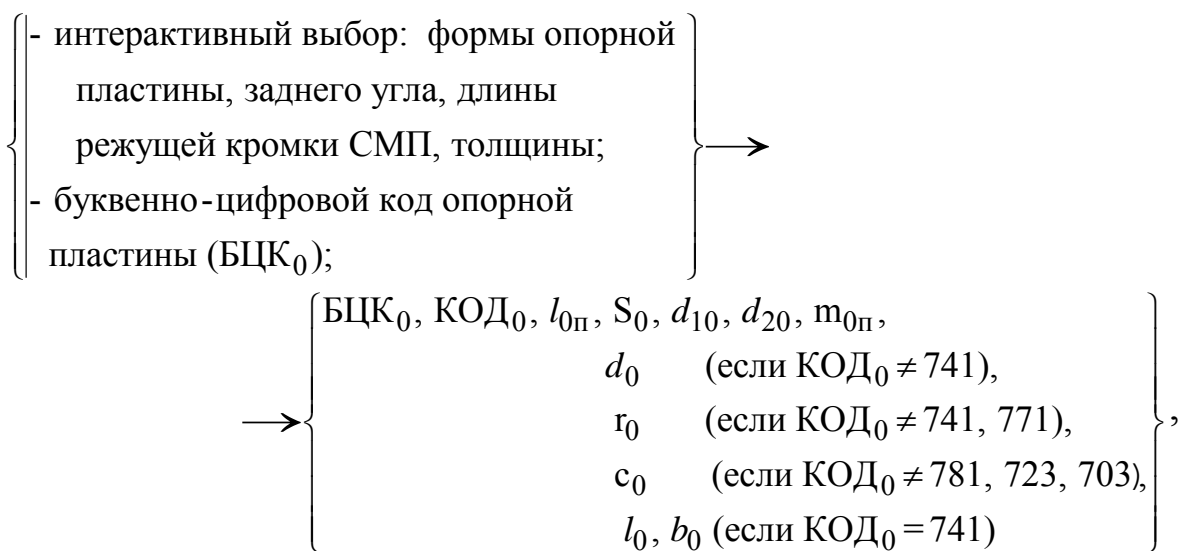
где КОД - код формы СМП (первая позиция цифрового кода).

В табл.2.1 приведены формулы для определения остальных необходимых параметров. Выполняемая при таком расчете функция имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{КОД,} \\ d \quad (\text{если КОД} \neq 07, 08), \\ m \quad (\text{если КОД} \neq 07, 08, 12), \\ L_{\text{п}}, B, \beta \quad (\text{если КОД} = 07, 08) \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ L, \eta, \eta_2 \right\}.$$

Кроме перечисленных параметров в дальнейшем потребуется знание дискретного представления режущих кромок СМП в ее собственной системе координат (рис. 2.6).

С помощью другой информационно-поисковой системы может быть выбрана опорная пластина в соответствии с ГОСТ 19073-80 ... 19083-80, ГОСТ 24254-80. Выполняемая при этом функция выглядит:



где КОД<sub>0</sub> - код формы опорной пластины (три первых позиции БЦК<sub>0</sub>).

Из приведенных параметров в расчетах используется лишь толщина  $S_0$  опорной пластины.

Таблица 2.1

Расчетные зависимости для определения дополнительных конструктивных параметров СМП

Форма СМП		Расчетные формулы
буквенный код	цифровой код	
Т	01	$L = m + 0,5d$ $\eta = \eta_2 = 30^\circ$
S	03	$L = m + 0,5d$ $\eta = \eta_2 = 45^\circ$
F	07	$L = (L_n / \cos \beta + B \cdot \operatorname{ctg} \beta) / 2$ $\beta = 84^\circ \left\{ \begin{array}{l} \eta = \pi/2 - \operatorname{arctg}(2L/B) \\ \eta_2 = \beta - \eta \end{array} \right.$ $\beta = 55^\circ$
K	08	
C	05	$L = m + 0,5d$ $\beta = 80^\circ \left\{ \begin{array}{l} \eta = \eta_2 = \beta/2 \\ \beta = 55^\circ \end{array} \right.$
D	13	
P	10	$L = m + 0,5d$ $\eta = \eta_2 = 54^\circ$
H	11	$L = m + 0,5d$ $\eta = \eta_2 = 60^\circ$
R	12	$L = 0,5d$ $\eta = \eta_2 = 0^\circ$

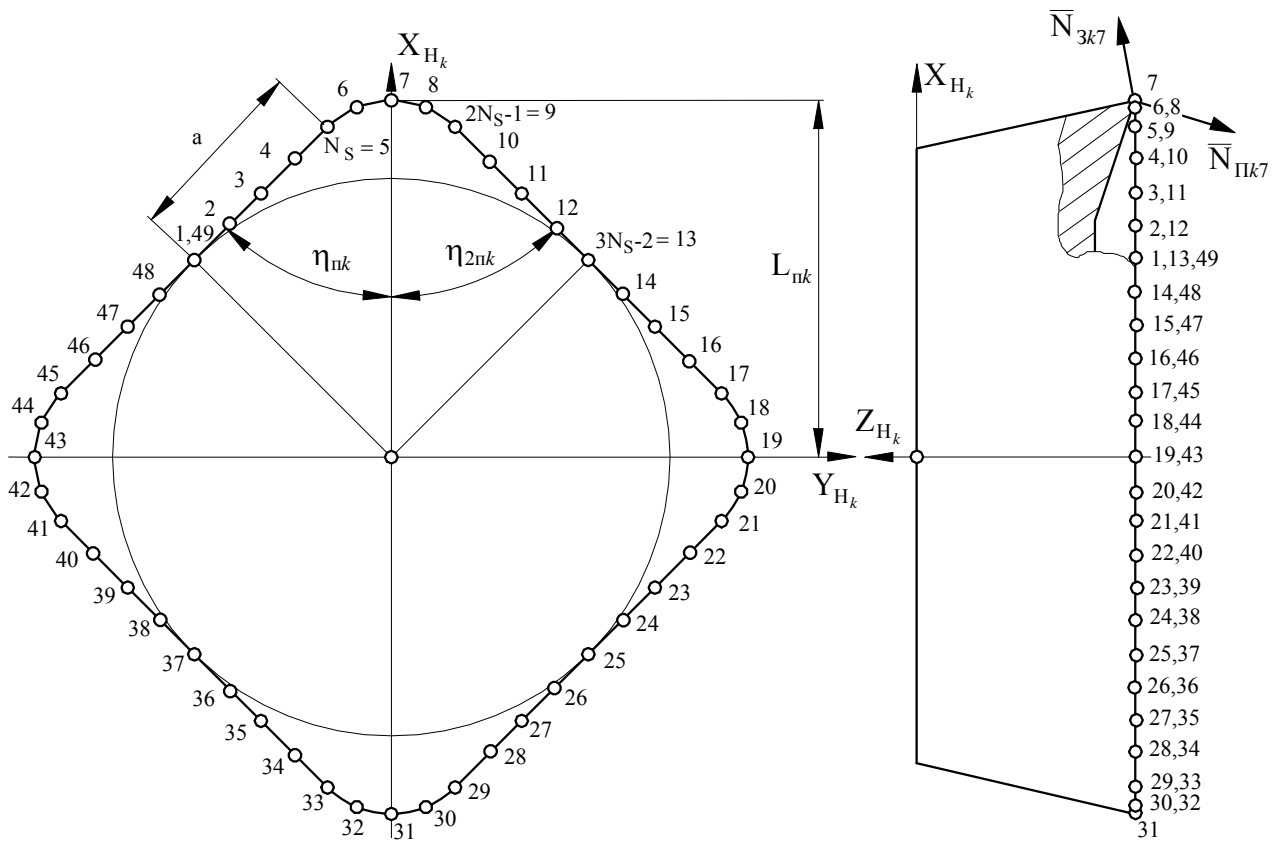


Рис.2.6. Дискретное представление режущей кромки СМП.

С помощью третьей информационно-поисковой системы может быть выбран стружколом:

- интерактивный выбор: формы стружколома, длины режущей кромки СМП, размеров порожка стружколома;
- буквенно - цифровой код стружколома (БЦК<sub>с</sub>);

$$\longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{БЦК}_c, \text{КОД}_c, l_c, d_c, L_c, B_c, S_c, n_c, m_c, \\ E_c \quad (\text{если } \text{КОД}_c = 90) \end{array} \right\},$$

где КОД<sub>с</sub> - код формы стружколома (две первых позиции БЦК<sub>с</sub>); а также механизм крепления:

- интерактивный выбор механизма крепления;
- буквенный код механизма крепления (БК<sub>м</sub>);

## 2.12. РАСЧЕТ ПЕРВОЙ И ВТОРОЙ ПРОИЗВОДНЫХ ПО ДЛИНЕ ДУГИ РЕЖУЩИХ КРОМОК СМП

Задав число СМП устанавливаемых вдоль производящей линии (К), т.е. число пластин, формирующих обрабатываемый профиль и последовательно выполняя процедуру выбора нужной СМП и дискретного представления ее режущих кромок, получим набор данных:

$$\left\{ \left\{ \bar{r}_{ki}, \sigma_{ki}, \rho_{ki}, \bar{N}_{\Pi ki}, \bar{N}_{\Pi ks_k i}, \bar{N}_{3ki}, \bar{N}_{3ks_k i}, S_{ki} \right\}_{i=1, I_k} \right\}_{k=1, K}.$$

В дальнейшем помимо этих параметров понадобятся значения первых и вторых производных  $r_{ks_k}$  и  $r_{ks_k s_k}$  по длине дуги  $S_k$  режущих кромок СМП, которые определим по формулам:

$$r_{ks_k} = \begin{bmatrix} \cos \sigma_k & \sin \sigma_k & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ и } r_{ks_k s_k} = \frac{1}{\rho_k} \begin{bmatrix} -\sin \sigma_k & \cos \sigma_k & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для решения дальнейших задач целесообразно на основе дискретного представления режущих кромок СМП восстановить аналитическое представление режущих кромок СМП девятью сплайн-функциями:

$$\left\{ \bar{r}_k(S_k), \bar{r}_{ks_k}(S_k), \bar{r}_{ks_k s_k}(S_k), \sigma_k(S_k), \rho_k(S_k), \bar{N}_{\Pi k}(S_k), \bar{N}_{\Pi ks_k}(S_k), \bar{N}_{3k}(S_k), \bar{N}_{3ks_k}(S_k) \right\}.$$

## 2.13. РАСЧЕТ ПОЛОЖЕНИЯ И ОРИЕНТАЦИИ СМП ОТНОСИТЕЛЬНО ПРОИЗВОДЯЩЕЙ ЛИНИИ ФРЕЗЫ

Рассчитаем положение и ориентацию СМП (система координат  $X_{H_k} Y_{H_k} Z_{H_k}$ ) относительно производящей линии инструмента (система координат  $X_{D_k} Y_{D_k} Z_{D_k}$ ) проведем по следующей схеме, предложенной в работе [204]. Пусть СМП точкой своей режущей кромки касается дискретно представленной производящей линии в точке  $\bar{r}_{D_{kj}}$  и ориентируется в пространстве относительно вектора  $\bar{N}_{D_{kj}}$  нормали к производящей поверхности и единичного вектора  $\bar{V}_{D_k}$  совпадающего по направлению с вектором  $\bar{k}_{D_k}$  или  $-\bar{k}_{D_k}$ , в зависимости от направления вращения фрезы (рис. 2.7, а). При этом СМП должна занять такое положение, чтобы в точке контакта с производящей линией были обеспечены: угол наклона главной режущей



кромки  $\lambda_k$ , передний угол  $\gamma_k$  в нормальной к режущей кромке плоскости, главный угол в плане  $\varphi_k$ , который для фасонных фрез может либо быть принятым равным профильному углу в  $j$ -й точке производящей линии  $\sigma_{D_{kj}}$ , либо быть задан конструктором.

Для определения положения и ориентации СМП, удовлетворяющих сформулированным требованиям, необходимо рассчитать матрицу [204] перехода

$$X_{D_k} Y_{D_k} Z_{D_k} \xrightarrow{M_{D_k H_k}} X_{H_k} Y_{H_k} Z_{H_k}, \quad \text{последовательность}$$

которого показана на рис. 2.7 и включает промежуточные переходы:

$$1) \quad X_{D_k} Y_{D_k} Z_{D_k} \xrightarrow{M_{D_k}^1} X^1 Y^1 Z^1 \quad (\text{рис. 2.7, б}), \quad \text{где точка } \mathbf{0}^1$$

начала системы координат  $X^1 Y^1 Z^1$  совмещена с точкой контакта  $\bar{r}_{D_{kj}}$ , ось  $Y^1$  направлена вдоль вектора  $\bar{V}_{D_k}$ , а ось  $Z^1$  - вдоль вектора  $\bar{N}_{D_{kj}}$ . Через вектора  $\bar{r}_{D_{kj}}$ ,  $\bar{V}_{D_k}$ ,  $\bar{N}_{D_{kj}}$  определим параметры матрицы  $M_{D_k}^1 (x_{D_k 0^1}, \dots, \beta_{D_k z^1})$  по блок-схеме, приведенной в работе [204];

$$2) \quad X^1 Y^1 Z^1 \xrightarrow{M^{12}} X^2 Y^2 Z^2 \quad (\text{рис. 2.7, в}) \quad \text{в результате поворота вокруг оси } Z^2 \text{ на угол } \nu_k \lambda_k, \text{ где } M^{12} = M(\beta_z = -\nu_k \lambda_k);$$

$$3) \quad X^2 Y^2 Z^2 \xrightarrow{M^{23}} X^3 Y^3 Z^3 \quad (\text{рис. 2.7, г}) \quad \text{при повороте вокруг оси } X^3 \text{ на угол } \gamma_\partial = \gamma_k - \gamma_{nk} \text{ (откуда следует } \alpha_k = \alpha_{nk} - \gamma_\partial), \text{ где } M^{23} = M(\beta_x = \gamma_\partial);$$

$$4) \quad X^3 Y^3 Z^3 \xrightarrow{M^{34}} X^4 Y^4 Z^4 \quad (\text{рис. 2.7, г}) \quad \text{при переходе из точки контакта в центр окружности скругления вершины СМП и в ее опорную плоскость с матрицей перехода } M^{34} = M(x = 0, y = -S_{\Pi k}, z = -r_{\Pi k});$$

$$5) \quad X^4 Y^4 Z^4 \xrightarrow{M^{45}} X^5 Y^5 Z^5 \quad (\text{рис. 2.7, д}) \quad \text{в результате поворота вокруг оси } Y^5 \text{ на угол } \psi \text{ для обеспечения углов } \varphi_k \text{ и } \varphi_{2k}. \text{ Схему расчета угла } \psi \text{ рассмотрим ниже. Матрица перехода } M^{45} = M(\beta_y = \psi);$$

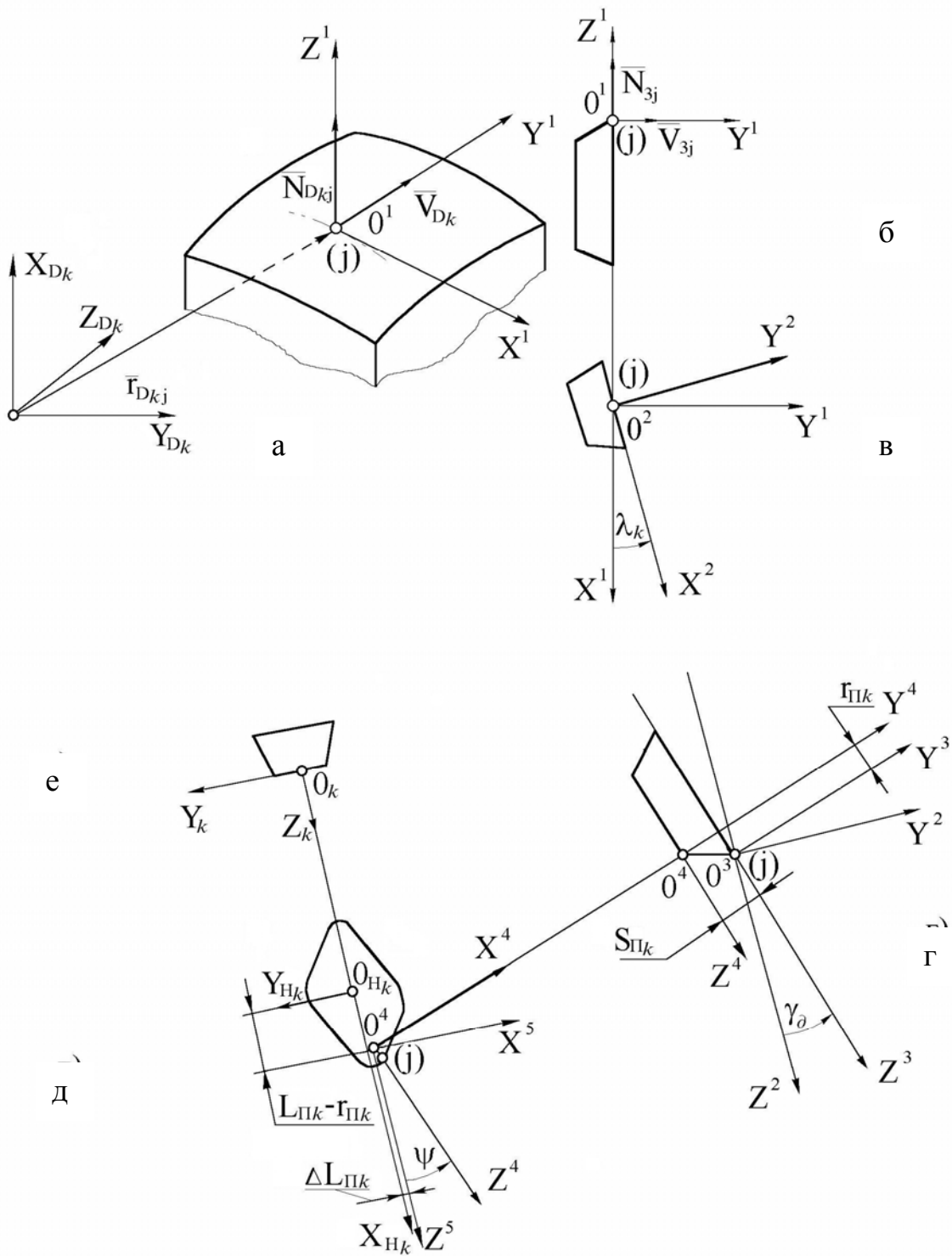


Рис.2.7. Схема установки СМП относительно производящей линии.

- 6)  $X^5 Y^5 Z^5 \xrightarrow{M_k^5} X_k Y_k Z_k$  (рис. 2.7, д,е) при смещении в центр СМП с матрицей перехода  $M_k^5 = M(x = \Delta L_{\Pi k}, y = 0, z = L_{\Pi k} - r_{\Pi k}, \beta_x = -\pi/2, \beta_y = 0, \beta_z = -\pi/2)$ . Для симметричных СМП параметр  $\Delta L_{\Pi k} = 0$ , если СМП несимметричная то для правого исполнения  $\Delta L_{\Pi k} < 0$ , для левого  $\Delta L_{\Pi k} > 0$ .

