

В. Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, В. Н. КРЫЛОВ,  
Ю. К. ЧАРКОВСКИЙ, Е. В. ШИЛКОВ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ  
И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ

*Учебное пособие*

*Издание третье, переработанное*



• САНКТ-ПЕТЕРБУРГ •  
• МОСКВА • КРАСНОДАР •  
• 2016 •

ББК 34.44я73

Б 39

**Безъязычный В. Ф., Крылов В. Н.,  
Чарковский Ю. К., Шилков Е. В.**

**Б 39** Технологические процессы механической и физико-химической обработки в машиностроении: Учебное пособие. — 3-е изд., перераб. — СПб.: Издательство «Лань», 2016. — 432 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

**ISBN 978-5-8114-2118-3**

Изложены методы формообразования деталей, применяемые для этих целей оборудование и инструментальные материалы, в том числе зарубежных фирм, наиболее рациональное их использование в технологических процессах изготовления деталей машин. Большое внимание уделено прогрессивным методам обработки, обеспечивающим требуемые параметры качества изготовления деталей, надежность и ресурс.

С изучения этого курса студенты, будущие специалисты в области технологии машиностроения, знакомятся с технологическими особенностями производства, знание которых позволяет спроектировать технологический процесс изготовления детали, обеспечивающий требуемую точность и качество поверхностного слоя обработанной детали с минимальной себестоимостью.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» и специальности «Проектирование технологических машин и комплексов».

**ББК 34.44я73**

**Рецензенты:**

*М. А. ТАМАРКИН* — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета;

*П. Ю. БОЧКАРЕВ* — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного университета им. Ю. А. Гагарина.

**Обложка**

*Е. А. ВЛАСОВА*

*Охраняется законом РФ об авторском праве.  
Воспроизведение всей книги или любой ее части  
запрещается без письменного разрешения издателя.*

*Любые попытки нарушения закона  
будут преследоваться в судебном порядке.*

© Издательство «Лань», 2016

© Коллектив авторов, 2016

© Издательство «Лань»,  
художественное оформление, 2016

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Предметом изучения «Технологических процессов механической и физико-химической обработки в машиностроении» являются известные в машиностроении методы формообразования деталей, применяемое оборудование и инструментальные материалы, а также наиболее рациональные варианты использования их в технологических процессах изготовления деталей машин. При этом обращается внимание на рациональное применение тех или иных методов обработки, а также используемого оборудования и оснастки для обеспечения требуемого качества изделий. Начиная с изучения этого курса, студенты, будущие специалисты в области технологии изготовления машин, знакомятся с технологическими особенностями производства.

Знание технологических процессов производства деталей машин позволяет технологу спроектировать технологический процесс изготовления детали, обеспечивающий требуемую точность и качество поверхностного слоя обработанной детали с минимальной себестоимостью.

Учебное пособие предназначено для ознакомления студентов, обучающихся по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», с методами обработки различных поверхностей (плоских, наружных и внутренних цилиндрических, фасонных, резьбовых и др.), а также с используемыми для этих целей оборудованием и инструментом. Большое внимание уделено специфическим особенностям применения известных методов обработки, а также прогрессивным методам обработки, обеспечивающим требуемые параметры качества изготовления деталей, надежность и ресурс изделий.

Учебное пособие написано коллективом преподавателей кафедры «Технология авиационных двигателей и общего машиностроения» Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева и работников ОАО «НПО «Сатурн».

## ВВЕДЕНИЕ

К деталям современных машин предъявляются высокие требования с точки зрения точности обработки и качества поверхностного слоя, которые должны быть обеспечены при сравнительно низкой жесткости деталей, а также сложности обработки материалов, из которых изготавливаются эти детали.

Обработка резанием является одним из основных технологических процессов. Вместе с тем, ее нельзя рассматривать как единственный способ обработки. Кроме того, в силу специфических особенностей обрабатываемых деталей и применяемых для их изготовления материалов в ряде случаев обработка резанием или вообще невозможна, или не обеспечивает требуемого качества изделий. В связи с этим, в современном машиностроении широко применяются специальные методы обработки, такие как электрические, электрохимические, ультразвуковые, лучевые, а также комбинированные и совмещенные. В современном машиностроении широко применяются такие методы обработки, как глубинное шлифование, электрохимическое и электроабразивное шлифование, а также упрочняющие методы обработки: виброобработка, алмазное выглаживание, турбоабразивная обработка и др.

Применяемые методы и технологические процессы на их базе неразрывно связаны со средствами их реализации — технологическим оборудованием и технологической оснасткой (режущий инструмент и приспособления). Наряду с оборудованием, применяемым в общем машиностроении, широко используются специализированные и специальные станки для одновременной обработки деталей по нескольким поверхностям, глубинного шлифования, электрохимической и других методов обработки. Широко применяются станки с программным управлением.

Большое внимание уделяется автоматизации технологических процессов и методов обработки, направленных на снижение физических, химических, биологических и других факторов, обеспечивающих создание безопасных условий труда.

## Глава 1

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

### 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ЭЛЕМЕНТЫ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Технология изготовления деталей любых машин и устройств состоит в последовательном использовании различных способов воздействия на обрабатываемую заготовку для придания ей формы и размеров с необходимой точностью. Большинство методов основано на механической обработке резанием, которое выполняется на металлорежущих станках инструментами, имеющими режущие лезвия в виде клина.

Поверхность  $A_\gamma$  режущего инструмента называется передней поверхностью лезвия (рис. 1.1). Эта поверхность в процессе резания контактирует с деформированным слоем, переходящим в стружку. Поверхность  $A_\alpha$  называется главной задней поверхностью лезвия, а поверхность  $A'_\alpha$  — вспомогательной задней поверхностью лезвия. Она обращена к обработанной поверхности.