В результате промежуточных переходов окончательно получим матрицу  $M_{D_k H_k} = M_{D_k}^1 M^{12} M^{23} M^{34} M^{45} M_{H_k}^5$ .

Остановимся подробнее на механизме расчета угла  $\psi$ . Роль этого угла сводится к такому повороту СМП вокруг оси  $Y^5$ , чтобы угол между проекцией вектора  $S_2^5 = [v_k \sin \eta_k \ 0 \ -\cos \eta_k \ 0]$ , принадлежащий прямолинейному участку главной режущей кромки СМП, на основную плоскость (плоскость  $X^1 O^1 Z^1$ ) и вектором положительного направления подачи инструмента составлял угол  $\varphi_k$ .

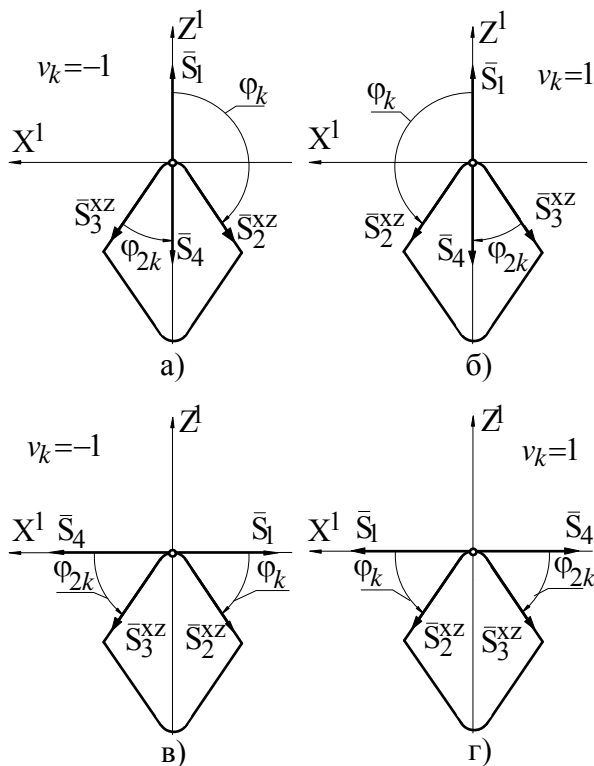


Рис.2.8. Параметры расположения СМП для расчета угла  $\psi$ .

Положительное направление подачи, заданное единичным вектором  $S_1$ , может быть различным. В каждом конкретном случае оно может совпадать с положительным направлением оси  $Z^1$  (рис.2.8, а, б) ( $S_1 = [0 \ 0 \ 1 \ 0]$ ), с положительным ( $v_k = 1$ ) (рис. 2.8, в) или с отрицательным ( $v_k = -1$ ) (рис.2.8, г) направлением оси  $X^1$  ( $S_1 = [v_k \ 0 \ 0 \ 0]$ ).

Последовательно изменяя величину угла  $\psi$  в диапазоне  $-v_k \eta_k \leq \psi \leq v_k (\pi - \eta_k)$ , найдем его значение при котором выполнится равенство  $\bar{S}_2^{xz} \cdot \bar{S}_1 = \cos \varphi_k$  или  $\varphi_k = \arccos(\bar{S}_2^{xz} \cdot \bar{S}_1)$ , где  $\bar{S}_2^{xz}$  - единичный вектор, направленный вдоль проекции  $\bar{S}_2^5$  в системе координат  $X^1 Y^1 Z^1$  на основную плоскость. Для определения вектора  $\bar{S}_2^{xz}$  необходимо следующее:

- 1) представить вектор  $\bar{S}_2^5$  в системе координат  $X^1 Y^1 Z^1$

$$\bar{S}_2^1 = [x_1 \ y_1 \ z_1 \ 0] = \overline{S_2^5 \cdot M^{51}},$$

где  $x_1, y_1, z_1$  - проекции вектора  $\bar{S}_2^5$  на оси в системе координат  $X^1 Y^1 Z^1$ ;

2) проекцию вектора  $\bar{S}_2^5$  на плоскость  $X^1 O^1 Z^1$  выразить как  $\bar{S}_2^{xz} = [x_1 \ 0 \ z_1 \ 0]$ , и рассчитать его единичное представление  $\bar{S}_2^{xz} = \bar{S}_2^{xz} / |\bar{S}_2^{xz}|$ .

Вспомогательный угол в плане  $\varphi_{2k}$  при рассчитанном угле  $\psi$  и матрице  $M^{15}$  определится как угол между проекцией вектора  $S_3^5 = [-v_k \sin \eta_k \ 0 \ -\cos \eta_k \ 0]$ , принадлежащего прямолинейному участку вспомогательной режущей кромки СМП, на основную плоскость и вектором отрицательного направления подачи.

Отрицательное направление подачи, заданное единичным вектором  $S_4$ , в свою очередь может совпадать с отрицательным направлением оси  $Z^1$  (рис.2.8, а,б) ( $S_4 = [0 \ 0 \ -1 \ 0]$ ), совпадать с отрицательным ( $v_k = 1$ ) (рис.2.8, в) или с положительным ( $v_k = -1$ ) (рис.2.8, г) направлением оси  $X^1$  ( $S_4 = [-v_k \ 0 \ 0 \ 0]$ ).

Угол  $\varphi_{2k}$  будет равен  $\varphi_{2k} = \arccos(\bar{S}_3^{xz} \cdot \bar{S}_4)$ , где  $\bar{S}_3^{xz}$  - единичный вектор, направленный вдоль проекции  $\bar{S}_3^5$  в системе координат  $X^1 Y^1 Z^1$  на основную плоскость.

Таким образом, в результате проведенного расчета СМП, устанавливаемые в корпусе фрезы будут касаться заданных точек производящей линии и иметь необходимую ориентацию.

## 2.14. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СМП ПО ПРОИЗВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ФРЕЗЫ

Задача распределения СМП по диаметру фрезы в общем случае на первом этапе сводится к расчету или заданию конструктивных подач СМП  $S_{kp}$  по направляющей производящей поверхности [204], а на втором этапе по полученным значениям  $S_{kp}$  к расчету матриц

$\left\{ \left\{ M_{CD_{kp}} \right\}_{p=1, P_k} \right\}_{k=1, K}$  установки  $kp$ -х производящих линий относи-

тельно производящей поверхности и далее к расчету матриц установки  $kp$ -х СМП относительно производящей поверхности фрезы

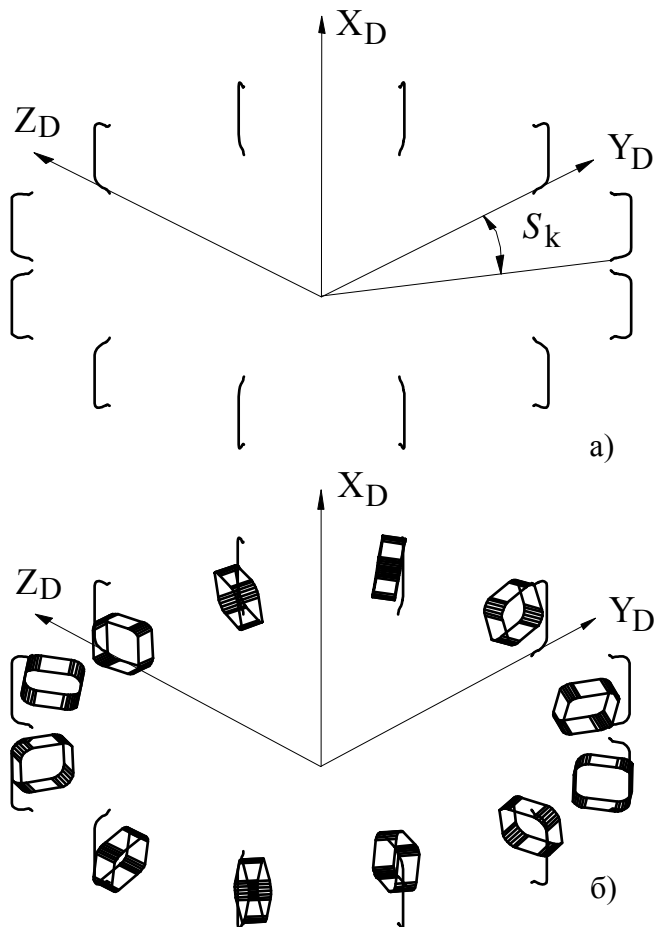


Рис.2.10. Распределение производящих линий и СМП по производящей поверхности.

$$M_{CH_{kp}} = M_{CD_{kp}} \cdot M_{D_k H_k}$$

или обратных матриц

$$M_{H_{kp}C} = M_{CD_{kp}}^{-1} \cdot M_{D_k H_k}^{-1}$$

Рассмотрим некоторые наиболее характерные случаи решения данной задачи.

1. Пусть число пластин в  $k$ -м наборе одинаково, т.е.  $P_1 = P_2 = \dots = P_k = \dots = P_K$  и конструктивные подачи равны (расположены с одинаковым шагом), тогда матрицу  $M_{CD_{kp}}$  (рис.2.10) для каждой  $kp$ -й производящей линии, можно рассчитать как

$$M_{CD_{kp}} = M \left( 0, 0, 0, \beta_x = \frac{\pi}{2}, \beta_y = \frac{2\pi}{P_k} (p-1) + \frac{2\pi}{P_k K} (k-1), 0 \right).$$

При таком расположении СМП будут вступать в работу в разные моменты времени, что обеспечит плавность работы фрезы.

2. Существуют конструкции сборных фасонных фрез, у которых СМП крепятся на вставках, которые располагаются с равномерным угловым шагом в корпусе фрезы и повернуты на угол  $\omega$  к оси фрезы. При этом для расчета матриц  $M_{CD_{kp}}$  необходимо:

- скорректировать матрицы  $M_{D_k H_k}$  таким образом, чтобы СМП были расположены на плоскости вставки (рис. 2.11, б);

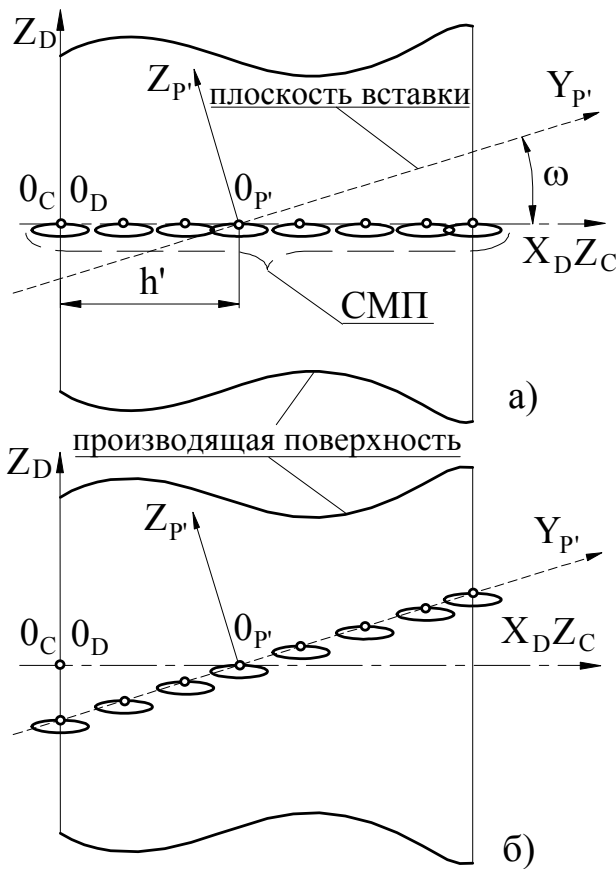


Рис.2.11. Установка СМП вдоль плоскости вставки.

- распределить СМП по вставкам, т.е. рассчитать матриц  $M_{CD_{kp}}$ .

Матрицы  $M_{D_k H_k}$  скорректируем по следующей схеме:

а) рассчитаем матрицу установки плоскости вставки  $(X_{P'}, Y_{P'}, Z_{P'})$  относительно производящей линии фрезы (рис. 2.11,а)

$$M_{D_k P'} = M(0, y = h', \beta_x = -\omega, 0, 0);$$

б) найдем точку на режущей кромке, которой  $k$ -я СМП касается производящей поверхности, путем решения уравнения

$$\bar{i}_{D_k} \cdot \overline{r_k S_k(S_k)} \cdot M_{D_k H_k}^{-1} = 0$$

относительно  $S_k$ ;

в) рассчитаем параметр  $\psi_k$ , угол поворота системы координат  $k$ -й СМП относительно оси  $Y_{D_k}$ , при котором точка режущей кромки  $k$ -й СМП  $r_k(S_k)$  будет лежать на плоскости вставки  $(X_{P'}, 0_{P'}, Y_{P'})$ . Для этого необходимо решить уравнение

$$\bar{k}_{P'} \cdot \overline{r_k(S_k)} \cdot M^{-1}(0, 0, 0, 0, \beta_y = \psi_k, 0) \cdot M_{D_k H_k}^{-1} \cdot M_{D_k P'} = 0$$

относительно параметра  $\psi_k$ ;

г) рассчитаем новую матрицу

$$M_{D_k H_k} = M_{D_k H_k} \cdot M(0, 0, 0, 0, \beta_y = \psi_k, 0).$$

Для распределения СМП по вставкам необходимо каждой СМП поставить в соответствие номер вставки  $n$ , на которой она будет крепиться и тогда матрицы  $M_{CD_{kp}}$  можно рассчитать как  $M_{CD_{kp}} =$

$$= M\left(0, 0, 0, \beta_x = \frac{\pi}{2}, \beta_y = \frac{2\pi}{N}(n-1), 0\right),$$

где  $N$  – число вставок. Очевидным является то, что количество вставок должно быть  $N \geq \max(P_k)$ .

## 2.15. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ФРЕЗЫ В ПРОЦЕССЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Рассмотрим процесс фрезерования фасонной поверхности. Моделирование данного процесса связано с расчетом шести параметров установки  $q_1[t_1(t), \dots, t_N(t)], \dots, q_6[t_1(t), \dots, t_N(t)]$  переменной во времени матрицы  $M_{CB}\{q_1[t_1(t), \dots, t_N(t)], \dots, q_6[t_1(t), \dots, t_N(t)]\}$  (в сокращенной форме  $M_{CB}(t)$ ), перехода из системы координат  $X_C Y_C Z_C$  производящей поверхности фрезы к системе координат  $X_B Y_B Z_B$  обрабатываемой детали, с учетом параметров всех осуществляемых ими движений  $\{t_n(t)\}_{n=1, \overline{N}}$ . Для получения полной картины о поверхностях описываемых режущими кромками СМП, помимо расчета матрицы  $M_{CB}(t)$ , необходимо знание производных матрицы  $\{M_{CB}q_j(t)\}_{j=1, \overline{6}}$  по всем шести параметрам ее установки, а также знание  $\{\{q_j t_n\}_{j=1, \overline{6}}\}_{n=1, \overline{N}}$  производных параметров установки по параметрам движений и  $\left\{\frac{\partial t_n}{\partial t}\right\}_{n=1, \overline{N}}$  производных параметров движений по времени [204].

Схема расчета матрицы  $M_{CB}(t)$  зависит от того, является ли направляющая формируемой поверхности прямолинейной (рис. 2.12, а) или круговой (рис. 2.12, б).

Фрезерование фасонными фрезами осуществляется, в общем случае, двумя движениями [204]: главным, вращательным, движением фрезы  $D_f$  и прямолинейным или круговым движением подачи фрезы или заготовки  $D_S$ .

Нахождение матрицы  $M_{CB}(t)$  рациональнее всего провести путем решения обратной задачи, т.е. расчетом матрицы  $M_{BC}(t)$  перехода от обрабатываемой детали к производящей поверхности фасонной фрезы. Тогда искомую матрицу  $M_{CB}(t)$  можно рассчитать как  $M_{CB}(t) = M_{BC}^{-1}(t)$ .

Если с помощью параметров  $f_k$  задать тип направляющей обрабатываемой поверхности ( $f_k = 1$  – для прямолинейной направляющей,  $f_k = 2$  – для круговой направляющей),  $\omega_k$  задать направление вращения фрезы ( $\omega_k = 1$  – направление вращения фрезы совпадает с поло-

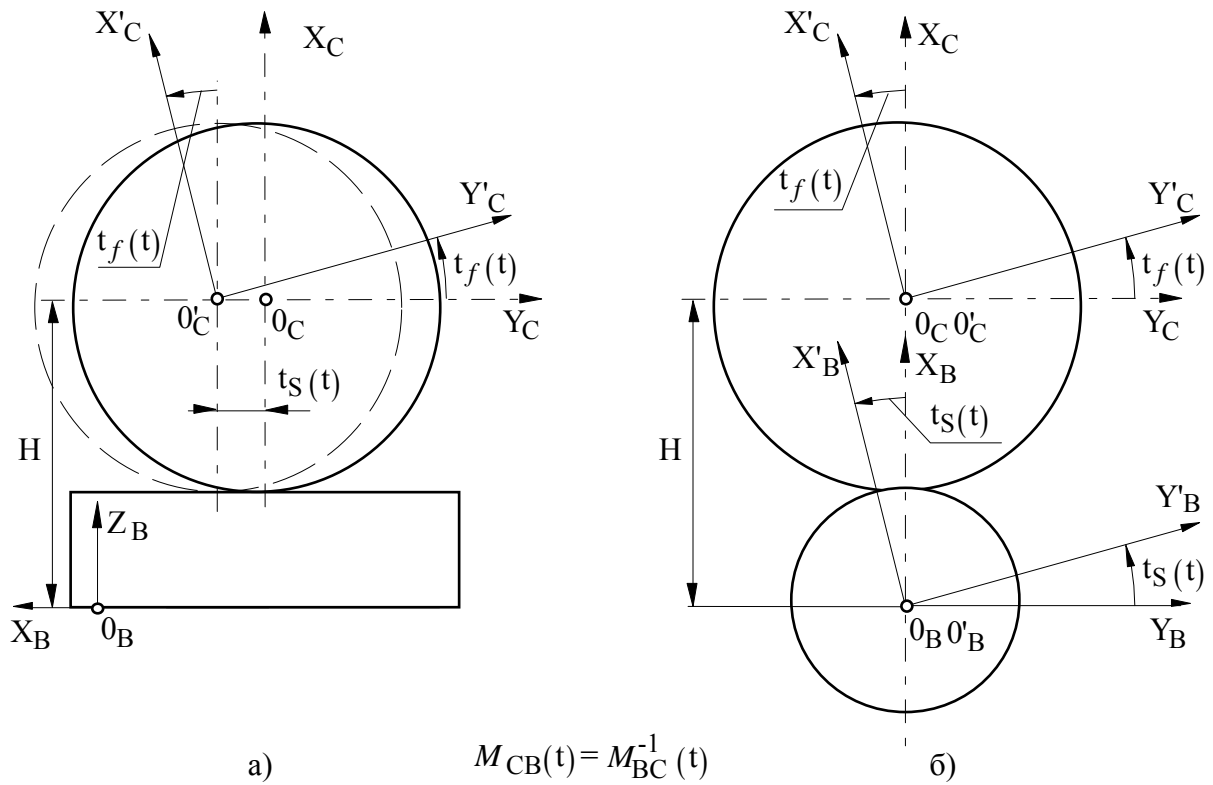


Рис.2.12. Схемы расчета матрицы  $M_{CB}(t)$  для различных случаев фрезерования.