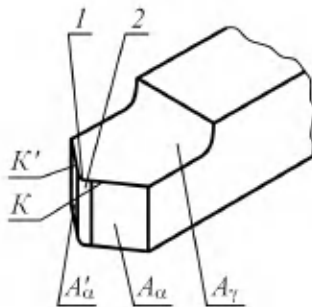


Рис. 1.1

Элементы рабочей части резца

Передняя  $A_\gamma$  и задняя  $A_\alpha$  поверхности лезвия образуют режущий клин, а их пересечение создает режущую кромку (главное лезвие)  $K$ . Пересечение передней и вспомогательной задней поверхности образует вспомогательную режущую кромку  $K'$ . Между главной и вспомогательной кромками располагается переходное лезвие  $1$ , образованное пересечением передней поверхности с переходной задней поверхностью  $2$ .

Процесс формообразования деталей резанием осуществляется путем удаления поверхностных слоев заготовки до полного снятия припуска на обработку. За каждый проход режущего инструмента с поверхностного слоя заготовки срезается ее исходная поверхность и образуется новая.

В процессе срезания припуска при точении на обрабатываемой заготовке различают поверхности и координатные плоскости (рис. 1.2).

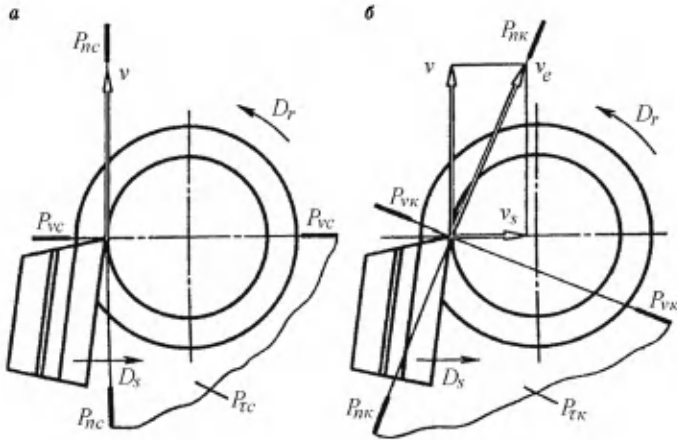


Рис. 1.2

*Системы координат и координатные плоскости при точении:*

$a$  — статическая система координат;  $b$  — кинематическая система координат.  $D_r$  — главное движение резания;  $D_s$  — движение подачи;  $P_{vc}$  и  $P_{vk}$  — основные плоскости статической и кинематической систем координат;  $P_{nc}$  и  $P_{nk}$  — координатные плоскости, касательные к режущей кромке в рассматриваемой точке и перпендикулярные статической и кинематической основным плоскостям соответственно;  $P_{vc}$  и  $P_{vk}$  — координатные плоскости, перпендикулярные линии пересечения статической и кинематической основной плоскости соответственно и плоскости резания;  $v$  — скорость главного движения резания (скорость в направлении главного движения резания);  $v_s$  — скорость движения подачи (скорость в направлении движения подачи);  $v_e$  — скорость результирующего движения резания (скорость в результирующем движении резания).

Поверхность на заготовке, срезаемая за каждый очередной проход инструмента, называется обрабатываемой поверхностью. Поверхность, образовавшаяся на детали после снятия припуска, называется обработанной поверхностью. Поверхность, образуемая режущей кромкой инструмента в результирующем движении резания, называется поверхностью резания. Эта поверхность является промежуточной, временно существующей в процессе резания между обрабатываемой и обработанной поверхностями.

Статические углы режущего лезвия определяются в статической системе координат с началом в рассматриваемой точке режущей кромки, ориентированной относительно направления главного движения резания (движения заготовки или режущего инструмента, происходящее с наибольшей скоростью в процессе резания, рис. 1.2а). Кинематические углы режущего лезвия определяются в кинематической системе координат, представляющей собой прямоугольную систему координат с началом в рассматриваемой точке режущей кромки, ориентированной относительно направления скорости режущего движения резания (рис. 1.2б).

Основной плоскостью  $P_v$  называется координатная плоскость, проведенная через рассматриваемую точку режущей кромки перпендикулярно направлению скорости главного или результирующего движения резания в этой точке. Плоскостью резания  $P_n$  называется координатная плоскость, касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и перпендикулярная основной плоскости.

У режущего инструмента различают главные и вспомогательные углы, которые рассматривают из условия, что ось резца перпендикулярна линии центров станка. Углы резца определяют положение элементов рабочей части резца в пространстве относительно плоскостей и относительно друг друга. Эти углы показаны на рисунке 1.3.

Передним углом  $\gamma$  называется угол в секущей плоскости между передней поверхностью лезвия и основной плоскостью, причем под секущей плоскостью понимается координатная плоскость, перпендикулярная линии пересечения основной плоскости и плоскости резания. Задний угол  $\alpha$  — угол в секущей плоскости между задней поверхностью лезвия и плоскостью резания. Режущие инструменты могут иметь главный и вспомогательный передний угол, а также главный и вспомогательный задний углы.

Главным передним углом  $\gamma_c$  и  $\gamma_k$  называются углы в статической и кинематической системах координат главной секущей плоскости между передней поверхностью



В процессах обработки материалов рассматриваются статические и кинематические углы режущего лезвия, определяющие положение передней и задней поверхностей инструмента относительно взаимно перпендикулярных плоскостей — плоскости резания и основной плоскости. Вспомогательным углом в плане  $\varphi_1$  называется угол в основной плоскости между вспомогательной режущей кромкой  $K'$  и рабочей плоскостью.

Углом заострения  $\beta$  называется угол в секущей плоскости между передней и задней поверхностями лезвия. Углом при вершине резца в плане  $\varepsilon$  называется угол в основной плоскости между главной и вспомогательной режущими кромками.

Угол наклона режущей кромки  $\lambda$  — угол в плоскости резания между режущей кромкой и основной плоскостью.

Радиус вершины  $r_v$  — радиус кривизны вершины лезвия. Радиус округления режущей кромки  $\rho$  — радиус кривизны режущей кромки в сечении ее нормальной секущей плоскостью.