жительным поворотом относительно оси  $Z_C$  производящей поверхности и  $\omega_k = -1$  – направление вращения фрезы совпадает с отрицательным поворотом относительно оси  $Z_C$  производящей поверхности),  $t_k$  задать положительное и отрицательное направление подачи ( $t_k = 1$  – совпадает с положительным направлением и  $t_k = -1$  – совпадает с отрицательным направлением подачи), тогда шесть параметров установки матрицы  $M_{BC}(t)$ , с учетом всех движений (рис. 2.12) рассчитаем как

$$q_j = \begin{cases} x = x[t_f(t), t_S(t)] = (2 - f_k) \cdot t_S(t) + (f_k - 1) \cdot H \cos[t_S(t)], & j = 1, \\ y = y[t_f(t), t_S(t)] = (2 - f_k) \cdot y_H + (f_k - 1) \cdot H \sin[t_S(t)], & j = 2, \\ z = z[t_f(t), t_S(t)] = \text{const} = (2 - f_k) \cdot H + (f_k - 1) \cdot z_H, & j = 3, \\ \beta_x = \beta_x[t_f(t), t_S(t)] = \text{const} = (2 - f_k) \cdot \pi/2, & j = 4, \\ \beta_y = \beta_y[t_f(t), t_S(t)] = \text{const} = 0, & j = 5, \\ \beta_z = \beta_z[t_f(t), t_S(t)] = t_f(t) + (f_k - 1) \cdot t_S(t), & j = 6, \end{cases}$$

где  $t_f(t), t_S(t)$  – соответственно параметры главного движения  $D_f$  и движения подачи  $D_S$ ;  $y_H, z_H$  – параметры начальной установки.



Параметр главного движения  $t_f(t)$  выразим, как:

$$t_f(t) = t_{fH} + \varpi_k 2\pi n_f t,$$

где  $t_{fH}$  - начальный параметр главного движения;  $n_f$  - частота вращения фрезы;  $t$  - время перемещения фрезы из начального положения.

Параметр движения  $t_S(t)$  выразим, как:

$$t_S(t) = t_{SH} + \iota_k (2 - f_k) \cdot S_{мин} \cdot t + \iota_k (f_k - 1) \cdot 2\pi n_S t,$$

где  $t_{SH}$  - начальный параметр движения подачи;  $n_S$  - частота вращения обрабатываемой шатунной шейки.

Таким образом, будет определена матрица  $M_{BC} \{q_1[t_f(t), t_S(t)], \dots, q_6[t_f(t), t_S(t)]\}$ , а ее производные примут вид [204]:

$$M_{BCq_j}(q_1, \dots, q_6) = \begin{cases} M_x(x=1, y=0, z=0)M(\beta_x)M(\beta_y)M(\beta_z), j=1, \\ M_y(x=0, y=1, z=0)M(\beta_x)M(\beta_y)M(\beta_z), j=2, \\ M_z(x=0, y=0, z=1)M(\beta_x)M(\beta_y)M(\beta_z), j=3, \\ M(x, y, z)M_{\beta_x}(\beta_x)M(\beta_y)M(\beta_z), j=4, \\ M(x, y, z)M(\beta_x)M_{\beta_y}(\beta_y)M(\beta_z), j=5, \\ M(x, y, z)M(\beta_x)M(\beta_y)M_{\beta_z}(\beta_z), j=6, \end{cases}$$

$$\text{где } M_x(x, y, z) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -x & -y & -z & 0 \end{bmatrix};$$

$$M_y(x=0, y=1, z=0) = M_x(x=0, y=1, z=0);$$

$$M_z(x=0, y=0, z=1) = M_x(x=0, y=0, z=1);$$

$$M_{\beta_x}(\beta_x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \beta_x & \cos \beta_x & 0 \\ 0 & -\cos \beta_x & -\sin \beta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$M_{\beta_y}(\beta_y) = \begin{bmatrix} -\sin \beta_y & 0 & -\cos \beta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \beta_y & 0 & -\sin \beta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$M_{\beta_z}(\beta_z) = \begin{bmatrix} -\sin \beta_z & \cos \beta_z & 0 & 0 \\ -\cos \beta_z & -\sin \beta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Производные параметров установки  $\{q_{jt_n}\}_{j=\overline{1,6}}_{n=\overline{1,N}}$  матрицы  $M_{BC}(t)$  по параметрам движений примут вид:

$$q_{jt_n} = \begin{cases} 0, & j=1, n=1, \\ (2-f_k) - (f_k-1) \cdot H \cdot \sin[t_S(t)], & j=1, n=2, \\ 0, & j=2, n=1, \\ (f_k-1) \cdot H \cdot \cos[t_S(t)], & j=2, n=2, \\ 0, & j=3, n=1, \\ 0, & j=3, n=2, \\ 0, & j=4, n=1, \\ 0, & j=4, n=2, \\ 0, & j=5, n=1, \\ 0, & j=5, n=2, \\ 1, & j=6, n=1, \\ (f_k-1), & j=6, n=2. \end{cases}$$

Производные параметров движений по времени  $\left\{\frac{\partial \alpha_n}{\partial t}\right\}_{n=\overline{1,N}}$  бу-

$$\text{дут равны } \frac{\partial \alpha_n}{\partial t} = \begin{cases} 2\varpi_k \pi n f, & n=1, \\ \iota_k (2-f_k) \cdot S_{\text{мин}} + \iota_k (f_k-1) \cdot 2\pi n S, & n=2. \end{cases}$$

Представленная математическая модель проектирования сборных фасонных фрез позволяет: проектировать сборные фасонные фрезы для фрезерования поверхностей различного профиля с учетом конструктивных параметров данного профиля; проектировать сборные фасонные фрезы различного исполнения; проектировать сборные фасонные фрезы, оснащенные стандартными или нестандартными СМП; моделировать процесс фрезерования проектируемой фрезы с различными режимами фрезерования; осуществить переход к расчету оценочных параметров модели: распределение углов резания вдоль режущих кромок СМП; шероховатость обрабатываемой поверхности;

параметры срезаемых слоев; сил резания; напряженно-деформированного состояния; динамических характеристик процесса фрезерования и т.д.; осуществить переход к разработке модели проектирования и изготовления корпуса сборной фасонной фрезы и его основных элементов; легко вносить корректировку в процесс проектирование сборной фасонной фрезы с учетом полученных ранее результатов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абразивно-алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с.
2. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах (расчеты методом расчленения тела). – М.: Машгиз, 1963. – 355 с.
3. Аваков А.А. Физические основы теории стойкости режущих инструментов. – М.: Машгиз, 1960. – 306 с.
4. Аврутин Ю.Д. Рельеф шлифовального круга и его связь с шероховатостью шлифовальной поверхности. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л.: ЛПИ, 1977. – 23 с.
5. Адам Н.К. Физика и химия поверхностей. – М.: Гостехиздат, 1947. – 420 с.
6. Адаптивное управление технологическими процессами (на металлорежущих станках) / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, С.П. Протопопов и др. – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.
7. Адлер Ю.П., Маркова В.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
8. Акоф Р., Сасиени М. Основы исследования операций. – М.: Мир, 1971.
9. Активный контроль в машиностроении: Справочник / Педь Е.И., Высоцкий А.В., Машинистов В.М. и др. / Под ред. Е.И. Педь. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.
10. Андреев Г.С. Повышение производительности обработки деталей в условиях периодического прерывистого резания. – Вестник машиностроения, 1978, №12. – С. 48-52.
11. Армарего И. Дж. А., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием. Пер. с англ. В.А. Пастунова. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
12. Арсенин В.Я. Математическая физика. Основные уравнения и специальные функции. – М.: Наука, 1966. – 346 с.
13. Артемьев Б.Г., Голубев С.М. Справочное пособие для работников метрологических служб. – Изд. 2-е, перераб. и доп. в двух книгах. – Кн. 1. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 352 с.
14. Аршанский М.М., Щербаков В.П. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
15. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов. – М.: Машгиз, 1959. – 490 с.
16. А.С. 618261 СССР МКИ В24В 1/00. Способ шлифования / М.С. Наерман, А.К. Шишов. – Оpubл. 05.08.78. Бюл. № 29.
17. А.С. 747706 СССР МКИ В24В 49/00. Устройство для ограничения перемещений шлифовального круга / А.В. Якимов, В.П. Ларшин, А.А. Якимов. – Оpubл. 15.07.80. Бюл. № 26. – 3 с.
18. А.С. 764942 СССР МКИ В24В 1/00. Способ абразивной обработки / Ю.М. Ермаков. – Оpubл. 23.09.80. Бюл. № 35. – 3 с.

19. А.С. 1155421 СССР МКИ В23Q 11/04, 49/00. Способ защиты инструмента от перегрузок и устройство для его реализации / Е.Т. Шаров, В.А. Тараненко. – Оpubл. 15.05.85. Бюл. № 18. – 3 с.
20. А.С. 1199594 СССР МКИ В24В 1/00. Способ глубинного шлифования цилиндрической детали / В.А. Аксенов, Ю.С. Чесов, С.Г. Патрушев, В.Н. Бороздин. – Оpubл. 23.12.85. Бюл. № 47.
21. А.С. 1202745 СССР МКИ В23В 49/00. Устройство для контроля состояния инструмента / В.А. Остафьев, В.В. Кокаровцев, К.Г. Махмудов, А.И. Александров. – Оpubл. 03.01.86. Бюл. № 1. – 2 с.
22. А.С. 1288039 А1 СССР МКИ В24В 51/00. Способ управления шлифованием / А.В. Якимов, В.П. Ларшин, В.Ф. Соколов, А.М. Скляр, Д.А. Севрюгин. – Оpubл. 07.02.87. Бюл. №5. – 4 с.
23. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1963. – 470 с.
24. Бабаков И.М. Теория колебаний. – М.: Наук, 1968. – 560 с.
25. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов. – К.: Наук. думка, 1978. – 207 с.
26. Байкалов А.К., Сукенник И.Л. Алмазный правящий инструмент на гальванической связке. – К.: Наук. думка, 1976. – 203 с.
27. Бакуль В.Н., Захаренко И.П., Кункин Я.А., Мильштейн М.З. Справочник по алмазной обработке металлорежущего инструмента. – К.: Техника, 1971. – 208 с.
28. Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения. – М.: Машиностроение, 1980.
29. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1969. – 359 с.
30. Бахвалов В.Л. Исследование влияния параметров процесса зубошлифования конусным кругом и исходного состояния материала на качество поверхностного слоя. – Дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОПИ, 1977. – 340 с.
31. Беззубенко Н.К. К вопросу выбора режима работы режущих зерен при алмазно-искровом шлифовании. – Резание и инструмент, 1979, вып. 22. – С. 3–6.
32. Беззубенко Н.К., Тананко И.А., Бобух Ж.С., Михайлуца Э.Б. Формирование режущей поверхности алмазного инструмента на металлической связке при электроэрозионной правке. – Синтетические алмазы, 1975, № 1. – С. 18–20.
33. Бекишев Г.А., Кратко М.И. Элементарное введение в геометрическое программирование. – М.: Наука, 1980. – 144 с.
34. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления. – М.: Наука, 1969. – 118 с.
35. Беллман Р., Кук К. Дифференциально-разностные уравнения. – М.: Мир, 1967. – 548 с.
36. Беляев М.М. Основы теплопередачи. – К.: Вища шк., 1989. – 343 с.

37. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1982. – 304 с.
38. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
39. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
40. Бондарь А.Г., Статюка Г.А. Планирование эксперимента в химической технологии. – К.: Вища школа, 1976. – 184 с.
41. Бояршинов Ю.А. Разработка и исследования способов повышения качества поверхностного слоя при шлифовании высокоточных зубчатых колес. – Дис. ... канд. техн. наук. – Пермь: ППИ, 1970. – 250 с.
42. Браилов А.Ю., Астахов В.П. Семиотическая модель оперативного контроля процесса сверления. – Технология и автоматизация машиностроения: Респ. межвед. науч.- техн. сб. – К.: Техника, 1987, вып. 40. – С. 24 – 27.
43. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУзов. – 13-е изд. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.
44. Бугров Я.С., Никольский С.М. Высшая математика. Дифференциальные уравнения. Кратные интегралы. Ряды. Функции комплексного переменного. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. – 448 с.
45. Булошников В.С. и др. Глубинное шлифование многогранных пластмассовых пластин из твердого сплава. – Тр. Моск. высш. техн. уч-ща им. Баумана, 1974 (1975). – С.119-129.
46. Быков А.В. и др. ADEM CAD/CAM/TDM/Черчение, моделирование, механообработка / Быков А.В., Силин В.В., Семенников В.В., Феоктистов В.Ю. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 320 с.
47. Вальков В.М. Контроль в ГАП. - Л.: Машиностроение, 1986. - 232 с.
48. Ватсон Г.Н. Теория Бесселевых функций. - Т. 1.– М.: Изд-во ин. лит. – 1949.
49. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972.
50. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
51. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
52. Витенберг Ю.Р. Применение корреляционной теории для оценки шероховатости шлифованной поверхности. – Вестник машиностроения, 1969, вып. 1.
53. Витенберг Ю.Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки. – Л.: Судостроение, 1971. – 108 с.
54. Внуков Ю.Н. Исследование процесса высокопроизводительного шлифования быстрорежущих сталей кругами из дробленых сверхтвердых поликристаллов. – Автореф. ... канд. техн. наук. – Тбилиси, 1977. – 21с.
55. Волосов С.С., Гейлер З.Ш. Управление качеством продукции средствами активного контроля. – М.: Изд. стандартов, 1989. – 263 с.

56. Воронин А.А., Марков А.И. Влияние ультразвуковых колебаний на процесс резания жаропрочных сплавов. – Станки и инструменты, 1960, №11. – С. 15-17.
57. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике: 4-е изд. – М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1959. – 783 с.
58. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Наука, 1988. – 552 с.
59. Гельфанд А.О. Исчисление конечных разностей. – М.: ФМГ, 1967. – 320 с.
60. Гельфгат Ю.И. Сборник задач и упражнений по технологии машиностроения: Учебн. пособие для машиностр. спец. техникумов. — 2-е издание перераб. — М.: Высш. шк., 1986. — 271 с.
61. Гольдфарб Э.М. Теплотехника металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1967. – 439 с.
62. Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов Н.М. Повышение надежности тяжелонагруженных зубчатых колес. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
63. Гжиров Р.И. Краткий справочник конструктора: Справочник. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. — 464 с.
64. Горбачевич А.Ф., Шкред В.А. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: Учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов.– 4-е изд., перераб. и доп. – Минск: Высшая школа, 1983. –256 с.
65. ГОСТ 26645-85. Отливки металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку.
66. ГОСТ 2590-88. Прокат сплошной горячекатанный круглый. Сортамент.
67. ГОСТ 7505-89. Поковки стальные штампованные. Допуски, припуски и кузнечные напуски.
68. ГОСТ 7062-90. Поковки из углеродистой и легированной стали, изготавливаемые на прессах. Припуски и допуски.
69. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. – Харьков: Вища шк., 1985. – 184 с.
70. Грабченко А.И. Физические и технологические закономерности алмазного шлифования сверхтвердых материалов. – Матер. 5-й междунар. конф. по режущим инструментам. ВНР, Мишкольц, 1982 (24-27 августа). - С. 11.18/1-11.18/6.
71. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Физматгиз, 1961.- 1020 с.
72. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
73. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 288 с.
74. Гродзинский Э.Я., Голубев И.В., Маковицкая А.Т. Станки и оснастка для шлифования с электрической активацией рабочей поверхности круга. – Станки и инструмент, 1981, №4. – С. 10–12.
75. Грувер М., Зиммерс Э. САПР и автоматизация производства. Пер. с англ.– М.: Мир, 1987.– 528 с.

76. Даниелян А.М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов. – М.: Машгиз, 1954. – 276 с.
77. Даниелян А.М., Бобрик П.И. Особенности тепловых явлений при резании жаропрочных сплавов. - Станки и инструмент, 1961, № 12. – С. 25-27.
78. Данилевский В.В. Справочник молодого машиностроителя. Справочник для молодых рабочих машиностроительных заводов и учащихся проф.-техн. училищ. – Изд.3-е, доп. и перераб. — М.: Высш. школа, 1973. — 456 с.
79. Данилевский В.В. Технология машиностроения: Учебник для техникумов. – 5-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1989. – 416 с.
80. Данилевский В.В., Гельфгат Ю.И. Лабораторные работы и практические занятия по технологии машиностроения: Учеб. пособие для машиностр. спец. техникумов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1988. — 222 с.
81. Даффин Р., Питерсон Э., Зенер К. Геометрическое программирование. Перевод с англ. Д.А. Бабаева. – М.: Мир, 1972 . – 312 с.
82. Девин Л.Н. Прогнозирование работоспособности металлорежущего инструмента. – К.: Техніка, 1992. – 132 с.
83. Демкин Н.Б. Контактное шлифование шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227 с.
84. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. – М.: Мир, 1980. – 610 с.
85. Джугурян Т.Г. Технологічні основи керування точністю та якістю обробки при прецизійному розточуванні. – Дис... докт. техн. наук. – Одеса: ОДПУ, 2001. – 467 с.
86. Диагностика технического состояния автомобилей / Н.Я. Говорущенко. – М.: Транспорт, 1970 . – 256 с.
87. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. - М.: Высш. шк., 1965. – 465 с.
88. Добрыднев И.С. Курсовое проектирование по предмету „Технология машиностроения”: Учебн. пособие для техникумов по специальности „Обработка металлов резанием”. — М.: Машиностроение, 1985. — 184 с.
89. Допуски и посадки: Справочник / Ю.Е.Кирилук. — К.: Вища школа. Головное изд-во, 1987. — 120 с.
90. ДСТУ 3514-97. Статистичні методи контролю та регулювання. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1997.
91. Дудко П.Д. Исследование процесса доводки стальных цилиндрических деталей свободным абразивом с осциллирующим движением притира. – Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков: ХПИ, 1970. – 300 с.
92. Дунин-Барковский И.В. и др. К вопросу о нормировании и контроле неровностей декоративных поверхностей. – Сб. “Метрология и свойства обработанных поверхностей”. – Труды НИИ метрологии, 1977, вып 15. – С. 124-127.
93. Дунин-Барковский И.В., Карташова А.Н. Измерение и анализ



- шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 223 с.
94. Душинский В.В., Пуховский Е.С., Радченко С.Г. Оптимизация технологических процессов в машиностроении / Под общ. ред. Г.Э. Таурита. – К.: Техніка, 1977. – 176 с.
  95. Евдокимов Ю.А., Колеников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. – М.: Наука, 1980. – 228 с.
  96. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхности при абразивной обработке. – Саратов: СГУ, 1975. – 127 с.
  97. Евсеев Д.Г., Сальников А.И. Физические основы процесса шлифования. – Саратов: СГУ, 1978. – 128 с.
  98. Епифанов Г.И., Ребиндер П.Л. Об энергетическом балансе процесса резания металлов. – Доклады АН СССР, 1949, т. 69, № 4.
  99. Ермаков С.М., Жиглявский А.А. Математическая теория оптимального эксперимента: Учеб. пособие. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
  100. Зангвилл У.И. Нелинейное программирование. – М.: Советское радио, 1973.
  101. Захаренко И.П. Алмазные инструменты и процессы обработки. – К.: Техніка, 1980. – 212 с.
  102. Захаренко И.П. Внутреннее алмазное глубинное шлифование многолезвийных твердосплавных инструментов. – Синтетические алмазы, 1973, № 6. – С. 37-40.
  103. Захаренко И.П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента. – К.: Наук. думка, 1981. – 300 с.
  104. Захаренко И.П. Рациональное использование сверхтвердых абразивных материалов в инструментальном производстве. – К.: Наук. думка, 1979. – 156 с.
  105. Захаренко И.П. Сверхтвердые абразивные материалы в инструментальном производстве. – К.: Вища школа, 1985. – 152 с.
  106. Захаренко И.П. Эффективные методы шлифования алмазным инструментом. - Обзор/ сер. С-2 инструм. и абразив. алм. пром-сть, НИИ информ. по машиностроению. – М.: НИИмаш, 1978. – 45 с.
  107. Захаренко И.П. Эффективность обработки инструмента сверхтвердыми материалами. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
  108. Захаренко И.П., Винников Н.П., Василенко П.В. Охватывающее глубинное алмазное шлифование. – Синтетические алмазы, 1974, № 3. – С. 48-49.
  109. Захаренко И.П., Винников Н.П., Энштейн В.М. Круглое алмазное шлифование многолезвийного твердосплавного инструмента без применения кругов. – Синтетические алмазы, 1970, вып. 6 (12). - С. 41–43.
  110. Захаренко И.П., Нечипоренко В.Н., Винников Н.П. Круглое наружное глубинное шлифование твердосплавного инструмента торцом чашечного круга. – Алмазы и сверхтвердые материалы, 1979, № 12. – С. 9–11.

111. Захаренко И.П., Савченко Ю.Я. Алмазно-электролитическая обработка инструмента. – К.: Наук. думка, 1978. – 224 с.
112. Захаренко И.П., Шепелев А.А. Алмазная заточка твердосплавного инструмента совместно со стальной державкой. – К.: Наук. думка, 1976. – 219 с.
113. Зелинский А.Н. Основы математического моделирования: Учеб. пособие. – К.: УМК ВО, 1991. – 227 с.
114. Зорин Е.П. Исследование свойств инструмента и технологических параметров при прецизионном резании высокопрочных и нержавеющей сталей. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Воронеж, 1974. – 23 с.
115. Зуховицкий С.И., Авдеева Л.И. Линейное и выпуклое программирование. – М.: Наука, 1965.
116. Иващенко И.А. Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации. – М.: Машиностроение, 1975. – 209 с.
117. Игумнов Б.Н. Расчет оптимальных режимов обработки для станков и автоматических линий. – М.: Машиностроение, 1974. – 200 с.
118. Израилович М.Я. Оптимизация процессов механической обработки алмазным и твердосплавным инструментом. – М.: ВНИИТЭМР, 1985. – 44 с.
119. Ипполитов Г.М. Абразивно-алмазная обработка. – М.: Машиностроение, 1969. – 336 с.
120. Исаченко В.В., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
121. Кабановский Л.Н., Артюхов В.П., Панич А.Н. Исследование плоского алмазного шлифования твердого сплава со сталью. – Синтетические алмазы, 1977, вып. 1. – С. 42-44.
122. Калинин Е.П. Исследование процесса зубошлифования на станках с червячным абразивным кругом в связи с нахождением путей устранения прижогов. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь: ППИ, 1966. – 34 с.
123. Капустин Н.М. Автоматизация машиностроения: Учебник для вузов / Н.М. Капустин и др. - М.: Высшая школа, 2003. – 223 с.
124. Капустин Н.М. Разработка технологических процессов обработки деталей на станках с помощью ЭВМ. - М.: Машиностроение, 1976. — 288 с.
125. Каракулова М.Л. К вопросу о глубине внедрения абразивного зерна в металл при глубинном шлифовании. – Соверш. процесса обраб. матер. резанием, Ижевск, 1976, вып. 1. - С. 43-46.
126. Карлов Р.Ф. Адаптивная система управления обработкой глубоких отверстий. - Станки и инструмент, 1974, № 8. - С. 23-24.
127. Карманов В.Г. Математическое программирование. – М.: Наука, 1975. – 272 с.
128. Карслоу Х.С., Егер Д.К. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1984. – 487 с.
129. Касаткін М.М. Натуральний ряд чисел: Навчальний посібник. – Одеса: Астропринт, 2002. – 24 с.

130. Кацалап С.Ф. Коррекция математической модели в процессе эксплуатации объекта // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. - Харьков: Вища школа, 1989. - С. 120-123.
131. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки: Учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 212 с.
132. Качество машин: Справочник. В 2 т. Т.1 / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
133. Качество машин: Справочник: В 2-х т. Т.1 / А.Г.Суслов, Ю.В. Гуляев, А.М. Дальский и др. — М.: Машиностроение, 1995. — 430 с.
134. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И.Х. Чеповецкий. – К.: Наук. думка, 1979. – 244 с.
135. Качество продукции автоматизированного машиностроительного производства / А.С. Зенкин, И.В. Петко, И.П. Стародуб, И.В. Мельниченко. – К.: Техніка, 1988. – 175 с.
136. Кащук В.А., Мелехин А.Д., Бармин Б.П. Справочник заточника. – М.: Машиностроение, 1982. – 232 с.
137. Каяшев Л.И., Митрофанов В.Г., Схиртладзе А.Г. Методы адаптации при управлении автоматизированными станочными системами. – М.: Машиностроение, 1995. - 240 с.
138. Кедров С.М. Средства повышения производительности доводки металлов. – Станки и инструмент, 1987, №6.
139. Кирсанов С.В, Гречишников В.А., Схиртладзе А.Г., Кокарев В.И. Инструменты для обработки точных отверстий. – М.: Машиностроение, 2003. – 330 с.
140. Кларк Ф. Оптимизация и негладкий анализ. – М.: Наука, 1988. – 280 с.
141. Ковальгонов В.Н. Повышение эффективности совмещенного шлифования с применением СОЖ путем термостабилизации зоны обработки. – Дис. ... канд. техн. наук. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 244 с.
142. Кожевников С.Н. Теория механизмов и машин. – М.: Машиностроение, 1973. – 592 с.
143. Колев К.С., Горчаков Л.М. Точность обработки и режимы резания. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. –145 с.
144. Колесов И.М. Основы технологии машиностроения: Учеб. для машиностроит. спец. вузов.— 2-е изд., испр.— М.: Высш. шк., 1999.— 559 с.
145. Колкер Я.Д. Математический анализ точности механической обработки деталей. - К.: Техніка, 1976.—200 с.
146. Коллатц Л., Карбс В. Теория приближений. – М.: Наука, 1978. – 272 с.
147. Колуэлл А. Влияние высокочастотных вибраций на процесс шлифования. – Т., 1955. – 87. – № 2243.
148. Коновалов Е.Г., Чачин В.Н. Динамика вибрационного шлифования твердых сплавов. – Сб. научн. тр. АН БССР, 1959, вып. 1. – С. 84–90.
149. Контроль качества продукции в машиностроении /Артес А.Э., Агапов

- Ю.Н., Гончаров Э.Н. и др. / Под ред. А.Э. Артеса. – М.: Изд-во стандартов, 1974. - 448 с.
150. Кордыш Л.М., Марголин Л.В. Тепловой расчет исполнительных механизмов приводов станков с ЧПУ. – Станки и инструмент, 1983, №5. – С. 22–24.
151. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1984. – 106 с.
152. Королев А.В., Белов Г.И. Механизм самозатачивания абразивного инструмента. – Саратов: Саратов. политехн. ин-т, 1981. – 15 с. (рукопись деп. в ВНИИ ТИ 21 дек. 1981 г., № 5753-81).
153. Королев А.В., Капильник С.И., Евсеев Д.Г. Комбинированный способ шлифования – доводки качающимся кругом. – Изд-во Саратов. ун-та, 1983. – 96 с.
154. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Часть 1. Состояние рабочей поверхности абразивного инструмента. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1987. – 160 с.
155. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Часть 2. Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. – 160 с.
156. Королев А.В., Парамонов А.Н., Чехолин С.Н. Исследование количества абразивных зерен на поверхности шлифовальных кругов. – Науч. тр. Саратов. политехн. ин-та, 1971, вып. 51.
157. Корчак С.Н. Прогрессивная технология и автоматизация круглого шлифования. – М.: Машиностроение, 1968. – 108 с.
158. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
159. Корчак С.Н. Теоретические основы влияния технологических факторов на повышение производительности шлифования стальных деталей. – Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Челябинск: ЧПИ, 1973. – 45 с.
160. Корчак С.Н., Переверзев П.П. Оптимизация режимов резания для операций круглого врезного шлифования на станках с автоматическим циклом управления. – Резание и инструменты, 1985, вып. 34. – С. 86-89.
161. Корчак С.Н., Переверзев П.П. Формирование автоматических циклов шлифования с учетом важнейших технологических ограничений на основе аналитических моделей управления. – Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении. – Пермь: ППИ, 1983. – С. 7–13.
162. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. – К.: Техніка, 1970. – 396 с.
163. Костецкий Б.И. Шлифование закаленных сталей. – К.: Техника, 1947. – 84 с.
164. Кохтев А.А. Основы стандартизации в машиностроении. – Изд. 3-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1967. – 492 с.

165. Кошин А.А. Исследование функциональных связей между предельными режимами и тепловыми критериями процессов алмазно-абразивной обработки. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 1974. – 23 с.
166. Кошляков Н.С., Глинсер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высш. шк., 1985. – 712 с.
167. Кравченко Б.А., Светличнов Б.П. Остаточные напряжения при обработке жаропрочных материалов точением. – В кн.: Обрабатываемость жаропрочных и титановых сплавов. – Куйбышевское обл. книжное издательство, 1962. – С. 385-397.
168. Краснощек Ю.С. Исследование особенностей процесса алмазного шлифования безвольфрамовых твердых сплавов. – Дис. ... кан. техн. наук. – Харьков: ХПИ, 1981. – 213 с.
169. Кривоухов В.А. Ускоренный метод нахождения стойкости и силовых зависимостей для составления нормативов по режимам резания. – Станки и инструмент, 1960, № 6. – С. 26-28.
170. Круг Г.К. Планирование эксперимента в задачах идентификации и экстраполяции. – М: Наука, 1977. – 208 с.
171. Крюк А.Г., Браташевский А.Ю., Дудко П.Д. Особенности химико-механического полирования кремниевых пластин. – Труды 6-й междунар. научно-техн. конф. “Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве”. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2002. – С. 26-27.
172. Кузнецов А.П. Методы оценки тепловых деформаций металлорежущих станков и пути их снижения: Обзор. – М.: НИИМаш, 1983.- 68 с.
173. Кулаков Ю.М. и др. Предотвращение дефектов при шлифовании. – М.: Машиностроение, 1975. – 144 с.
174. Курицкий Б.Я. Оптимизация вокруг нас. – Л.: Машиностроение, 1989. – 145 с.
175. Кушнер В.С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных материалов. – Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та, 1982. – 170 с.
176. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. – М.: Наука, 1973. – 736 с.
177. Лавріненко В.І. Наукові основи шліфування інструментальних матеріалів із спрямованою зміною характеристик контактних поверхонь. - Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – К.: ІНМ НАН України, 2000. – 35 с.
178. Лакирев С.Г. Обработка отверстий: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1984. - 208 с.
179. Ларшин В.П. Диагностика операций многониточного шлифования резьбы шариковых винтов. - Диагностика технологических процессов в машиностроении: материалы семинара. – М.: Изд. МДНТП, 1990. – С. 82-88.
180. Ларшин В.П. Интегрированные производственные системы в машиностроении // Сучасне машинобудування.– 2000.– № 1-2(3-4).–

- С.141-147.
181. Ларшин В.П. Интегрированная технологическая система шлифования сложнопрофильных деталей (на примере резьбошлифования). - Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Одесса: ОГПУ, 1995. – 34 с.
  182. Ларшин В.П. Интегрированные технологические системы в машиностроении. – Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 1999, вып. 3(9). – С. 55-58.
  183. Ларшин В.П. Новая технология автоматизированного шлифования сложнопрофильных деталей. – Научно-технологические технологии в машиностроении и приборостроении: Тез. докл. российской научн. – техн. конф. – Рыбинск: РАТИ, 1994. – С. 102-103.
  184. Ларшин В.П. Оптимизация рабочего цикла съёма припуска при шлифовании / Резание и инструмент в технологических системах. — Междунар. научн.-техн. сборник. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. — С. 202-205.
  185. Ларшин В.П. Оптимизация режимов зубошлифования на станках типа “МАОГ”. - Механическая обработка деталей машин и приборов: Тез. докл. республ. научн. конф. – К.:РДЭНТП,1976. – С.16.
  186. Ларшин В.П. Повышение производительности плоского шлифования на основе анализа трудоёмкости процесса. – Тр. Одес. политехн. ун-та.— Одесса, 2002, вып.1(17).— С .60-64.
  187. Ларшин В.П. Структура припуска на шлифование с учётом метода обеспечения точности обработки / Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: Сборник статей междунар. научно-техн. конф. — Волжский: ОАО „Альянс” Югполиграфиздат, 2004. – С. 159-162.
  188. Ларшин В.П. Структура припуска с учётом метода обеспечения точности обработки / Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Сборник материалов конф. — К.: АТМ Украины, 2004. – С. 104–107.
  189. Ларшин В.П. Управление температурной погрешностью шага резьбы ходовых винтов при резьбошлифовании. – Сб. “Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы”. – Волжский, 1999. – С. 132-135.
  190. Ларшин В.П., Андрусенко А.М. Проектирование, изготовление и эксплуатация технологических систем на основе общей теории управления. – Тр. 5-й Междунар. научн.-техн. конф.: Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2002. – С. 19-23.
  191. Ларшин В.П., Гречиха А.А. Определение межоперационных и межпереходных припусков при различных методах обеспечения точности обработки / Труды 9-й междунар. научн.-техн. конф. Харьков: ГП ХМЗ „ФЭД”, 2004. – С. 23–24.
  192. Ларшин В.П., Гречиха А.А. Повышение эффективности шлифования вырубных штампов при использовании твердых технологических смазок.

- Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2000, вып. 3(12). – С. 45-48.
193. Ларшин В.П., Лищенко Н.В. Компьютерная диагностика технологического процесса механообработки по критерию стабильности. – Вісник інженерної академії України, 2001, № 3. – С. 43-47.
194. Ларшин В.П., Лищенко Н.В. Разработка математического обеспечения для системы компьютерной диагностики процесса резьбошлифования. – Збірник наукових праць Кіровогр. держ. техн. ун-ту. – Кіровоград, 2003, вип. 12. – С. 113-119.
195. Ларшин В.П., Лищенко Н.В., Мочуляк А.В. Автоматизация наладки металлорежущих станков с ЧПУ типа «обрабатывающий центр». – Вісник інженерної академії України, 2000, спец. вип.– С.23–24.
196. Ларшин В.П., Ткаченко Б.О. Диагностика технологической операции финишного резьбошлифования на основе микроЭВМ. – Вестник машиностроения, 1992, №3. – С. 58–61.
197. Ларшин В.П., Челиканов Г.М. Интегрирование машиностроительного производства на основе групповой технологии // Научно-технические проблемы станкостроения, производства технологической оснастки и инструмента: Мат. междунар. конф. – К.: АТМ Украины, 2002. – С. 70–72.
198. Ларшин В.П., Якимов А.В. Управление процессом проектирования технологических систем в машиностроении. – Новые технологии в машино-приборостроении и на транспорте: Материалы междунар. конф. – Севастополь: Сев ГТУ, 2001. – С. 22–25.
199. Ларшин В.П., Якимов А.В. Технология ремонта машин, как раздел технологии машиностроения. – Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. – Тр.8-й Междунар. научн.–техн. конф. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2003. – С. 25–28.
200. Ларшин В.П., Якимов А.А., Акимова М.Н. Интегрированная технологическая система зубошлифования. – Научно-технические проблемы станкостроения, производство технологической оснастки и инструмента: Материалы междунар. конф. – К.: АТМ Украины, 2002. – С. 70-72.
201. Ларшин В.П., Якимов В.А., Ковальчук Е.Н., Якимов А.В. Выбор геометрических параметров многоиточных резьбошлифовальных кругов. – Вестник машиностроения, 1986, №3. – С. 44–47.
202. Лашнев С.И., Юликов М.И. Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1975. – 391 с.
203. Лашнев С.И., Юликов М.И. Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1980. – 208 с.
204. Лашнев С.И., Борисов А.Н., Емельянов С.Г. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами: Монография / Курск: Курск. гос. техн. ун-т., 1997. – 391 с.
205. Лебедев В.Г., Клименко Н.М. Некоторые вопросы моделирования процесса образования напряжений и трещин при шлифовании закаленной стали. – Вісник інженерної академії України, 2000, спец. вип. – С. 52–55.