Рабочий процесс резания осуществляется при непрерывном относительном взаимном перемещении обрабатываемой заготовки и лезвий режущего инструмента. При этом различают следующие схемы резания: свободное ортогональное резание (рис. 1.4а), когда в работе участвует только одна прямолинейная режущая кромка, перпендикулярная направлению вектора скорости перемещения инструмента  $D_r$ ; косоугольное резание (рис. 1.4б), когда вектор скорости движения инструмента  $D_r$  не перпендикулярен режущей кромке; несвободное резание, когда в работе одновременно участвуют несколько сопряженных режущих кромок лезвия, имеющих разное направление (рис. 1.4в).

Обрабатываемые заготовки и режущие инструменты приводятся во взаимосогласованное движение механизмами металлорежущих станков. Эти движения могут быть сообщены одновременно, в последовательном порядке, чередуя движения каждого из них, а также только одному из них — инструменту или заготовке.

По характеру движений инструмента и детали кинематические схемы резания разделяются на несколько групп в зависимости от сочетаний вращательных и поступательных движений: I — одно поступательное движение; II — два поступательных движения; III — одно вращательное движение; IV — одно вращательное и одно поступательное движения; V — два вращательных движения; VI — два поступательных и одно вращательное движения; VII — два

вращательных и одно прямолинейное движения; VIII — три вращательных движения. Наибольшее распространение получили кинематические схемы с одним поступательным движением (протягивание) и с одним поступательным и одним вращательным движениями (точение, сверление и др.).

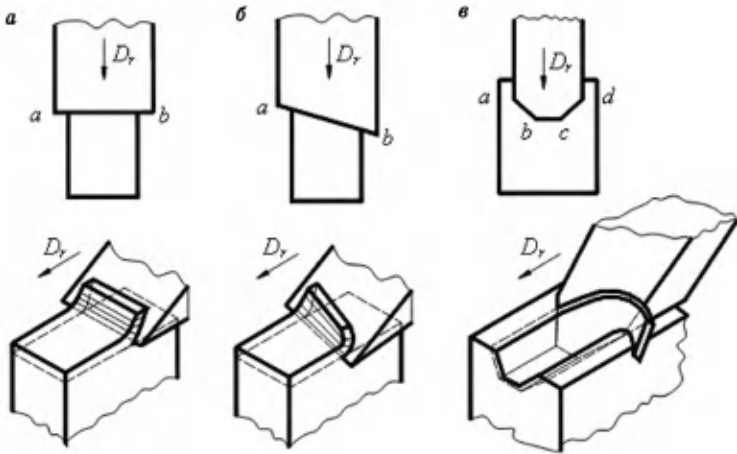


Рис. 1.4  
Основные схемы резания:

*a* — свободное; *б* — косоугольное; *в* — несвободное.

В процессе резания поступательное или вращательное движение одного из исполнительных органов станка сообщают заготовке или режущему инструменту главное движение резания, происходящее с наибольшей скоростью по сравнению с движениями других органов. Вращательные и поступательные движения остальных органов, независимо от того, приложены они к заготовке или инструменту, являются движениями подачи. Движение подачи необходимо для обеспечения при осуществлении главного рабочего движения врезания лезвий инструмента в материал заготовки и отделения срезаемого слоя в виде стружки со всей обрабатываемой поверхности. Главное движение и движения подачи осуществляются в большинстве случаев во взаимно перпендикулярных плоскостях, но в отдельных случаях могут происходить в одной плоскости.

Главное движение определяет направление и скорость деформаций в материале срезаемого слоя, а также направление схода стружки и ее форму. Скорость главного

движения является скоростью резания  $v$ , которая при вращательном движении определяется по формуле:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ м/мин,}$$

где  $D$  — диаметр обрабатываемой поверхности заготовки или рабочей поверхности инструмента, мм;  $n$  — частота вращения заготовки инструмента, об/мин ( $\text{мин}^{-1}$ ).

Подачей  $S$  называется величина перемещения режущей кромки инструмента относительно заготовки в направлении движения подачи (мм/мин; мм/с; мм/об).

Величина проникновения лезвия инструмента в материал заготовки во время каждого прохода называется глубиной резания  $t$  и выражается в мм. При точении, растачивании, рассверливании и развертывании отверстий глубина резания  $t = (D - d)/2$ . При наружной обработке  $D$  — диаметр обрабатываемой поверхности и  $d$  — диаметр обработанной поверхности. При внутренней обработке  $D$  — диаметр обработанной поверхности и  $d$  — диаметр обрабатываемой поверхности.

В процессе резания форма и размеры сечения срезаемого слоя зависят от принципиальной кинематической схемы резания, на основе которой осуществляется движение резания и определяется расположение режущих элементов инструмента.

При продольном точении резцом размеры поперечного сечения срезаемого слоя измеряются в плоскости, проходящей через ось вращения обрабатываемой заготовки. Перемещение режущей кромки резца на расстояние, равное подаче (заштрихованный участок  $ABCD$  (рис. 1.5а)), представляет собой площадь срезаемого слоя  $f = a \cdot b = S \cdot t$ , где  $a$  и  $b$  — соответственно толщина и ширина срезаемого слоя, мм. Толщина срезаемого слоя  $a$  — длина нормали к поверхности резания, проведенной через рассматриваемую точку режущей кромки, ограниченная сечением срезаемого слоя. Ширина срезаемого слоя  $b$  — длина стороны сечения срезаемого слоя, образованной поверхностью резания.

Параметры  $S$  и  $t$  называются технологическими (производственными), посредством которых удобно рассчитывать и назначать режимы резания. Параметры  $a$  и  $b$  называются физическими, так как они непосредственно влияют на физические показатели процесса резания (температуру, силы резания и др.).

Приведенная на рисунке 1.5а площадь срезаемого слоя  $f_{ABCD}$  представляет собой площадь номинального или

расчетного сечения. Действительное сечение срезаемого слоя  $f_{BCDE}$  меньше номинального сечения на величину, равную площади осевого сечения гребешков, остающихся на обработанной поверхности  $f_{ABE}$ . Разность между действительным и номинальным сечениями заметна лишь при больших подачах ( $S > 2$  мм/об), поэтому в практических условиях площадь определяют по формуле  $f = t \cdot S$ . С уменьшением глубины резания  $t$ , подачи  $S$ , углов в плане  $\varphi$  и  $\varphi_1$ , а также радиуса при вершине резца в плане высота остаточных гребешков уменьшается.

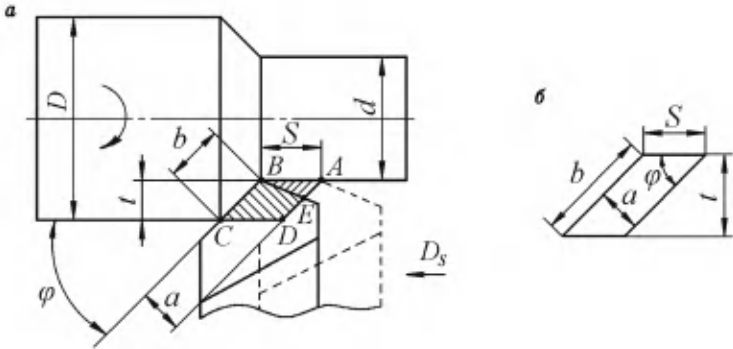


Рис. 1.5

Схема резания при продольном точении:

$a$  — элементы резания;  $b$  — площадь поперечного сечения срезаемого слоя.

Площадь поперечного сечения срезаемого слоя, имеющего форму, близкую к параллелограмму (рис. 1.5б), является функцией подачи  $S$  (основание параллелограмма сечения) и глубины резания  $t$  (высота параллелограмма сечения).

Взаимосвязь между толщиной  $a$  и шириной  $b$  срезаемого слоя может быть представлена выражениями:  $a = S \cdot \sin\varphi$ ,  $b = t/\sin\varphi$ .

## 1.2. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Режущие инструменты работают в условиях больших силовых нагрузок, высоких температур и трения, в связи с чем эффективность работы инструментов зависит от особых физико-механических свойств инструментальных материалов и определенных требований, связанных с условиями протекания процесса резания, технологическими

особенностями вида обработки, свойствами и состоянием обрабатываемого материала.

К инструментальным материалам, применяемым для изготовления режущей части инструментов, предъявляются следующие требования: высокие механические характеристики (твердость, прочность, ударная вязкость, высокая износостойкость); химическая инертность к обрабатываемым материалам; высокая теплостойкость (сохранение твердости, а следовательно, и режущих свойств при высоких температурах); высокая теплопроводность, обеспечивающая улучшение отвода тепла из зоны резания, что снижает температуру резания, повышает износостойкость инструмента и уменьшает опасность появления прижогов и трещин при заточке; технологичность (обрабатываемость резанием, свариваемость, шлифуемость, отсутствие склонности к образованию трещин при напайке и т. п.).

Применяемые в настоящее время инструментальные материалы подразделяют на следующие основные группы: инструментальные стали; твердые сплавы; минералокерамика; сверхтвердые материалы.

### 1.2.1. Инструментальные стали

В зависимости от химического состава и степени легирования инструментальные стали разделяются на инструментальные углеродистые, инструментальные легированные и быстрорежущие стали. Физико-механические свойства этих сталей при нормальной температуре достаточно близки, различаются они только теплостойкостью и прокаливаемостью при закалке.

**Углеродистые инструментальные стали** содержат 0,9–1,3% углерода. Наибольшее применение имеют стали У10А и У12А. Буква А обозначает, что сталь высококачественной плавки. Углеродистые стали имеют низкую теплостойкость (200–230°C). После термообработки эти стали имеют твердость 61–63 HRC. Углеродистые стали имеют ограниченное применение, так как допустимые скорости резания не превышают 15–18 м/мин при твердости обрабатываемого материала до 30 HRC. Эти стали применяют для метчиков, плашек, разверток, резцов и др.

**Легированные инструментальные стали** содержат примерно такое же количество углерода, как и углеродистые, но дополнительно легированы вольфрамом (В), хромом (Х), ванадием (Ф) и другими элементами. Например, введение вольфрама способствует повышению теплостойкости и износостойкости, хром обеспечивает прокаливаемость, ванадий

создает более твердые и стойкие карбиды и получение мелкозернистой структуры. После термической обработки твердость легированной стали составляет 62–65 HRC, а теплоустойчивость — 250–350°C. Допустимые скорости резания 15–25 м/мин. Наибольшее распространение получили легированные стали ХВГ, 9ХС, Х6ВФ и др. Легированные стали применяются для изготовления сверл, протяжек, метчиков, разверток и др.

**Быстрорежущие стали.** Эти стали имеют более высокую теплоустойчивость и износостойкость по сравнению с углеродистыми и легированными сталями. Основным и важным легирующим элементом, входящим в состав быстрорежущих сталей, является вольфрам (6–18%). Кроме вольфрама быстрорежущие стали содержат хром, молибден, ванадий, кобальт.

Высокие режущие свойства быстрорежущих сталей во многом определяются параметрами и особенностями термообработки (закалка при температурах 1240–1280°C, трехкратный отпуск с температурой 550–560°C). При термообработке обеспечивается твердость 62–69 HRC, теплоустойчивость 620–730°C, изгибная прочность 2,5–4 ГПа.

Быстрорежущие стали обозначают буквой Р, следующая за ней цифра указывает среднее содержание вольфрама в процентах. Стали, содержащие ванадий, молибден, кобальт, имеют в маркировке буквы Ф, М, К и цифры, показывающие их среднее содержание в процентах. Например, сталь Р18К5Ф2 содержит вольфрама до 18%, кобальта до 5% и ванадия до 2%. Быстрорежущие стали по теплоустойчивости подразделяются на стали умеренной, повышенной и высокой теплоустойчивости.