206. Лебедев В.Г., Клименко Н.М. Природа возникновения шлифовочных дефектов и выбор режимов шлифования для деталей с Ti-Ni-Cu покрытием. – Вісник інженерної академії України, 2001, вип.3 (частина1). – С. 52-55.
207. Лебедев Н.Н. Специальные функции и их приложение. - М.: Госиздат техн.–теор. лит., 1953. – 380 с.
208. Лезвийный инструмент из сверхтвердых материалов: Справочник / Винников Н.П., Грабченко А.И., Гриценко Э.И. и др. / Под общ. ред. Н.В. Новикова. – К.: Техніка, 1988. – 118 с.
209. Лепихов В.Г. Самоустанавливающиеся инструменты. – М.: Машиностроение, 1974. - 77 с.
210. Линенко-Мельников Ю.П. Анализ схем заточки крестовых коронок. – Синтетические алмазы, 1979, вып. 1. – С. 47-50.
211. Липцер Р.Ш., Ширяев А.Н. Статистика случайных процессов. – М.: Наука, 1974. – 696 с.
212. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
213. Лоладзе Т.Н., Бокучаева Г.И. Износ алмазов и алмазных кругов. – М.: Машиностроение, 1967. – 110 с.
214. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. – Изд. 2-е, перераб. доп. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1984. – 103 с.
215. Лурье Г.Б. Шлифование металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 172 с.
216. Лыков А.В. Теплообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1972. – 500 с.
217. Лысак Л.И., Николин Б.И. Физические основы термической обработки стали. – К.: Техніка, 1975. – 223 с.
218. Лысанов В.С., Букин В.А. и др. Эльбор в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1978. – 280 с.
219. Лысов Б.Н. Исследование электрических явлений, сопровождающих процесс шлифования и пути их использования. – Дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск: ЧПИ, 1972. – 180 с.
220. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1966. – 263 с.
221. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 178 с.
222. Малыхин В.В. Повышение эффективности шлифования вольфрамсодержащих твердых сплавов совместно со сталью алмазными кругами. – Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков: ХПИ, 1985. – 266 с.
223. Маслов Е.Н. Механизм работы абразивного зерна при шлифовании. – В кн.: Основные вопросы высокопроизводительного шлифования. – М.: Машгиз, 1960. – 196 с.
224. Маслов Е.Н. Основы теории шлифования металлов. – М.: машиностроение, 1980. – 310 с.
225. Маслов Е.Н. Теоретические основы процесса алмазного шлифования



- материалов. – В кн.: Синтетические алмазы в промышленности. – К.: Наук. думка, 1974. – С. 125-129.
226. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов.– М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
227. Маслов Е.Н., Попов С.А. Абразивная обработка металлов. – В кн.: Развитие науки о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1967. – С. 335-378.
228. Маталин А.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства машин. – М.: Машгиз, 1956. – 256 с.
229. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. – К.: Техніка, 1971. – 144 с.
230. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов по специальности “Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты”. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 496 с.
231. Маталин А.А. Шероховатость поверхности деталей машин в приборостроении. – М.- Л.: Машгиз, 1949. – 192 с.
232. Маталин А.А., Линчевский П.А., Ломакин К.В. Тонкое и алмазное растачивание. – К.: Техніка, 1973. - 80 с.
233. Матвеев Д.Д. Автоматизированное управление процессом обработки резанием. – М.: Машиностроение, 1980. - 143 с.
234. Математика и кибернетика в экономике: Словарь–справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Экономика, 1975. – 700 с.
235. Математическое моделирование технических систем / А.В. Усов, Л.И. Плотникова, В.А. Вайсман, В.Д. Дмитришин, Г.А. Оборский. – К.: Техніка, 1995. – 328 с.
236. Мельников О.В., Алешкин В.Р., Роцин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. – Л.: Колос, 1972. – 200 с.
237. Методическое пособие для дипломного проектирования по технологии машиностроения для студентов дневного, вечернего и заочного обучения. Специальность „Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты”. Под общ. ред. И.А. Коганова и Д.С. Каплана. — Тула: Изд-во ТПИ, 1970. – 113 с.
238. Методические указания к изучению раздела “Оптимизация режимов резания” курса “Нормирование труда рабочих”/ Сост. Б.Н. Игумнов, Т.П. Завгородняя. – Хмельницкий: ХТИ, 1989. – 128 с.
239. Михайлов О.П., Цейтлин Л.Н. Измерительные устройства в системах адаптивного управления станками. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
240. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. –320 с.
241. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с.
242. Мишнаевский Л.Л. Износ шлифовальных кругов. – К.: Наук. думка,

1982. – 192 с.

243. Моделювання й оптимізація в машинобудуванні: Навч. посібник / В.В. Душинський, С.Г. Кравченко. – К.: НМК ВО, 1992. – 304 с. – Рос. мовою.
244. Мордвинов Б.С. Исследование геометрических структур с применением методов теории графов: Известия ВУЗов. Машиностроение. – М.: МВТУ. – №3, 1965.
245. Мордвинов В.С., Пантюхова И.В., Подкорытова Р.Г. и др. Расчет технологических размеров и погрешностей установки заготовки: Учеб пособие.– Омск: ОПИ, 1979.– 79 с.
246. Мордвинов Б.С., Огурцов Е.С. Расчет технологических размеров и допусков при проектировании технологических процессов механической обработки: Учеб. пособие. – Омск: ОПИ, 1975. – 155 с.
247. Невельсон М.С. Автоматическое управление точностью обработки на металлорежущих станках. – Л.: Машиностроение, 1982. – 184 с.
248. Новиков Г.В. Задачи точности и производительности обработки в технологии машиностроения. – Авиационно-космическая техника и технология. Труды Государственного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”. Выпуск 14. – Харьков: Государственный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, 2000. – С. 31-35.
249. Новиков Г.В. Математическая модель процесса шлифования с учетом упругих перемещений в технологической системе. – Труды Одесского политехнического университета. - Одесса, 2001. – Вып. 5. – С. 38-42.
250. Новиков Г.В. Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОПИ, 1990. – 16 с.
251. Новиков Г.В. Расчет и анализ температуры резания при шлифовании. – Вестник Харьковского госуд. политехн. ун-та. Серия “Новые решения в современных технологиях”. Сборник научных трудов. Выпуск 75. – Харьков: ХГПУ, 1999. – С. 38-43.
252. Новиков Г.В. Энергетический баланс процессов резания материалов. – Фізичні аспекти сучасних технологій: Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірка наукових праць. Випуск 103 – Харків: ХДПУ, 2000. – С. 71-80.
253. Новиков Ф.В. Кинетика образования режущего рельефа круга в процессе шлифования. – Контактные процессы при больших пластических деформациях. – Харьков: ХАИ, 1982. – С. 40–46.
254. Новиков Ф.В. Режущий рельеф алмазного круга и его роль в формировании технологических показателей шлифования. – Резание и инструмент, 1984, вып. 32. – С. 64-70.
255. Новиков Ф.В. Теоретический анализ износа и стабилизации рельефа алмазного круга. – Резание и инструмент, 1986, вып. 36. – С. 19–24.
256. Новиков Ф.В. Закономерности износа алмазного круга в процессе шлифования. – Прогрессивные технологические процессы,

- оборудование и инструменты, ХАИ, 1987. – С. 119–126.
257. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования. – Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Одесса: ОГПУ, 1995. – 36 с.
258. Новиков Ф.В., Гасанов М.И. Физические закономерности процесса резания при алмазном шлифовании. – Вісник Харківського держ. техн. ун-ту сільск. господ., 2004, вип. 26. – С. 31–40.
259. Новиков Ф.В., Ткаченко В.П. Энергетический поход к оценке шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке. – Вісник національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Збірка наукових праць. – Харків, 2002, №19. – С. 142-145.
260. Новиков Ф.В., Шкурупий В.Г. Исследование шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятности. - Вісник НТУ”ХП”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХП”. – 2004. - № 44. – С. 140-149.
261. Новиков Ф.В., Якимов А.В., Новиков Г.В., Якимов А.А. Перспективы развития процессов резания лезвийными и абразивными инструментами. – Вісник Харківського держ. техн. ун-ту сільск. господ., 2002, вип. 10. – С. 24–29.
262. Новоселов Ю.К. Анализ и моделирование пространственно-временного взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности при шлифовании с целью повышения эффективности чистовых и отделочных операций. – Дис. ... докт. техн. наук. – Барнаул: БПИ, 1979. – 402 с.
263. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 232 с.
264. Новоселов Ю.К., Бочаров В.В., Токманенко В.Я. Анализ закономерностей работы единичного зерна в круге при шлифовании. – Абразивы, 1978, вып. 11. – С. 3–5.
265. Новоселов Ю.К., Братан С.М., Крылов И.В. Адаптивное регулирование процессом шлифования валов. – Резание и инструмент в технологических системах. – Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: ХГПУ, 1999, вып. 55. – С. 173–182.
266. Новоселов Ю.К., Красный А.М. Вычисление относительной опорной длины профиля шлифованной поверхности. – Технология и автом. произв. машиностр., 1977, вып. 19. – С. 34–37.
267. Новоселов Ю.К., Красный А.М. Вычисление некоторых параметров шероховатости шлифованной поверхности. – Технология и автом. произв. машиностр., 1977, вып. 20. – С. 62–66.
268. Нормативы времени и режимов резания при работе на станках с программным управлением. – М.: Изд-во НИАТ, 1975. – 144 с.
269. Обработка металлов резанием. Справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм и др. Под общ. ред. А.А. Панова. — М.:

- Машиностроение, 1988. — 736 с.
270. Общемашиностроительные нормативы режимов резания, нормы износа и расхода инструмента для глубокого сверления и растачивания (сверлами одностороннего резания с внутренним и эжекторным отводом стружки диаметром 20-60 мм, расточными головками диаметром 50-125 мм) / А.Д. Локтев, Н.Н. Кирин, В.Р. Гарибов и др. — М.: НИИМаш, 1984. — 81 с.
271. Одинцов Л.Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. — М.: Машиностроение, 1981. — 160 с.
272. Оптимизация технологии глубинного шлифования / С.С. Силин, Б.Н. Леонов, В.А. Хрульков и др. — М.: Машиностроение, 1989. — 120 с.
273. Оптимизация технологических процессов в гальванотехнике / А.М. Гинберг, Ю.В. Грановский, Н.Я. Федотов, В.С. Калмуцкий. — М.: Машиностроение, 1972. — 128 с.
274. Оптимизация технологических процессов в машиностроении для студентов специальности 1201, 1202: Учеб. пособие / А.В. Якимов, В.П. Ларшин, А.А. Якимов, Б.О. Ткаченко, Н.И. Решетнев. — Одесса: ОГПУ, 1995. — 105 с.
275. Основы автоматизации машиностроительного производства: Учебник для машиностроительных специальностей вузов / Е.Р. Ковальчук и др. — М.: Высшая школа, 2001. — 312 с.
276. Основы алмазного шлифования / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, А.Ф. Раб, М.Д. Узунян, М.С. Пивоваров. — К.: Техніка, 1978. — 190 с.
277. Основы кибернетики. Математические основы кибернетики: Учеб. пособие для вузов. / Под ред. К.А. Пупкова. — М.: Высшая школа, 1974. — 416 с.
278. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. — 4-е изд. — Л.: Политехника, 1990. — 272 с.
279. Основы технологии машиностроения. / Под ред. В.С. Корсакова. Изд. 3-е доп. и пераб. Учебник для вузов. — М.: Машиностроение, 1977. — 416 с.
280. Остафьев В.А., Пономаренко А.И. Обработка точных отверстий в приборостроении. — К.: Техніка, 1972. — 137 с.
281. Остафьев В.А., Антонюк В.С. Тымчик Г.С. Диагностика процесса металлообработки. — К.: Техніка, 1991. — 151 с.
282. Отделочные операции в машиностроении: Справочник / П.А. Руденко, М.Н. Шуба, В.А. Огнивец и др. / Под общ. ред. П.А. Руденко. — К.: Техніка, 1990. — 150 с.
283. Островский В.И. Оптимизация условий эксплуатации абразивного инструмента: Обзор — М.: НИИМаш, 1984. — 56 с., ил. — 7 (сер. С-2. Инструментальная и абразивно-алмазная промышленность).
284. Островский В.И. Основы теории и оптимизации процесса шлифования импрегнированным абразивным инструментом. — Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Л.: ЛПИ, 1981. — 33 с.
285. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. — Л.:

- Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 139 с.
286. Островский В.И., Савицкая В.Г. Кинематический анализ процесса шлифования. – Резание и инструмент, 1977, вып. 17. – С. 49-58.
  287. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
  288. Паршаков А.Н., Свирщев В.И. К вопросу управления автоколебанием при шлифовании. – Сб. тр. ППИ: Повышение эффективности технологических процессов в машиностроении. – Пермь, 1980. – С. 69-76.
  289. Паршаков А.Н., Якимов А.В. Колебания при шлифовании, производительность и качество обработки. – Вестник машиностроения, 1979, №8. – С. 44–47.
  290. Пахалин Ю.А. Алмазное контактно-эрозионное шлифование. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 178 с.
  291. Перепелица Б.А. Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1981. – 152 с.
  292. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – М.: Машиностроение, 1974. – 186 с.
  293. Пичугин Е. Д. Методы оптимизации: Учеб. пособ. для вузов. – Одесса: ОГПУ, 1998. – 196 с.
  294. Пляскин И.И. Оптимизация технических решений в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1982. – 176 с.
  295. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
  296. Подзей А.В. Технологические остаточные напряжения. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
  297. Подкорытов А.Н., Якимов А.А., Вайсман В.А. Технологическое обеспечение точности и качества изготовления зубчатых колес: Учеб. пособие. – Одесса: ОГПУ, 1996. – 276 с.
  298. Подстригач Я.С., Коляко Ю.М. Обобщенная термомеханика. – К.: Наук. думка, 1976. – 310 с.
  299. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. – М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.
  300. Подураев В.Н., Барзов А.А., Горелов В.А. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.
  301. Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с.
  302. Портер У. Современные основания общей теории систем. – М.: Наука, 1974. – 556 с.
  303. Проволоцкий А.Е., Ясев А.Г. Комбинированная оптимизация

- технологических параметров струйно-абразивной обработки деталей машин. – Новые технологии и материалы в металлургии и машиностроении, 2004.
304. Проволоцкий А.Е., Ясев А.Г., Гришин В.С., Маринченко И.А. Имитационное моделирование процесса обработки потоком абразивных частиц. – М.: Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 1987, №4. – С. 112–117.
305. Прогрессивные методы шлифования пропитанным абразивным инструментом. – М.: НИИмаш, 1981. – 42 с.
306. Проников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 460 с.
307. Пузанов В.В., Караулова М.Л. Геометрия абразивного зерна в круге и некоторые вопросы формообразования обработанной поверхности при глубинном шлифовании. – В кн.: Соверш. процессов резания и повыш. точности металлореж. станков. – Ижевск, 1972, вып. 4.
308. Пузанов В.В., Караулова М.Л. Некоторые особенности формообразования поверхности и силы резания при глубинном шлифовании. – В кн.: Соверш. процесса обработки металлов резанием, Ижевск, 1974, вып. 5. – С. 61–70.
309. Развитие науки о резании металлов / В.Ф. Бобров, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев и др. – М.: Машиностроение, 1967. – 415 с.
310. Размерный анализ конструкции: Справочник / Под ред. С.Г. Бондаренко и др. – К.: Техніка, 1989. – 149 с.
311. Размерная настройка элементов технологических систем в машиностроении / А.М. Дальский, М.И. Лещенко, Г.Д. Василюк, В.Е. Лоев. – К.: Техніка, 1991. – 175 с.
312. Разработка, исследование и внедрение инструмента, порошков и паст из синтетических алмазов и процессов алмазной обработки. - Отчет по теме А-10. – К.: ИСМ АН УССР, 1972. – 26 с.
313. Расчет глубины дефектного слоя при шлифовании / Якимов А.В., Ларшин В.П., Скляр А.М., Ковальчук Е.Н. – Станки и инструмент, 1986, № 9. – С. 26-27.
314. Рего К.Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений: Справ. пособие. – К.: Техніка, 1987. – 128 с.
315. Резание металлов и инструмент / Под ред. А.М. Розенберга. – М.: Машиностроение, 1964. – 226 с.
316. Резников А.Н. Теплообмен при резании и охлаждении инструментов. – М.: Машгиз, 1963. – 199 с.
317. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
318. Резников А.Н., Резников Л.А. Основы расчета шлифовальных процессов в технологических расчетах: Учебное пособие. – Куйбышев: КуАИ, 1986. – 153 с.
319. Резников А.Н., Федосеев О.Б. Выбор режимов шлифования синтетическими сверхтвердыми материалами при заданной

- шероховатости поверхности изделия. – Вестник машиностроения, 1976, № 6. – С. 69-70.
320. Резников А.Н., Федосеев О. Б., Щипанов В.В. Вопросы теории процесса резания при шлифовании сверхтвердыми материалами. – В кн.: Синтетические алмазы – ключ к техническому прогрессу, ч. 1. – К.: Наук. думка, 1977.
321. Резников А.Н., Федосеев Ю.Б., Щипанов В.В. Теоретико-вероятностное описание режущего аппарата шлифовальных инструментов, толщины среза и усилия резания. – Физ. и хим. обр. материалов, 1976, №4. – С. 93–102.
322. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: в 2-х кн. Кн. 1. – М.: Мир, 1986. – 349 с.
323. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: в 2-х кн. Кн. 2. – М.: Мир, 1986. – 320 с.
324. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: Навч. посібник / За редакцією А.І. Грабченка. – Харків: ХДПУ, 1990. – 436 с.
325. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессе резания и деформирующего протягивания. – К.: Наук. думка, 1990. – 319 с.
326. Росс Твег. Ремонт трансмиссии и ходовой части „Жигулей” (модели 2101, 2102, 2103, 2104, 2105, 2106, 2107). — Практик. пособ. — М.: ЗАО КЖИ «За рулём», 2002. — 160 с.
327. Рыбицкий В.А. Алмазное шлифование твердых сплавов. – К.: Наук. думка, 1980. – 223 с.
328. Рыбицкий В.А., Черепанов К.А., Комская И.М., Зубанев Е.Н. Высокопроизводительное алмазное шлифование износостойкого наплавочного материала типа 450X22Б7МВ2Ф. – Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении. – Пермь: ППИ, 1987. – С. 98–102.
329. Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин. – М.: Машиностроение, 1966. – 193 с.
330. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. – К.: Наук. думка, 1984. – 272 с.
331. Рыжов Э.В., Линенко-Мельников Ю.П., Красник В.Г. Прогрессивные методы абразивной обработки твердосплавного бурового инструмента. – М.: Машиностроение, 1986. – 48 с.
332. Рыжов Э.В., Сагарда А.А., Ильицкий В.Б., Чеповецкий И.Х. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке. – К.: Наук. думка, 1979. – 224 с.
333. Савчук Ю.С., Шепелев А.А. О некоторых закономерностях работы и износа алмазных кругов при глубинной заточке твердых сплавов. – Резание и инструмент, 1979, вып.22. – С. 33–38.
334. Сазонов Б.Г. Обеспечение качества поверхностного слоя при шлифовании деталей с диффузионными покрытиями. – М.: Машиностроение, 1981. – 144 с.