К сталям умеренной теплоустойчивости (620–630 °С) относятся вольфрамовые стали Р18, Р12, Р9, вольфрамомолибденовые стали Р6М5, Р8М3 и др. Стали умеренной теплоустойчивости применяются в основном для обработки конструктивных материалов с  $\sigma_{\text{в}} \leq 900\text{--}1000$  МПа.

Стали повышенной теплоустойчивости (630–650°C) дополнительно легируются кобальтом и ванадием. К наиболее распространенным маркам сталей повышенной теплоустойчивости относятся: Р9К10, Р9М4К8, Р6М5К5, Р10К5Ф5, Р18Ф2К8М и др. Стали повышенной теплоустойчивости предназначены для обработки труднообрабатываемых материалов: жаропрочных и титановых сплавов, нержавеющей и конструктивных сталей с  $\sigma_{\text{в}} \geq 1000$  МПа.

Стали высокой теплоустойчивости имеют пониженное содержание углерода (0,05–0,15%). Теплоустойчивость их

составляет 700–730°C, а твердость 68–69 HRC. Основными легирующими элементами в них являются: вольфрам (11–20%), кобальт (16–25%) и молибден (4–7%). Эти стали упрочняются вследствие выделения интерметаллидов. К таким сталям относятся В14М7К25, В18М7К25 и др., которые целесообразно применять при резании труднообрабатываемых материалов, например, титановых сплавов, нержавеющей и жаропрочных сталей.

С целью сокращения дефицитного вольфрама разработаны быстрорежущие стали с малым содержанием вольфрама и безвольфрамовые. Такие стали имеют теплостойкость 620°C, твердость 62–64 HRC и предназначены для обработки отожженных углеродистых и легированных конструкционных сталей и сплавов на алюминиевой и медной основе.

### 1.2.2. Твердые сплавы

Твердые сплавы изготавливаются методом порошковой металлургии. Основными компонентами твердых сплавов являются карбиды вольфрама WC, титана TiC, и тантала TaC. В качестве связки в твердых сплавах используются кобальт, никель, молибден.

При изготовлении твердых сплавов порошки смешивают, прессуют и спекают при температуре 1500–2000°C. При спекании твердые сплавы приобретают высокую твердость 86–90 HRA. Теплостойкость твердых сплавов составляет 800–1000°C.

В зависимости от состава карбидной фазы твердые сплавы разделяют на следующие виды:

1) вольфрамовые (однокарбидные), содержащие карбиды вольфрама. К этой группе относятся ВК3, ВК4, ВК6, ВК8, и др;

2) титановольфрамовые (двухкарбидные), содержащие карбиды вольфрама и титана. К двухкарбидным твердым сплавам относятся Т5К10, Т14К8, Т15К6 и др.;

3) трехкарбидные-титанотанталовольфрамовые, состоящие из карбида титана, карбида тантала и карбида вольфрама, например, ТТ7К12, ТТ7К15, ТТ8К6, ТТ20К9 и др.

Условные обозначения твердых сплавов следующие (например): сплав ВК4 (однокарбидный) содержит 4% кобальта, остальное карбид вольфрама; сплав Т5К10 (двухкарбидный) содержит 10% кобальта, 5% карбида титана, 85% карбида вольфрама; сплав ТТ7К12 (трехкарбидный) содержит 12% кобальта, 7% карбидов титана и тантала, 81% карбида вольфрама.

Для сокращения дефицитного вольфрама разработаны безвольфрамовые твердые сплавы, которые имеют высокую окалиностойкость, низкий коэффициент трения, пониженную склонность к адгезионному взаимодействию с обрабатываемым материалом. Вместе с тем эти сплавы имеют меньшую прочность, склонны к разупрочнению при повышенных температурах и имеют низкую теплопроводность. К этой группе относятся сплавы КНТ-16, ТН20 и др. Безвольфрамовые твердые сплавы целесообразно применять при полустойковой и чистой обработке конструкционных, малолегированных сталей, чугунов и некоторых цветных металлов.

При выборе твердосплавных инструментов необходимо учитывать, чтобы инструментальный и обрабатываемый материал не имели химического родства. Например, при обработке жаропрочных и титановых сплавов необходимо применять инструменты, оснащенные однокарбидными твердыми сплавами группы ВК.

### 1.2.3. Минералокерамика

Минералокерамические инструментальные материалы имеют высокую твердость (92–94 HRA), теплостойкость (до 1200°C) и износостойкость. Основой минералокерамики является глинозем  $Al_2O_3$ . Оксидная керамика содержит до 99% глинозема.

При обработке резанием распространение получила керамика ЦМ332, которую получают из тонкоизмельченного электрокорунда (размер зерен 1–2 мкм). К недостатку минералокерамики следует отнести низкую изгибную прочность (295–370 МПа).

Для повышения механической прочности в оксидную керамику добавляют тугоплавкие соединения (карбиды вольфрама, титана, молибдена, хрома и др.). Оксидно-карбидная керамика имеет предел прочности при изгибе 400–700 МПа. К такой керамике относятся марки ВЗ, ВОК-60, ВОК-63.

В последнее время находит применение оксидно-нитридная керамика, например марки «Картинит», состоящая из  $Al_2O_3$  и TiN, и керамика на основе нитрида кремния марки «Силинит-Р». Твердость «Силинита-Р» составляет 94–96 HRA.

Минералокерамика в основном применяется для полустойковой и чистой обработки закаленных сталей (30–50 HRC), высокопрочных чугунов, цветных металлов. Керамика марки «Картинит» применяется для обработки жаростойких никелевых сплавов.

#### 1.2.4. Сверхтвердые материалы

К этой группе инструментальных материалов относятся природные алмазы и сверхтвердые материалы (СТМ).