335. Сазонов И.П. Обеспечение качества поверхностного слоя при шлифовании деталей с диффузионным покрытием. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОПИ, 1987. – 35 с.
336. Сагарда А.А. Закономерности микрорезания единичным алмазным зерном. – Синтетические алмазы, 1969, №2. – С.9-14.
337. Сагарда А.А., Чеповецкий И.Х., Мишнаевский П.П. Алмазно-абразивная обработка деталей машин. – К.: Техніка, 1974. – 179 с.
338. Сагарда А.А. Научные основы высокопроизводительного шлифования деталей машин. – Харьков: Вища школа, 1975. – 179 с.
339. Самарский А.А. Теория размерных схем: Учеб. пособие. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
340. Самоподнастраивающиеся станки / Под ред. Б.С. Балакшина. – М.: Машиностроение, 1967. – 399 с.
341. CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support — непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции) в авиастроении / Научн. ред. А.Г. Братухин. — М.: Изд-во МАИ, 2002. – 676 с.
342. Сальников А.Н. Системный анализ процессов абразивной обработки (на примере шлифования). – Дис. ... докт. техн. наук. – Саратов: СПИ, 1982. – 378 с.
343. Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д., Бовкун Г.А., Сычев В.С. Электроискровое легирование металлургических поверхностей. – К.: Наук. думка, 1976. – 219 с.
344. Сборка и монтаж изделий машиностроения: Справочник. В 2-х т. Т.1. Сборка изделий машиностроения / Под ред. В.С. Корсакова, В.К.Замятина, 1983. – 480 с.
345. Свирщев В.И. Исследование геометрических показателей качества процесса плоского прерывистого шлифования с учетом его динамических особенностей. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОПИ, 1977. – 19 с.
346. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1977. – 440 с.
347. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 370 с.
348. Семко М.Ф., Грабченко А.И., Зубкова М.Я., Раб А.Ф., Воронков В.И. Эльборовое шлифование быстрорежущих сталей. – Харьков: Вища школа, 1974. – 136 с.
349. Семко М.Ф., Грабченко А.И., Левченко Н.В., Раб А.Ф. Электроалмазное шлифование инструментальных материалов. – К.: Вища школа, 1974. – 120 с.
350. Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. – Харьков: Вища школа, 1980. – 191 с.
351. Семко М.Ф., Узунян М.Д., Краснощек Ю.С. Алмазно-искровое шлифование безвольфрамовых твердых сплавов. – Сверхтвердые



- материалы, 1980, №1. – С. 42-47.
352. Семко М.Ф., Узунян М.Д., Сизый Ю.А. Взаимосвязь условного нажатия резания и прочности микрокромки алмазных зерен с их работоспособностью. – Синтетические алмазы, 1975, вып. 2. – С. 16–19.
353. Семко М.Ф., Узунян М.Д., Сизый Ю.А., Пивоваров М.С. Работоспособность алмазных кругов. – К.: Техніка, 1983. – 95 с.
354. Семко М.Ф., Узунян М.Д., Юфа Э.Ф. Экономическое обоснование выбора алмазного круга. – Харьков: Прапор, 1971. – 99 с.
355. Сизый Ю.А. Исследование работоспособности алмазных шлифовальных кругов. – Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков: ХПИ, 1975. – 237 с.
356. Силин С.С., Хрульков В.А., Лосанов А.В., Рыкунов Н.С. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 64 с.
357. Синтетические алмазы в машиностроении / Под ред. В.Н. Бакуля. – К.: Наук. думка, 1976. – 352 с.
358. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
359. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов / С.Н. Корчак, А.А. Кошин, А.Г. Ракович, Б.И. Синицын. Под общ. ред. С.Н. Корчака. – М.: Машиностроение, 1988. – 352 с.
360. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т.1 и Т. 2. – М.: Наука, 1974. – 450 с. и 656 с.
361. Снеддон И. Преобразование Фурье. – М.: Иностран. лит., 1955. – 610 с.
362. Соренков Э.И., Телига А.И., Шаталов А.С. Точность вычислительных устройств и алгоритмов. – М.: Машиностроение, 1976. – 200 с.
363. Сосонкин В.Л. Программное управление технологическим оборудованием: Учебник для вузов по специальности "Автоматизация технологических процессов и производств". – М.: Машиностроение, 1991. – 512 с.
364. Сошников С.А. Повышение работоспособности алмазных кругов при шлифовании твердосплавных изделий с прерывистыми поверхностями. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тула: ТПИ, 1984. – 23 с.
365. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.; под общей ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение, 1987. – 846 с.
366. Справочник по производственному контролю в машиностроении / Под ред. А.К. Кубая. – Л.: Машиностроение, 1974. – 676 с.
367. Справочник по САПР / А.П. Будя, А.Е. Кононюк, Г.П. Куценко и др., под ред. В.И. Скурихина. – К.: Техніка, 1988. – 375 с.
368. Справочник технолога – машиностроителя. В 2-х т. Т. 1 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 656 с.
369. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2. /Под ред. А.Г.

- Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.
370. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т.1 / Под ред. А.Н. Малова. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1972. – 695 с.
371. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т.2 / Под ред. А.Н. Малова. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1972. – 568 с.
372. Справочник технолога по автоматическим линиям / Косилова А.Г., Лыков А.Г., Деев О.М. и др. / Под ред. А.Г. Косиловой. – М.: Машиностроение, 1972. – 216 с.
373. Станочные приспособления: Справочник. В 2-х т. / Ред. совет: Б.Н. Вардашкин (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1984. – Т.1. / Под ред. Б.Н. Вардашкина, А.А.Шатилова, 1984. – 592 с.
374. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.
375. Стратегічний технологічний менеджмент: Навч. посібник. – Харків: НТУ «ХП», 2003. – 448 с.
376. Сулима А.М., Евстигнеев М.И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. – М.: Машиностроение, 1974. – 256 с.
377. Сю Д., Мейер А. Современная теория автоматического управления и ее применение. – М.: Машиностроение, 1972. – 544 с.
378. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.
379. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.
380. Теоретические основы технологии машиностроения: Учебник / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, А.А. Якимов, Г.В. Новиков, Н.И. Решетнев. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 491 с.
381. Тепловые и механические процессы при резании металлов: Учеб. пособие / Ф.В. Новиков, А.А. Якимов, Г.В. Новиков, С.Г. Зимин, В.А. Вайсман. – Одесса: ОГПУ, 1997. – 179 с.
382. Теплофизика механической обработки: Учеб. пособие / А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. – К.– Одесса: Лыбидь, 1991. – 240 с.
383. Терган В.С. Плоское шлифование: Учебник для профессионально-техн. училищ. – 3-е изд., перераб. и доп.. – М.: Высш. школа, 1980. – 168 с.
384. Техническая механика. Теоретическая механика. Сопrotивление материалов: Учеб. для машиностр. спец. техникумов / А.А. Эрдеди, Ю.А. Медведев, Н.А. Эрдеди. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – 304 с.
385. Технология машиностроения: В 2 т. Т.2. Производство машин: Учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, О.М. Деев и др. Под ред. Г.Н. Мельникова. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. — 640 с.

386. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э.В. Рыжов. – К.: Наук. думка, 1984. – 272 с.
387. Технологический классификатор деталей машиностроения и приборостроения. – Изд-во стандартов, 1987. – 256 с.
388. Технологическое обеспечение качества продукции в машиностроении. Активный контроль / Г.Д. Бурдун, С.С. Волосов, Н.Н. Марков и др. / Под ред. Г.Д. Бурдуна и С.С. Волосова. – М.: Машиностроение, 1975. – 279 с.
389. Технологія конструкційних матеріалів / За ред. М.А. Сологуба. – К.: Вища шк., 1993.
390. Технологія автоматизованого машинобудування: Підручник /О.В. Якимов, В.С. Гусарев, О.О. Якимов та інші. – Одеса: ОДПУ, 1999. – 402 с.
391. Технология машиностроения: В 2 т. Т.1. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский и др. Под ред. А.М. Дальского. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 564 с.
392. Технология машиностроения: В 2 т. Т.2. Производство машин: Учебник для вузов / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, О.М. Деев и др. Под ред. Г.Н. Мельникова. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 640 с.
393. Технология машиностроения: Учебник / А.В. Якимов, В.Н. Царюк, А.А. Якимов, Г.А. Оборский, В.П. Ларшин, А.В. Самойленко. – Одесса: Астропринт, 2001. – 608 с.
394. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1975. – 576 с.
395. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1972.
396. Тищенко Н.М. Введение в проектирование сложных систем автоматики. – М.: Энергия, 1976. – 305 с.
397. Ткаченко Б.О. Повышение стабильности высокопроизводительного резьбошлифования прецизионных ходовых винтов. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОГПУ, 1994.
398. Горбило В. М. Алмазное выглаживание. – М.: Машиностроение, 1972. – 105 с.
399. Точность и производственный контроль в машиностроении: Справочник / Под ред. А.К. Кутая, Б.М. Сорочкина. – Л.: Машиностроение, 1983. – 368 с.
400. Трент Е.М. Резание металлов / Пер. с англ. Г.И. Айзенштока. – М.: Машиностроение, 1980. – 263 с.
401. Тульпа С.М. Резьбошлифовальные работы. – М.: Машиностроение, 1973. – С. 135–142.
402. Узунян М.Д., Крючков В.Я. Оптимальные условия алмазно-искровой обработки безвольфрамового сплава ТН-20. – Сверхтвердые материалы, 1981, № 1. – С. 42-44.
403. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И.

- Свирщев, В.П. Ларшин. – К.: Техніка, 1983. – 184 с.
404. Усов А.В. Повышение эффективности процесса бездефектного шлифования материалов и сплавов, предрасположенных к трещинообразованию. – Дис. ... докт. техн. наук. – Одесса: ОПИ, 1991. – 350 с.
405. Федосеев О.Б. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса шлифования синтетическими сверхтвердыми материалами. – Дис. ... канд. техн. наук. – Тольятти: ТПИ, 1975. – 149 с.
406. Федосеев О.Б. Шлифование синтетическими сверхтвердыми материалами. – Изв-я высш. учебн. заведений / Машиностроение, 1977, №5. – С. 104–106.
407. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.2. “Теплофизика резания материалов”. – Одесса: ОНПУ, 2003. – 625 с.
408. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.4. “Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов”. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.
409. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. — Т.6. „Качество обработки деталей машин”. — Одесса: ОНПУ, 2003. — 716 с.
410. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.7. „Точность обработки деталей машин”. – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 с.
411. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справочник / Под ред. Б.Е. Неймарка. – М.: Энергия, 1967. – 240 с.
412. Филимоненко В.Н., Долаев Н.Л. Алмазное и электроалмазное шлифование твердых сплавов с повышенными глубинами. – Тр. Новосибирск. электротехнич. ин-та, 1972, вып.2. – С. 43–47.
413. Филимонов Л.Н. Эффективный режущий профиль шлифовальных кругов и его роль при формообразовании поверхностного слоя обрабатываемых деталей. – Абразивы, 1971, вып.2. – С. 7–11.
414. Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов. – М.: Машиностроение, 1973. – 134 с.
415. Филимонов Л.Н. О роли рельефа рабочей поверхности круга в процессе шлифования. – В кн.: Вероятностно-статистические основы процессов шлифования и доводки. – Л., 1974. – С. 89–94.
416. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. – Л.: Машиностроение, 1979. – 245 с.
417. Филимонов Л.Н. Плоское шлифование / Под ред. В.И. Муцяно. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 109 с.
418. Филоненко С.Н. Резание металлов. – К.: Техніка, 1975. – 231 с.

419. Фридель Ж. Дислокации. – М.: Мир, 1967. – 467 с.
420. Фурсов С.П., Парамонов А.М., Семенчук А.В. Источники питания для электроискрового легирования. – Кишинев.: Штница, 1983. – 141 с.
421. Хедли Дж. Нелинейное и динамическое программирование. – М.: Мир, 1967.
422. Худобин Л.В., Хусаинов А.Ш. Плоское шлифование тонкостенных заготовок. – СТИН, 1997, № 9. – С. 20–22.
423. Хусаинов А.Ш. Повышение эффективности операций шлифования заготовок тонкостенных деталей путем снижения теплонапряженности процесса обработки. – Дис. ... канд. техн. наук. – Ульяновск: УлГТУ, 1996. – 161 с.
424. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход. – М.: Наука, 1975. – 344 с.
425. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
426. Чернов Е.А., Кузьмин В.П. Комплектные электроприводы станков с ЧПУ: Справочное пособие. – Горький: Волго-вятское кн. изд-во, 1989. – 320 с.
427. Чудов В.А., Цидулко Д.В., Фрейдгейм Н.И. Размерный контроль в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1982. – 328 с.
428. Чумный Ю.И., Яровой Ю.В. Методические положения, повышающие эффективность проектирования технологических систем и процессов. – Вісник інженерної академії України, 2001, №3, частина 1. – С. 179-182.
429. Шальнов В.А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.
430. Шандров Б.В. Автоматизация производства (металлообработка): Учебник для проф. образования / Б.В. Шандров, А.А. Шапорин, А.Д. Чудаков. – М.: Издательский центр “Академия”, 2004. – 256 с.
431. Шарков В.А. Повышение производительности и качества заточки режущего инструмента. – Дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОПИ, 1984. – 21 с.
432. Шегал М.Я. Доводка измерительных инструментов. – М.: Машиностроение, 1987.
433. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 420 с.
434. Шторм Р. Теория вероятностей, математическая статистика, статистический контроль качества (пер. с нем.). – М.: Мир, 1976.
435. Щеголев В.А., Уланова М.Е. Эластичные абразивные и алмазные инструменты. – М.: Машиностроение, 1977. – 184 с.
436. Эльянов В.Д. Эксплуатационные возможности шлифовальных кругов. – М.: НИИМаш, 1976. – 55 с.
437. Юдин Д.Б., Гольштейн Е.Г. Линейное программирование. – М.: Наука, 1969.
438. Якимов А.А. Основы теории и стабилизации качества поверхностного

- слоя при прерывистом шлифовании зубчатых колес. – Харьков, 1997. – 209 с.
439. Якимов А.А. Основы теории обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при прерывистом шлифовании зубчатых колес. – Одесса: ОГПУ, 1997. – 212 с.
440. Якимов А.А. Повышение эффективности прерывистого шлифования деталей, закаленных до высокой твердости. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: ОПИ, 1991. – 16 с.
441. Якимов А.А. Технологические основы обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при шлифовании зубчатых колес. – Одесса: Астропринт, 2003. – 453 с.
442. Якимов А.А., Новиков Ф.В. Повышение эффективности прерывистого шлифования. – Вестник машиностроения, 1988, №7. – С. 45-47.
443. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
444. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с.
445. Якимов А.В. Прерывистое шлифование. – К.: Вища школа, 1986. – 175 с.
446. Якимов А.В. и др. Тепловые процессы при обычном и прерывистом шлифовании. – Одесса: ОГПУ, 1998. – 272 с.
447. Якимов А.В., Ларшин В.П., Ковальчук Е.Н., Скляр А.М. Повышение точности шага резьбы ходовых винтов при многониточном резьбошлифовании. – Вестник машиностроения, 1989, №8. – С. 35–38.
448. Якимов А.В., Ларшин В.П., Русавский Ю.П., Якимов В.А. Регулирование режущей способности шлифовальных кругов. – Сверхтвердые материалы, 1980, № 6. – С. 34–38.
449. Якимов А.В., Ларшин В.П., Скляр А.М., Ковальчук Е.Н. Расчет глубины дефектного слоя при шлифовании. – Станки и инструмент, 1986, №9. – С. 26–27.
450. Якимов А.В., Ларшин В.П., Скляр А.М. Влияние формы поверхности обрабатываемой детали на температуру при шлифовании. – Сверхтвердые материалы, 1986, №4. – С. 38-43.
451. Якимов А.В., Ларшин В.П., Скляр А.М. Обеспечение качества поверхности путем выбора глубины шлифования. – Вестник машиностроения, 1988, № 2. – С. 48 -50.
452. Якимов А.В., Ларшин В.П., Ткаченко Б.О. Повышение точности финишного шлифования резьбы ходовых винтов качения // Совершенствование процессов абразивно-алмазной обработки в машиностроении. – Пермь: Изд-во Пермского политехн. ин-та. 1990. – С. 3–13.
453. Якимов А.В., Линчевский П.А., Якимов А.А. Обоснование маршрута обработки и размерный анализ технологических процессов: Учебн. пособие. – К.: НМК ВО, 1993. – 128 с.
454. Якимов А.В., Новиков Ф.В., Якимов А.А. Высокопроизводительная обработка абразивно-алмазными инструментами. – К.: Техніка, 1993. –

152 с.

455. Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов А.А. Алмазная обработка: Учеб. пособие. – К.: ІЗМН, 1996. – 168 с.
456. Якімов О.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якімов О.О. Високопродуктивне шліфування: Навч. посібник. – К.: ІСДО, 1995. – 180 с.
457. Якимов А.В., Русавский Ю.П., Ларшин В.П. Влияние погрешности резьбы на качество ее поверхностного слоя при шлифовании. – Прогрессивные методы повышения качества, долговечности и надежности деталей машин при алмазно-абразивной обработке: Тез. докл. конф. – Волжский, 1981. – С. 99-100.
458. Якимов А.В., Смирнов Л.П., Бояршинов Ю.А. и др. Качество изготовления зубчатых колес. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
459. Якимов О.В., Усов А.В., Слободяник П.Т., Юргачов Д.В. Теплофізика механічної обробки. – Одеса: Астропринт, 2000. – 256 с.
460. Якушев А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: Учебник. – 5-е издание перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 343 с.
461. Ясев А.Г. Соответствие математических моделей и технологических процессов в металлургии и машиностроении. – Днепропетровск: Днепр-VAL, 2001. – 237 с.
462. Ящерицин П.И., Жальнерович Е.А. Шлифование металлов. – Минск: Изд-во Беларусь, 1970. – 249 с.
463. Ящерицын П.И., Дорофеев В.Д., Пахалин Ю.А. Электроэрозионная правка алмазно-абразивных инструментов. – Минск: Наука и техника, 1981. – 232 с.
464. CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции) в авиастроении / Научн. ред. А.Г. Братухин. – М.: Изд-во МАИ, 2002. – 676 с.
465. Dorsch H. Schwingquarz-Temperatur sensoren // Sensor Rept., 1987,2, № 5. – S. 9–10.
466. Kato S., Vamaguchi K, Watanabe Y., Hiraiwa Y. Measurement of Temperature Distribution Within Tool Using Powders of Constant Melting Point. // trans. ASME. 1976.vol. 10, №2. – P.239–245.
467. Nawara L., Ryniewicz A. Zastosowanie termowizji do badan cieplnych w urzadzeniach technologicznych // Mechanik. 1987. 60, №3. – 113–115 s.
468. Ueda T., Hosokawa A., Yamamoto A. Measurement of grinding temperature using infrared radiation pyrometer with optical fiber // Trans. ASME: I. Eng. ing. 1986. 108, №4. – P. 247–251.
469. Vieregge G. Zerspanung der Eisenwerkstoffe. Bd. 16. der Stahleisen – Bucher, 2 Aufl. Verlag Stahleisen. – Dusseldorf, 1970. – 363 s.
470. Jacobus K., Devor R.E., Kapoor S.G. Machining – Induced residual stress: Experimentation and modeling // Transaction of the ASME: Journal of manufacturing science and engineering. 2000. Vol. 122, 1. P. 20 – 31.
471. Park I.W., Dornfeld D.A. A study of burr formation processes using the finite

- element method. // Transaction of the ASME: Journal of Engineering materials and technology. 2000. Vol.122, 2. Part 1: P. 221 – 228, Part 2: P. 229 – 237.
472. Boothroyd G., 1975, Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools, Hemisphere, Washington, Chapter 3.
473. Koch U., 1970, “Experimental and Theoretical Analysis of Lathe Tool Temperature in Oblique Cutting”, Proc. 11th MTDR Conference, pp. 533–540.
474. Stoiber F., Duke T. SPC for quality plastic parts. – Machine Design. – 1989 Volume 61. – №2. – P.43–47.
475. Baier J., Milnickel R., Müller P. Konzept einer digitalen AC - Grenzregeilung für Tiefbohrmaschinen // Ind. – Anz. – 1985. – 107. - № 40. – S. 39–40.
476. Feinbearbeitung mit System Mapal Dr. Kress KG und WWS. Проспекты и каталоги. – 1980 – 1996 г.г.
477. Pflighar F. The aspect of stability in designing deep hole drilling and boring tools // Proc. 2 nd Ind. Conf. “Deep Hole Drill. and Boring”. – Brunel Univ., 1977. – s .i., s. a., 21 p.
478. Schneider H.P. Werkzeuge automatisch überwachen // Ind. – Anz. – 1986. – 108. – № 10. – S. 44–46.
479. Takata S., Nakajima T., Ahn J.H., Sata T. Tool breakade monitoring by means of fluctuations in spindle rotational speed // Annals of the CIRP. – 1987. – 36. – № 1. – P.49–52.
480. Tuffentsammer Karl. Präzisionsschneidwerkzeuge Die Herstellung und Bearbeitung Zylindrischer Innenflächen// Techn. Zbl. prakt. für Metallbearb. – 1981. – 36. – № 3. – S. 35–37, 39–42.
481. Katsundo Hitomi. Strategic integrated manufacturing systems: the concept and structures // International Journal of Production Economics. – Volume 25 – NOS. 1–3, December 1991. – P. 5 –12.



## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

#### Минимальные припуски на черновое обтачивание, растачивание и фрезерование заготовок, полученных горячей штамповкой

Диаметр заготовки, мм	Припуск $Z_{min}$ на размер при длине, мм				
	До 120	Свыше 120 до 260	Свыше 260 до 500	Свыше 500 до 800	Свыше 800 до 1250
До 50	1,7	2,0	2,4	2,8	3,2
Свыше 50 до 120	2,0	2,2	2,6	2,9	3,3
Свыше 120 до 260	2,2	2,4	2,7	3,0	3,4
Свыше 260 до 500	2,5	2,7	2,8	3,1	3,5

Примечания.

1. Для штамповок из алюминиевых, магниевых и медных сплавов, а так же для черного проката повышенной точности припуски умножают на 0,8.
2. Припуски на все поверхности штамповки принимаются с учетом максимальных габаритных размеров.
3. При закреплении заготовки в патроне длина равна удвоенному расстоянию от наиболее удаленного торца до кулачков патрона.

### Приложение 2

#### Минимальные припуски на черновое обтачивание и растачивание поверхностей в отливках

Максимальный габаритный размер отливки, мм	Литье заготовок в песчаные формы	Литье заготовок в кокиль и оболочковые формы
	Диаметр, мм	
До 50	2,2	1,4
Свыше 50 до 120	2,6	1,6
Свыше 120 до 260	3,3	1,8
Свыше 260 до 500	4,1	2,0
Свыше 500 до 800	5,0	2,3

Примечание. Припуски на все поверхности отливки выбирают с учетом максимального размера (диаметра или длины).

### Приложение 3

#### Минимальные припуски на чистовое обтачивание, фрезерование после чернового или калиброванного проката

Диаметр или толщина, мм	Длина деталей, мм							
	До 120	Свыше 120 до 260	Свыше 260 до 500	Свыше 500 до 800	До 120	Свыше 120 до 260	Свыше 260 до 500	Свыше 500 до 800
	Термически необработанных				Термически обработанных			
До 50	0,5	0,6	0,8	1,0	0,8	1,0	1,2	1,4
Свыше 50 до 120	0,6	0,7	0,9	1,1	0,85	1,1	1,2	1,5
Свыше 120 до 500	0,7	0,8	1,0	1,2	0,9	1,1	1,3	1,6

### Приложение 4

#### Минимальные припуски на наружное шлифование детали (в центрах и бесцентровое)

Диаметр, мм	Расчетная длина детали, мм							
	До 120	Свыше 120 до 260	Свыше 260 до 500	Свыше 500 до 800	До 120	Свыше 120 до 260	Свыше 260 до 500	Свыше 500 до 800
	Термически необработанных				Термически обработанных			
До 18	0,15	0,18	0,25	–	0,18	0,22	0,30	–
Свыше 18 до 50	0,18	0,22	0,28	0,35	0,20	0,28	0,35	0,50
Свыше 50 до 120	0,20	0,25	0,30	0,40	0,25	0,35	0,40	0,55
Свыше 120 до 5000	0,25	0,30	0,35	0,45	0,30	0,40	0,50	0,65

Примечания.

1. К термически обработанным относят детали, которые прошли термическую обработку после чистового обтачивания.
2. Если шлифование выполняется за две операции, то на предварительное шлифование отводится 2/3 припуска, а на окончательное – 1/3.
3. При обработке в центрах расчетная длина равна длине детали. При обработке в патроне расчетная длина равна удвоенному расстоянию от торца до конца обрабатываемого участка вала.

## Приложение 5

### Минимальные припуски на чистовое растачивание, зенкерование и развертывание отверстий

Диаметр отверстия, мм	Чистовое растачивание, зенкерование	Развертывание
До 10	–	0,12
Свыше 10 до 30	0,5	0,16
Свыше 30 до 50	0,6	0,20
Свыше 50 до 120	0,9	–
Свыше 120 до 500	1,2	–

Примечание. Если развертывание выполняется на двух переходах или операциях, то на предварительное развертывание отводится 2/3 припуска, на окончательное – 1/3.

## Приложение 6

### Минимальные припуски на шлифование отверстий после чистового растачивания

Диаметр, мм	Термически необработанные и обработанные жесткие детали	Термически обработанные нежесткие детали
До 50	0,20	0,25
Свыше 50 до 120	0,25	0,35
Свыше 120 до 260	0,35	0,50
Свыше 260 до 500	0,40	0,70

Примечание. Термически обработанными считаются детали, которые прошли термическую обработку после чистового растачивания и перед операцией шлифования.

## Приложение 7

### Минимальные припуски на протягивание отверстий

Диаметр, мм	Отверстия подготовленные	
	по 9–11–тому качеству точности (после чистового растачивания)	по 12–тому качеству точности
До 30	0,35	0,45
Свыше 30 до 50	0,40	0,55
Свыше 50 до 80	0,50	0,70

Примечание. Приведенные данные соответствуют деталям, имеющим  $l/d < 15$ .

## Приложение 8

### Минимальные припуски на тонкое (алмазное) растачивание

Диаметр отверстий, мм	Предварительное тонкое однократное растачивание по 9-10-тому качеству точности				Окончательное растачивание – все материалы
	Легкие сплавы	Баббит	Бронза, чугун	Сталь	
До 50	0,2	0,25	0,15	0,12	0,05
Свыше 50 до 500	0,3	0,35	0,25	0,15	0,08

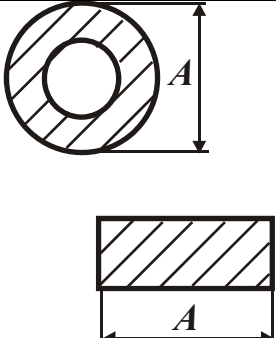
## Приложение 9

### Минимальные припуски на черновое подрезание торцов, фрезерование и строгание плоскостей

Максимальный габаритный размер, мм	Сталь, полученная горячей штамповкой	Литье в песчаные формы	Цветные и титановые сплавы, полученные штамповкой	Литье в кокиль, оболочковые формы
До 30	0,9		0,7	
Свыше 30 до 120	1,0		0,8	
Свыше 120 до 260	1,2		0,9	
Свыше 260 до 500	1,5		1,1	

## Приложение 10

### Минимальные припуски на чистовое подрезание торцов и на чистовое фрезерование плоскостей

	$A$ , мм	$Z_{min}$ , мм
	До 30	0,30
	Свыше 30 до 120	0,40
	Свыше 120 до 260	0,55
	Свыше 260 до 500	0,70

## Приложение 11

### Минимальные припуски на шлифование и тонкое фрезерование торцов и плоскостей после чистового подрезания и фрезерования (по вариантам)

Длина обработки, мм	I	II	III		IV	
	Шлифование и фрезерование термически не обработанных деталей	Обработка термообработанных деталей	Предварительное шлифование до термообработки	Окончательное шлифование после термообработки	Шлифование после термообработки	
					предварительное	окончательное
До 30	0,10	0,15	0,10	0,07	0,07	0,05
Свыше 30 до 120	0,15	0,20	0,15	0,15	0,15	0,07
Свыше 120 до 260	0,20	0,30	0,20	0,25	0,20	0,10
Свыше 260 до 500	0,30	0,45	0,30	0,35	0,30	0,15

## Приложение 12

### Минимальные припуски на обработку зубчатого венца прямозубых зубчатых колес

Модуль	Чистовое фрезерование, долбление, строгание	Шлифование	Шевингование
До 2	0,25	0,2	0,05
Свыше 2 до 3	0,4	0,25	0,07
Свыше 3 до 5	0,5	0,3	0,10
Свыше 5 до 7	0,6	0,35	0,12
Свыше 7 до 10	0,7	0,4	0,15

**Допуски на диаметры валов и отверстий, а также линейные размеры**

Номинальные размеры	Квалитет точности								
	6-й	7-й	9-й	10-й	11-й	12-й	14-й	15-й	16-й
Свыше 1 до 3	0,01	0,014	0,02	0,04	0,06	0,12	0,25	0,4	0,6
Свыше 3 до 6	0,013	0,018	0,025	0,048	0,08	0,16	0,3	0,48	0,75
Свыше 6 до 10	0,016	0,022	0,03	0,058	0,10	0,20	0,36	0,58	0,9
Свыше 10 до 18	0,019	0,027	0,035	0,070	0,12	0,24	0,43	0,70	1,1
Свыше 18 до 30	0,023	0,033	0,045	0,044	0,14	0,28	0,52	0,84	1,3
Свыше 30 до 50	0,027	0,039	0,050	0,10	0,17	0,34	0,62	1,00	1,6
Свыше 50 до 80	0,030	0,046	0,06	0,12	0,20	0,40	0,74	1,20	1,9
Свыше 80 до 120	0,035	0,054	0,07	0,14	0,23	0,46	0,87	1,4	2,2
Свыше 120 до 180	0,040	0,063	0,08	0,16	0,26	0,53	1,00	1,6	2,5
Свыше 180 до 260	0,045	0,073	0,09	0,185	0,30	0,60	1,15	1,9	2,9
Свыше 260 до 360	0,050	0,084	0,100	0,215	0,34	0,68	1,35	2,2	3,3
Свыше 360 до 500	0,06	0,095	0,120	0,250	0,38	0,76	1,55	2,5	3,8
Свыше 500 до 630	0,07	0,110	0,140	0,280	0,45	0,90	1,80	2,8	4,5
Свыше 630 до 800	0,08	0,120	0,150	0,30	0,50	1,00	2,00	3,0	5,0
Свыше 800 до 1000	0,09	0,130	0,170	0,35	0,55	1,10	2,20	3,5	5,5

**Новые положения теории и методики расчета технологических размерных цепей при выполнении размерного анализа технологических процессов**

Методика расчета зависит от того, является ли замыкающим звеном цепи конструкторский размер детали по чертежу или размер снимаемого в процессе обработки припуска.

Если конструкторский размер служит замыкающим звеном, то расчет такой технологической размерной цепи не вызывает затруднений и сводится к определению номинального размера, допуска и предельных отклонений искомого технологического размера по известным формулам метода предельного суммирования (максимума и минимума).

Если замыкающим звеном цепи есть припуск  $Z$ , оставляемый для последующего перехода, то сначала необходимо определить его минимальное значение  $Z_{i\min}$ . При этом следует учитывать, что рекомендации по выбору или расчету  $Z_{i\min}$  для размерного анализа, изложенные в справочной литературе, строго говоря, не пригодны. Связано такое заключение со следующими теоретическими положениями.

Методика расчетов размерных цепей при размерном анализе технологических процессов построена на использовании метода максимума и минимума и соответствует только схеме расчета припусков для метода пробных ходов и промеров (рис. П1,а).

Проанализируем данную схему с точки зрения ее соответствия теории расчета размерных цепей. Главное положение этой теории заключается в том, что допуск замыкающего звена равен сумме допусков составляющих звеньев

(размеров). Замыкающим звеном является припуск  $Z_i$ , а составляющими звеньями служат технологические размеры  $a_i$  и  $a_{i-1}$ , имеющие соответственно допуски  $T_i$  и  $T_{i-1}$ .

Определим допуск припуска  $Z_i$ :

$$TZ_i = Z_{i\max} - Z_{i\min} = T_i + T_{i-1}.$$

Анализ приведенной формулы свидетельствует о полном соответствии рассматриваемой схемы теории расчета размерных цепей. Однако возникает другое противоречие, связанное с областью применения метода пробных ходов и промеров. Этот метод, а следовательно, и его схема применяются в условиях единичного производства, где вообще нет необходимости выполнять размерный анализ технологических процессов.

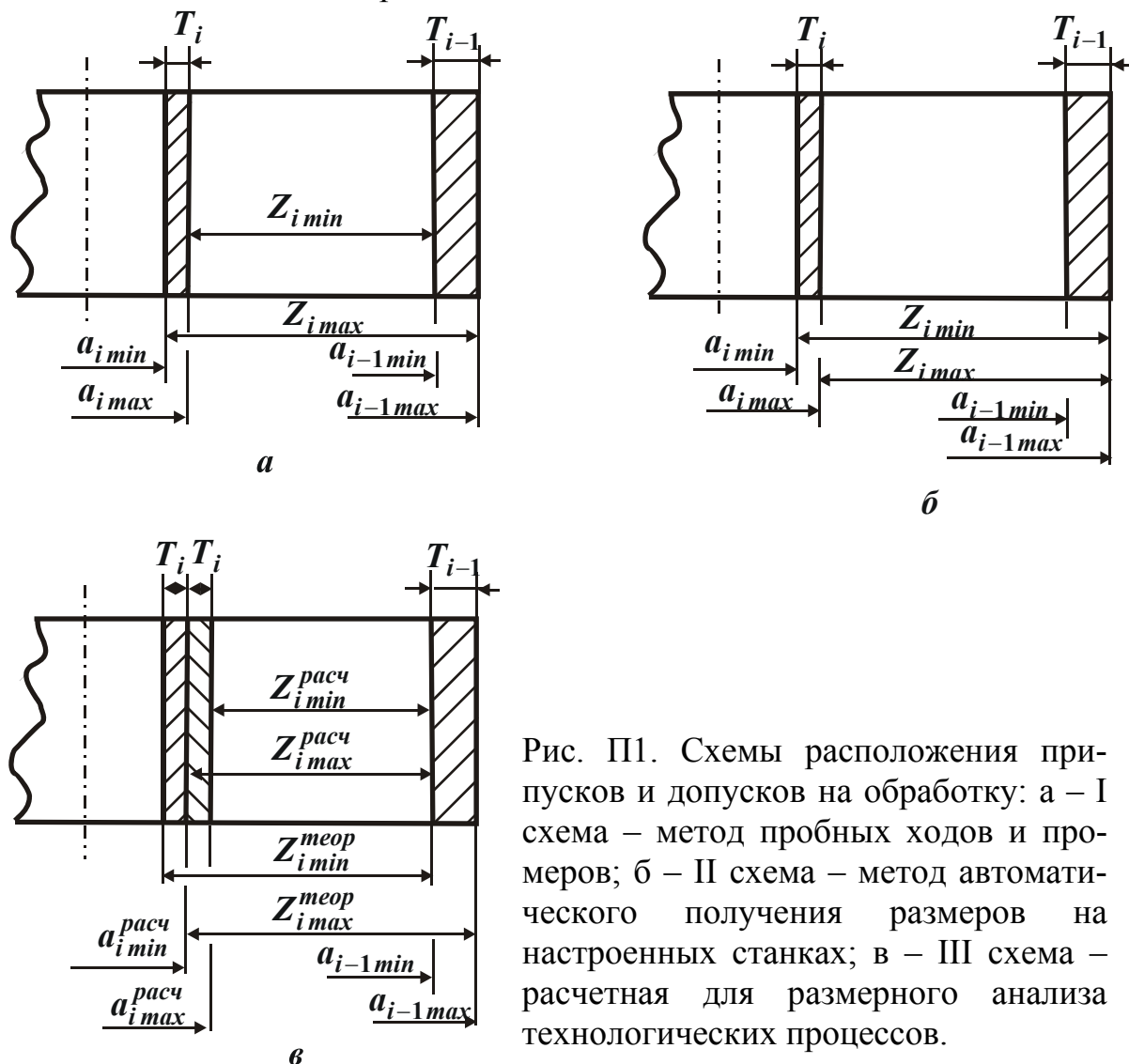


Рис. П1. Схемы расположения припусков и допусков на обработку: а – I схема – метод пробных ходов и промеров; б – II схема – метод автоматического получения размеров на настроенных станках; в – III схема – расчетная для размерного анализа технологических процессов.

Эффективная область использования размерного анализа – крупносерийное и массовое производство. Иногда его необходимо применять в средне- и мелкосерийном производстве, но в любом случае это связано с другим методом обеспечения требуемой точности обработки, а именно с методом автоматического получения размеров на настроенных станках, рис. П2.

Как следует из рис П.2, с учетом отжатый  $y_{min}$  и  $y_{max}$  в настроенной технологической системе при обработке на размер  $a_i$  в заготовке с минимальным размером будет снят припуск  $Z_{i min}$ , а у заготовки с максимальным размером –  $Z_{i max}$ . Соответственно, из минимальной заготовки будет получена минимальная деталь, а из максимальной заготовки – максимальная деталь (размеры  $a_{i min}$  и  $a_{i max}$ ). В этом случае схему расположения припусков и допусков на обработку можно представить в виде, показанном на рис. П1,б.

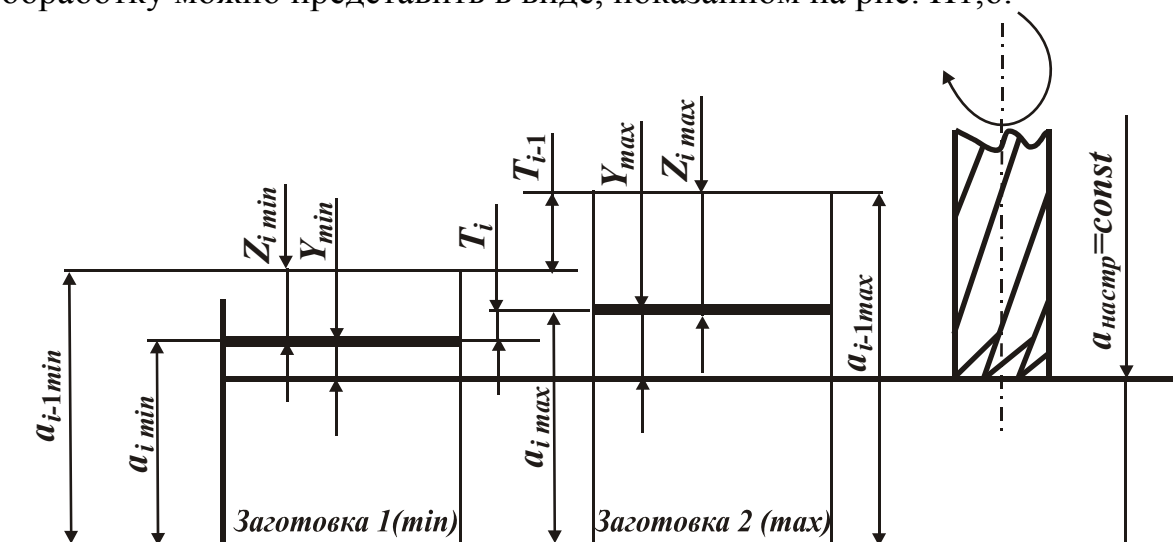


Рис. П2. Схема фрезерования двух заготовок на настроенном станке.