Природный алмаз имеет твердость до 100 ГПа, высокую износостойкость и теплопроводность, малый коэффициент трения и малую адгезионную способность к металлам, за исключением железа и его сплавов с углеродом.

Синтетические алмазы изготавливают (синтезируют) из графита при высоких давлениях (~1000 ГПа) и температурах (~2500°C). Синтетические алмазы выпускают следующих марок: АСБ-баллас (АСБ-5, АСБ-6); АСПК-карбонадо (АСПК-1, АСПК-2, АСПК-3). Баллас применяют для режущей части резцов, фрез, сверл, а также для изготовления шлифовальных кругов. Алмазные вставки для лезвийного инструмента, изготовленные из синтетических алмазов АСБ и АСПК, имеют высокую динамическую прочность и применяются при обработке особо прочных сплавов.

При обработке конструкционных материалов широко применяется синтетический сверхтвердый материал на основе кубического нитрида бора (КНБ), состоящий из 44% бора и 56% азота. КНБ получают из гексагонального нитрида бора в результате синтеза, протекающего при высоких давлениях (6000–9000 МПа) и температурах 1360–2000°C. По твердости КНБ близок к твердости алмаза, а по теплоустойкости (1500°C) значительно превосходит все инструментальные материалы. КНБ практически инертен к железу и углеродистым сплавам.

Для изготовления лезвийных инструментов используются поликристаллы КНБ и композиционные материалы, созданные на его основе. К ним относятся эльбор, гексанит, белбор и др. Лезвийные инструменты на базе КНБ применяются для обработки сталей и чугунов различной твердости. При этом с увеличением твердости обрабатываемого материала, а также скорости резания значительно проявляются преимущества инструментов из композита по сравнению с инструментом из твердого сплава и минералокерамики. Лезвийные инструменты из композита позволяют во многих случаях заменить операции внутреннего и наружного шлифования с обеспечением 5-го, 6-го классов точности и шероховатости поверхности  $Ra = 0,16-0,08$  мкм.

### 1.3. ПРОЦЕСС СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ

Резание материалов является сложным физическим процессом, при котором возникают упругие и пластические деформации, сопровождающиеся трением, тепловыделением, усадкой стружки, наростообразованием, наклепом обработанной поверхности и износом инструмента. Первые исследования закономерностей деформирования материала в процессе стружкообразования были проведены профессором Санкт-Петербургского политехнического института (ныне Санкт-Петербургский государственный технический университет) И. А. Тиме в 1893 г. Он предложил элементную схему стружкообразования, основанную на визуальном наблюдении за процессом резания.

Знание физической сущности процесса резания и явлений, которыми он сопровождается, имеет большое практическое значение, так как дает возможность осуществлять резание с наибольшей производительностью и качеством обработанной поверхности.

Слой металла, подлежащий снятию в процессе срезания, подвергается деформациям. При обработке пластичных материалов, например стали, снимаемый слой испытывает вначале упругую деформацию, которая быстро переходит в пластическую. Доля упругой деформации возрастает при увеличении предела прочности обрабатываемого материала.

При обработке хрупких материалов, например чугуна, срезание может произойти практически без пластической деформации в результате упругой деформации и отрыва.

При пластической деформации происходит скольжение по кристалло-графическим плоскостям (плоскостям скольжения) одних частей кристаллов относительно других в определенных направлениях. Такая деформация называется внутрикристаллической в отличие от межкристаллической, при которой происходит смещение одних кристаллов относительно других. Процессы деформации вызывают изменение формы, размера кристаллов и междоатомных расстояний, а также нарушение равновесия атомных сил, что приводит к напряженному состоянию материала и изменению его свойств. Повышается твердость и уменьшается вязкость материала, и он становится более хрупким. Такое явление называется *наклепом*.

На сопротивление обрабатываемого материала деформированию влияет скорость деформации (величина относительной деформации в единицу времени), которая не равна

скорости резания, но пропорциональна ей. С возрастанием скорости деформации увеличивается температура деформируемого материала (при увеличении скорости резания), что приводит к увеличению пластичности последнего и снижению его механических свойств.

Образование стружки возможно в том случае, когда на режущий инструмент действует сила, способная создать в срезаемом слое напряжения, превышающие прочность обрабатываемого материала. Форма и строение стружки, степень ее деформации и твердость свидетельствуют о напряжениях, которые претерпел срезаемый слой. От стружкообразования зависит величина работы, затрачиваемой на резание, износ режущего инструмента и качество обработанной поверхности.

В начальный момент движущийся резец под действием силы входит в контакт с материалом (рис. 1.6а, положение 1). В металле возникают упругие деформации. При дальнейшем движении режущий элемент реза вдавливается в металл, вызывая его пластическое деформирование (положение 2). При продолжении движения реза объем пластически деформированного материала увеличивается и внутренние напряжения достигают значений, превышающих временное сопротивление материала разрушению. При этом весь пластически деформированный материал под действием сил сдвигается резцом под углом  $\beta_1$  в виде сформированного элемента стружки (положение 3). После этого процесс деформирования повторяется, и образуются новые элементы стружки (положение 4).

Объем материала, подвергающегося пластическому деформированию, ограничен с одной стороны передней поверхностью лезвия инструмента, а с другой стороны плоскостью  $O-O$ , по которой периодически сдвигаются или скалываются сформировавшиеся элементы стружки. Плоскость  $O-O$  называется плоскостью сдвига. Угол  $\beta_1$ , определяющий положение плоскости сдвига относительно направления движения инструмента  $D_r$ , называют углом сдвига (углом скалывания).

В срезаемом прирезцевом слое материала заготовки возникает сложное упругонапряженное состояние (рис. 1.6б). В плоскости, перпендикулярной траектории движения реза, создаются нормальные напряжения  $\sigma_u$ , а в плоскости, совпадающей с направлением движения реза, — касательные напряжения  $\tau_x$ . Сдвиговые деформации происходят в зоне стружкообразования  $ABC$ . Деформация начинается в плоскости  $AB$  и заканчивается в плоскости

АС, в которой завершается разрушение кристаллов, т. е. скалывается элементарный объем металла и образуется стружка.