Проанализируем эту схему по аналогии со схемой, показанной на рис. П1,а. Допуск припуска:  $Z_i$ :  $TZ_i = Z_{i max} - Z_{i min} = T_{i-1} - T_i$ , т.е. допуск замыкающего звена не равен сумме допусков составляющих звеньев. Таким образом, вторая схема не укладывается в теорию размерных цепей и при расчетах будет давать ошибочные результаты. Вместе с тем, эта схема отражает практику применения метода автоматического получения размеров на настроенных станках и ее необходимо учитывать в расчетах при выполнении размерного анализа.

Возникшее теоретическое противоречие можно разрешить построением третьей (расчетной) схемы расположения припусков и допусков на обработку (рис. П1,в) и введения так называемой расчетной величины  $Z_{i min}^{расч}$ , которая будет отличаться от теоретической (или справочной), но будет пригодна для использования в размерном анализе технологических процессов. Для обоснования вводимых зависимостей совместим все три схемы расположения припусков и допусков на обработку, рис. П1.

Теоретически величина  $Z_{i min} = (R_Z + h)_{i-1} + \Delta_{\Sigma i-1} + \varepsilon_i$  в первой и второй схемах должна быть одинаковой. Если эту величину без изменений ввести во вторую схему, а при расчетах использовать формулы, соответствующие первой схеме, то получим  $Z_{i max} = Z_{i min} + T_i + T_{i-1}$ . В то же время во второй схеме:  $Z_{i max} = Z_{i min} + T_{i-1} - T_i$ .

Из приведенных формул следует, что используя во второй схеме теоретически правильную справочную величину  $Z_{i min}$ , искусственно завышают  $Z_{i max}$



на  $2T_i$ . На практике это приводит к повышенному расходу металла без всякой на то технологической необходимости. Поэтому третью (расчетную) схему построим исходя из главного требования, чтобы в ней величина  $Z_{i\max}$  строго соответствовала реальной (практической), второй схеме. Тогда вводимая расчетная величина будет

$$Z_{i\min}^{\text{расч}} = Z_{i\min}^{\text{меоп}} - 2T_i.$$

Проанализируем соответствие третьей схемы теории размерных цепей с учетом расчетной величины  $Z_{i\min}^{\text{расч}}$ :

$$T_Z^{\text{расч}} = Z_{i\max} - Z_{i\min}^{\text{расч}} = T_i + T_{i-1},$$

т.е. третья схема соответствует главному положению размерных цепей и может быть использована в расчетах. Вместе с тем эта схема не в полной мере отражает вторую (реальную) схему. Незначительное отклонение в размерах  $a_{i\min}$  и  $a_{i\max}$ , проставляемых на операционном эскизе обработки может быть полностью скорректировано вычитанием из расчетных размеров допуска  $T_i$ .

Возможен и другой вариант методики расчета. Если ввести в качестве расчетной величины минимального припуска

$$Z_{i\min}^{\text{расч}} = Z_{i\min}^{\text{меоп}} - T_i,$$

то в процессе расчета по методу максимума и минимума можно получить соответствующие второй схеме промежуточные размеры  $a_{i\min}$  и  $a_{i\max}$ , но при этом расчетное значение  $Z_{i\max}$  будет завышено на величину  $T_i$  и для получения экономически обоснованных размеров заготовки его необходимо корректировать.

Описанная методика с учетом корректировок в полном объеме обязательна к применению лишь в крупносерийном и массовом производстве, где может быть получен максимальный эффект в экономии металла. В других типах производства может быть применен его ориентировочный вариант. Величина может приниматься примерно равной  $R_Z + h$  или только  $R_Z$ . Теоретически в размерном анализе величина  $Z_{i\min}^{\text{расч}}$  может быть равна нулю или даже может быть меньше нуля.

Иногда при относительно небольших программах выпуска деталей в расчетах допустимо применять справочные табличные значения минимальных припусков на обработку  $Z_{i\min}$ .

Дальнейший порядок расчета технологических размерных цепей, замыкающими звеньями которых является припуск  $Z$ , таков:

1. После расчета или выбора величины  $Z_{i\min}$  по исходному уравнению

$$Z_{i\min} = \sum S_{i_{y\phi(+)}^{\min}} - \sum S_{i_{y\phi(-)}^{\max}}$$

в зависимости от того, является ли искомый составляющий размер увеличивающим или уменьшающим звеном, соответственно находят его минимальное или максимальное значение ( $S_{i\min}$  или  $S_{i\max}$ ).

2. Устанавливается допуск на этот размер в зависимости от назначения тех-

нологического перехода. Обычно для черновой обработки допуск назначают по 12-14-тому квалитетам, для получистовой обработки по 10-11-тому квалитетам, для чистовой обработки по 8-9-тому квалитетам. Более точно назначить квалитет можно по таблицам экономической точности обработки.

3. Назначают предельные отклонения на искомый размер по  $h$ ,  $H$  или  $I_S$  в зависимости от типа размера (охватываемый, охватывающий или неопределенный).
4. Зная  $S_{i\min}$  или  $S_{i\max}$ , по величине допуска и его расположению находят номинальный размер  $S_i$  и второе предельное значение этого размера.
5. Определяют номинальный размер припуска  $Z_i$  и его второй предельный размер  $Z_{i\max}$ .

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
---------------	---

## Часть 1

### Общие вопросы проектирования технологических процессов в машиностроении

<b>Глава 1. Проектирование процессов изготовления заготовок .....</b>	<b>5</b>
1.1. Поковки, полученные штамповкой .....	6
1.2. Изготовление сварных конструкций .....	15
<b>Глава 2. Проектирование процессов механической обработки.....</b>	<b>17</b>
2.1. Выбор типа и организационной формы производства.....	19
2.2. Анализ технологичности конструкции детали (изделия) .....	19
2.3. Выбор и обоснование заготовки .....	23
2.4. Разработка маршрута обработки отдельных поверхностей (МОП) .....	30
2.5. Выбор технологических баз .....	35
2.6. Выбор методов химико-термической обработки деталей .....	37
2.7. Разработка маршрутной технологии и чертежей наладки .....	38
2.7.1. Разработка маршрута обработки детали (МОД).....	38
2.7.2. Оформление чертежей наладок на механическую обработку и сборку .....	39
2.8. Определение припусков и межоперационных размеров .....	43
2.8.1. Межоперационные и межпереходные припуски при различных методах обеспечения точности обработки .....	43
2.8.1.1. Структура межоперационного (межпереходного) припуска .....	43
2.8.1.2. Общий припуск на обработку элементарной поверхности (минимальный, номинальный, максимальный и нормативный) .....	49
2.8.2. Определение общих нормативных припусков при различных методах изготовления заготовок.....	55
2.8.2.1. Поковки, полученные штамповкой .....	55
2.8.2.2. Поковки, полученные свободной ковкой.....	56
2.8.2.3. Отливки.....	56
2.8.2.4. Прокат.....	63
2.8.3. Расчёт припусков на основе табличного (опытно-статистического) метода .....	65
2.8.4. Расчётно-аналитический метод определения припусков .....	72
2.8.4.1. Структура минимального промежуточного припуска.....	72
2.8.4.2. Структурные формулы для определения минимального промежуточного припуска .....	75
2.8.4.3. Примеры расчёта припуска .....	76

2.9.	Размерный анализ технологического процесса.....	94
2.10.	Расчёт режимов резания и машинного времени обработки .....	96
2.11.	Выбор оборудования, технологической оснастки и средств автоматизации.....	98
2.11.1.	Разработка конструкции станочного приспособления (СП).....	98
2.11.2.	Разработка конструкции контрольного приспособления (КП) .....	101
2.11.3.	Выбор и разработка средств автоматизации.....	105
2.12.	Нормирование и оптимизация технологических процессов .....	106
2.12.1.	Структура технической нормы времени .....	106
2.12.2.	Определение оптимального варианта обработки детали или сборки узла .....	110
<b>Глава 3.</b>	<b>Проектирование операций механической обработки.....</b>	<b>117</b>
3.1.	Проектирование токарно-револьверной операции .....	117
3.2.	Проектирование операции плоского шлифования .....	120
<b>Глава 4.</b>	<b>Технология сборки .....</b>	<b>125</b>
4.1.	Значение сборочных процессов в машиностроении .....	125
4.2.	Организационные формы сборки в машиностроении .....	127
4.3.	Методы сборки в машиностроении.....	130
4.4.	Структура и содержание технологического процесса сборки .....	142
4.5.	Сборка типовых сборочных единиц .....	147
4.5.1.	Сборка неподвижных разъемных соединений .....	147
4.5.2.	Сборка узлов с подшипниками качения.....	158

## Часть 2

### Компьютерное проектирование технологических процессов в машиностроении

<b>Глава 1.</b>	<b>Автоматизация проектирования технологических систем и процессов изготовления деталей машин.....</b>	<b>161</b>
1.1.	Особенности развития технологических процессов в машиностроении .....	161
1.2.	Методологические аспекты автоматизации проектирования .....	164
1.2.1.	Обеспечение технологического проектирования.....	164
1.2.2.	Критерии технологических решений.....	172
1.2.3.	Автоматизация принятия технологических решений .....	179
1.2.4.	Основные задачи и принципы САПР ТП, виды обеспечения .....	193
1.2.5.	Структурный синтез при проектировании ТП .....	202
1.2.6.	Параметрическая оптимизация .....	208
1.2.7.	Автоматизированные подсистемы проектирования ТП .....	214
1.2.8.	Повышение интеллектуальности подсистем проектирования ТП .....	229
1.2.9.	Развитие систем проектирования.....	234

<b>Глава 2. Автоматизация технологической подготовки производства .....</b>	<b>238</b>
2.1. Концептуальные модели автоматизированных систем технологической подготовки производства .....	238
2.2. Проблемы автоматизации технологической подготовки производства .....	244
<b>Глава 3. Проектирование технологических систем и процессов производства деталей машин с использованием нетрадиционного научно-методического обеспечения .....</b>	<b>248</b>
3.1. Методическое обеспечение проектирования производства деталей машин .....	248
3.1.1. Традиционное методическое обеспечение .....	248
3.1.2. Методические указания, повышающие эффективность проектирования .....	250
3.2. Математическое обеспечение проектирования технологических систем и процессов .....	253
3.2.1. Исходная характеристика математического обеспечения .....	253
3.2.2. Недостатки традиционных критериев оптимальности и оценки качества объектов машиностроения .....	254
3.2.3. Многофакторная оценка качества проектных решений без нормирования значимости частных показателей экспертом .....	259
3.3. Информационная база производства .....	265
3.3.1. Традиционные способы информационного обеспечения .....	265
3.3.2. Показатели и параметрические характеристики изделий (средств технологического оснащения) .....	266
3.3.3. Способ информационного обеспечения проектирования технологических систем и процессов, отвечающий целевым требованиям .....	269
<b>Глава 4. Расширение возможностей компьютерного проектирования .....</b>	<b>271</b>
4.1. Теоретические основы технического проектирования .....	271
4.2. Проектирование на основе типовых и групповых технологий .....	275
4.3. Автоматизация проектирования технологической оснастки .....	280
4.4. СALS и компьютерные системы сбора данных .....	282
4.4.1. Встроенные подсистемы САПР технологических операций .....	282
4.4.2. Компьютерная диагностика финишного резбошлифования и управление процессом по критерию точности шага резьбы .....	284
4.4.3. Компьютерная диагностика предварительного резбошлифования по температурному критерию .....	296

4.5.	Анализ компьютерных САПР технологического назначения .....	306
4.6.	Подсистемы САПР технологических операций.....	307
4.6.1.	Классификация подсистем проектирования и управления.....	307
4.6.2.	Резьбошлифование ходовых винтов передач ВГК.....	308
4.6.3.	Плоское шлифование на станках с прямоугольным столом .....	311
<b>Глава 5.</b>	<b>Формализация выбора маршрута обработки и обоснование размерного анализа технологических процессов .....</b>	<b>315</b>
5.1.	Общие положения .....	315
5.2.	Обоснование маршрута обработки ступенчатого вала и выполнения размерного анализа.....	322
5.2.1.	Обоснование маршрута обработки .....	322
5.2.2.	Расчет линейных операционных размеров вала с помощью графов.....	327
5.2.3.	Определение диаметральных операционных размеров вала с помощью графов .....	329
5.3.	Анализ технологического процесса обработки зубчатого колеса.....	331
5.3.1.	Определение маршрута обработки .....	331
5.3.2.	Размерный анализ обработки торцев.....	332
5.3.3.	Определение толщины цементированного слоя на торцах зубчатого колеса.....	334
5.3.4.	Распределение припуска по проходам при зубошлифовании.....	335
5.4.	Технология изготовления корпусной детали и размерный анализ.....	336
5.5.	Определение припуска под расточку отверстия диаметром $40^{+0,07}$ корпусной детали.....	342
5.5.1.	Исходные данные для анализа .....	342
5.5.2.	Определение маршрута обработки корпусной детали .....	343
5.5.3.	Размерный анализ обработки поверхностей детали .....	344
5.6.	Разработка технологического процесса на вилку переключения скоростей и проведение размерного анализа .....	348
5.6.1.	Исходные данные для проектирования .....	348
5.6.2.	Размерный анализ .....	349
5.7.	Разработка технологического процесса на обработку детали вал-шестерня .....	352
5.7.1.	Исходные данные для проектирования .....	352
5.7.2.	Размерный анализ .....	352
5.8.	Влияние базирования на размерные связи технологических процессов.....	368
5.9.	Влияние формы установочных элементов на точность замыкающего звена технологической размерной цепи.....	378

5.9.1. Определение погрешности установки детали по одному цилиндрическому отверстию.....	378
5.9.2. Определение погрешности установки детали по двум цилиндрическим отверстиям .....	380
5.10. Точность замыкающего звена размерной цепи при установке деталей в самоцентрирующие приспособления.....	384
5.10.1. Погрешности, возникающие при установке шатуна на операции сверления отверстий в головках .....	384
5.10.2. Погрешности, возникающие при обработке шатуна на операции фрезерования торцов головок .....	386
5.11. Сборочные размерные цепи .....	387
5.11.1. Размерный анализ при реализации метода полной взаимозаменяемости.....	388
5.11.2. Размерный анализ при реализации метода неполной взаимозаменяемости.....	393
5.11.3. Обеспечение точности сборки по методу групповой взаимозаменяемости.....	395
5.11.4. Обеспечение точности сборки по методу пригонки.....	397
5.11.5. Обеспечение точности сборки по методу регулирования подвижным компенсатором.....	400

### **Часть 3**

## **Примеры проектирования технологических процессов и инструментов на основе теоретических (аналитических) подходов**

<b>Глава 1. Проектирование технологических процессов шлифования кругами из синтетических сверхтвердых материалов.....</b>	<b>403</b>
1.1. Практическое значение проблемы оптимизации режимов шлифования кругами из синтетических сверхтвердых материалов при проектировании технологических процессов.....	403
1.2. Теоретический подход к оптимизации режимов шлифования кругами из СТМ.....	416
1.3. Структура функциональных связей основных параметров высокопроизводительного шлифования.....	424
1.4. Условия оптимизации режимов шлифования кругами из СТМ .....	428
1.5. Анализ результатов оптимизации режимов шлифования кругами из СТМ.....	433
1.6. Области эффективного применения полученных теоретических решений .....	457
1.7. Примеры решения задач по выбору оптимальных условий алмазного шлифования.....	463

1.7.1. Оптимизации параметров алмазного шлифования деталей с высокопрочными покрытиями .....	463
1.7.2. Оптимизация параметров алмазного электроэрозионного шлифования .....	473
1.7.3. Оптимизация параметров энергетически равновесного процесса алмазного шлифования .....	477
1.7.3.1. Расчет параметров энергетически равновесного процесса алмазного шлифования без учета износа зерен круга .....	477
1.7.3.2. Расчет параметров энергетически равновесного процесса алмазного шлифования с учетом износа зерен круга .....	481
1.7.3.3. Методика выбора оптимальных параметров алмазного электроэрозионного шлифования .....	494
1.7.4. Выбор и обоснование высокопроизводительных кинематических схем алмазного шлифования .....	504
<b>Глава 2. Математическая модель проектирования сборных фасонных фрез .....</b>	<b>510</b>
2.1. Графы, как математическая модель проектирования и изготовления сборных фасонных фрез .....	510
2.2. Линейные преобразования координат .....	510
2.3. Граф расчета сборных фасонных фрез .....	511
2.4. Граф конструкции сборных фасонных фрез .....	514
2.5. Граф конструкции корпуса сборных фасонных фрез .....	515
2.6. Дискретное представление поверхностей .....	517
2.7. Образующая (направляющая) поверхности .....	518
2.8. Поверхность детали и заготовки .....	520
2.9. Производящая поверхность фрезы .....	522
2.10. Поверхность, описываемая режущими кромками СМП проектируемых фрез в процессе фрезерования .....	523
2.11. Дискретное представление СМП .....	524
2.12. Расчет первой и второй производных по длине дуги режущих кромок СМП .....	528
2.13. Расчет положения и ориентации СМП относительно производящей линии фрезы .....	528
2.14. Распределение СМП по производящей поверхности фрезы .....	532
2.15. Моделирование движения фрезы в процессе фрезерования .....	535
<b>Список литературы .....</b>	<b>540</b>
<b>Приложения .....</b>	<b>569</b>



**Научное издание**

**Физико-математическая теория процессов обработки  
материалов и технологии машиностроения**

В десяти томах под общей редакцией

**Ф. В. Новикова и А. В. Якимова**

**Том 9**

**Проектирование технологических процессов в  
машиностроении**

**Монография**

Авторы: **Новиков Федор Васильевич**  
**Якимов Александр Васильевич**  
**Новиков Григорий Васильевич**  
**Якимов Алексей Александрович**  
**Ларшин Василий Петрович**  
**Чумный Юрий Иванович**  
**Кривошапка Юрий Николаевич**  
**Емельянов Сергей Георгиевич**  
**Куц Вадим Васильевич**  
**Гуцаленко Юрий Григорьевич**

Ответственный за выпуск **Новиков Ф.В.**

Редактор **Лучнева Т.И.**

Корректор **Мищенко Н.В.**

ISBN 966 – 7810 – 33 – X

ISBN 966 – 7810 – 63 – 1

Подписано к печати 6.04.2005. Формат 60 84/16.

Бумага белая. Печать – ризография. 36,5 усл. печ. л. 30,4 уч.– изд. л.

Тираж 500 экз. Заказ № 1134. Цена договорная.

---

Одесский Национальный политехнический университет  
г. Одесса, проспект Шевченко, 1

---

Издательство Курсор, г. Харьков, пр. Театральный, 11/13

---

Отпечатано в типографии завода «ФЭД»  
г. Харьков, ул. Сумская, 132