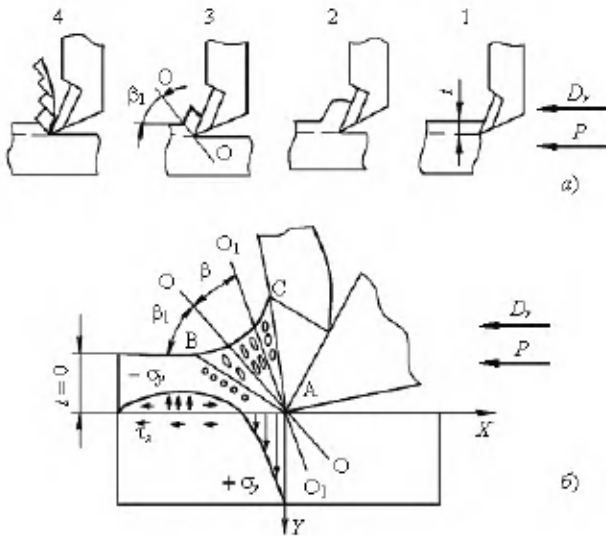


Рис. 1.6

Последовательность образования элементов стружки (а) и схема напряженного состояния материала при обработке резанием (б)

Срезаемый и превращаемый в стружку слой материала дополнительно деформируется вследствие трения стружки о переднюю поверхность инструмента. Структура материала зоны  $ABC$  и стружки отличаются от структуры основного металла. В зоне  $ABC$  располагаются деформированные и разрушенные кристаллы, сильно измельченные и вытянутые в направлении, совпадающем с направлением  $O_1O_1$ . При обработке заготовок из хрупких материалов значение угла  $\beta$  близко к нулю, а при резании пластичных материалов может составлять до  $30^\circ$ .

При резании материалов срезаемые стружки имеют различный вид и форму в зависимости от химического состава, структурного состояния и механических свойств обрабатываемого материала, толщины срезаемого слоя, значения переднего угла инструмента, скорости резания и других факторов. Различают следующие основные типы стружек: сливная, скалывания и надлома (рис. 1.7).

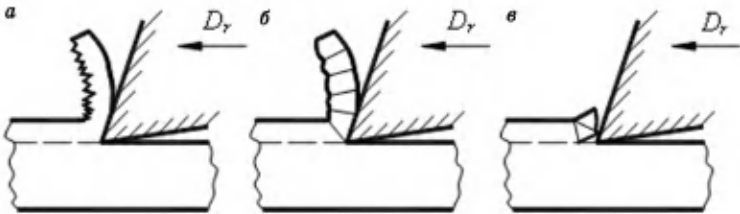


Рис. 1.7

Типы стружек при резании:

*a* — сливная; *b* — скалывания; *v* — надлома.

**Сливная стружка** (рис. 1.7*a*) образуется при обработке деталей из пластичных материалов с большой скоростью резания и незначительной толщиной среза. Она имеет сплошную ленту с гладкой прирезцевой стороной. Внешняя сторона имеет пилообразную форму.

**Стружка скалывания** (рис. 1.7*b*) образуется при обработке пластичных материалов (стали, бронзы и др.) с небольшой скоростью резания. Эта стружка состоит из отдельно деформируемых элементов правильной формы. Со стороны, обращенной к передней поверхности резца, стружка имеет гладкую поверхность, а на внешней стороне — зазубрины.

**Стружка надлома** образуется при обработке хрупких материалов (чугун, твердая бронза и др.) (рис. 1.7*v*). Она состоит из отдельных, не связанных между собой элементов. Срезаемый слой пластически почти не деформируется.

Степень пластической деформации металла в процессе стружкообразования оценивается усадкой стружки, определяемой сопоставлением продольных и поперечных размеров срезаемого слоя и стружки, образовавшейся после срезания этого слоя. Схема для определения усадки стружки приведена на рисунке 1.8.

При пластической деформации длина стружки  $l_1$  получается меньше длины пути  $l$ , который проходит резец по обработанной поверхности, а толщина стружки  $a_1$  больше толщины среза  $a$ . Коэффициент продольной усадки стружки равен коэффициенту усадки по толщине

$$K_l = l/l_1 = a_1/a.$$

В зависимости от условий резания  $K_l = 1-8$ . Для заготовок из хрупких материалов  $K_l$  близко к 1, а для пластичных материалов  $K_l = 5-8$ .

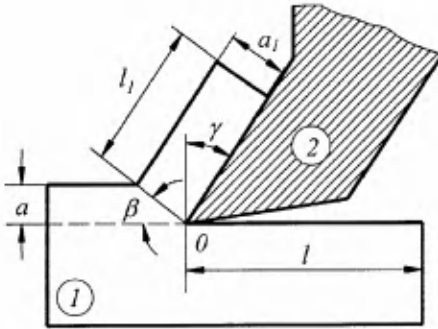


Рис. 1.8

Схема для определения усадки стружки при резании:

1 — обрабатываемая заготовка; 2 — резец.

Обработка титановых сплавов сопровождается сложными физико-механическими и химическими процессами. При резании этих сплавов может получаться отрицательная усадка стружки, когда длина стружки больше пути резания. Например, при точении титанового сплава марки ВТ1-2 коэффициент продольной усадки стружки имеет максимальное значение  $K_l = 1,6$  при скорости резания  $v = 5$  м/мин. При  $v = 30-50$  м/мин  $K_l = 1$ , соответственно при  $v = 100$  м/мин  $K_l = 0,8$ . Это можно объяснить низкой теплопроводностью и малой пластичностью обрабатываемого материала, поглощением кислорода и азота воздуха. При высокой температуре титан становится более хрупким и менее податливым к пластическому деформированию.

## 1.4. СИЛЫ РЕЗАНИЯ

В процессе резания на лезвие инструмента действуют силы сопротивления перемещению его по траектории рабочего движения. Деформирование и срезание с заготовки слоя материала происходит под действием внешней силы  $P$ , приложенной со стороны инструмента к обрабатываемой заготовке. Направление вектора силы совпадает с вектором скорости резания  $v$ . Работа, затрачиваемая на деформирование и разрушение материала заготовки, расходуется на упругую и пластическую деформации материала, его разрушение и на преодоление сил трения задних поверхностей инструмента о заготовку и стружки о переднюю поверхность инструмента.

На рисунке 1.9 показана схема сил, действующих на резец.

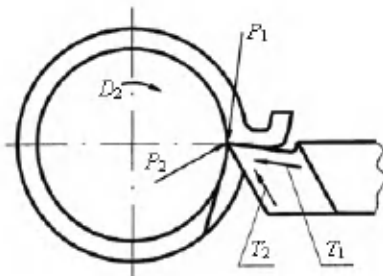


Рис. 1.9

Схема сил, действующих на резец

Сила упругого и пластического деформирования  $P_1$  действует перпендикулярно передней поверхности инструмента. Сила  $P_2$  действует перпендикулярно главной задней поверхности. На передней и задней поверхностях инструмента действуют силы трения

$$T_1 = P_1 \cdot \mu_1, \quad T_2 = P_2 \cdot \mu_2,$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  — коэффициенты трения стружки о переднюю грань режущего клина и задней его грани о заготовку.

Сложением сил, действующих в процессе резания, можно получить равнодействующую силу  $P$ . Для практического применения рассматриваются составляющие силы резания. Сила резания  $P$  раскладывается на три составляющие  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ , действующие вдоль осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (рис. 1.10).

**Вертикальная** (касательная к обрабатываемой поверхности) составляющая силы резания  $P_z$  действует в плоскости резания в направлении главного движения (по оси  $Z$ ). По силе  $P_z$  определяют крутящий момент на шпинделе станка, эффективную мощность резания, деформацию изгиба заготовки в плоскости  $XOZ$ , а также рассчитывают прочность резца.

**Радиальная** составляющая силы резания  $P_y$  действует в плоскости  $XOY$  перпендикулярно оси заготовки. По ней определяют величину упругого отжатия резца от заготовки и величину деформации изгиба заготовки в плоскости  $XOY$ . По этой силе рассчитывается на прочность механизм поперечной подачи станка.

**Осевая** составляющая силы резания  $P_x$  действует в плоскости  $XOY$  вдоль оси заготовки. По силе  $P_x$  рассчитывают

механизм продольной подачи и изгибающий момент, действующий на стержень резца.

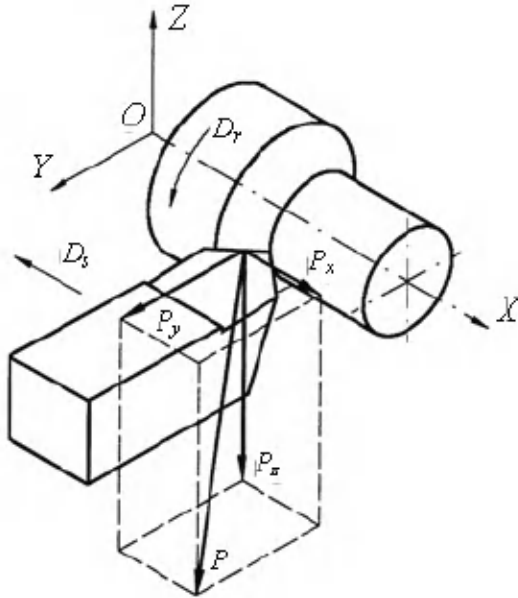


Рис. 1.10

*Разложение силы резания на составляющие*

**Равнодействующая** сила резания определяется как сумма векторов трех составляющих:

$$P = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2}.$$

Соотношение между величинами  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$  зависит от геометрических параметров лезвия инструмента, элементов режима резания — скорости  $v$ , подачи  $S$ , глубины  $t$ , физико-механических свойств обрабатываемого материала, условий обработки, износа инструмента. Ориентировочно соотношение равно

$$P_z : P_y : P_x = 1 : (0,5-0,3) : (0,4-0,5).$$

Величины сил  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$  могут быть определены теоретически, экспериментально или по нормативам режимов резания с использованием эмпирических формул. Например, сила  $P_z$  определяется выражением

$$P_z = C_{P_z} \cdot t^{X_{P_z}} \cdot S^{Y_{P_z}} \cdot V^{n_{P_z}} \cdot K_{MP_z},$$

где  $C_{Pz}$  — коэффициент, учитывающий физико-механические свойства материала заготовки;  $K_{MPz}$  — коэффициент, учитывающий факторы, не вошедшие в формулу (материал режущей части резца, углы резца и др.);  $X_{Pz}$ ,  $Y_{Pz}$ ,  $n_{Pz}$  — показатели степени при глубине  $t$ , подаче  $S$  и скорости резания  $v$ . Значения коэффициентов  $C_{Pz}$ ,  $K_{MPz}$  и показатели степеней  $(x, y, n)_{Pz}$  приводятся в справочной литературе с учетом конкретных условий обработки.

Расчетное определение силы резания может выполняться также на основе теоретических формул. Так профессором С. С. Силиным получена следующая формула для определения тангенциальной составляющей силы резания:

$$P_z = \frac{\tau_{p\pm} a_1 b_1 C_0 E^{n_0} (1 - 0,45 \sin \gamma) M^{0,04}}{\sin^{0,14} \alpha}, \text{ Н,}$$

где  $\tau_p$  — сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Па;  $a_1$  и  $b_1$  — толщина и ширина среза, м;  $C_0$  и  $n_0$  — безразмерные величины, зависящие от предела прочности обрабатываемого материала;  $E = \rho_1/a_1$  — безразмерный комплекс, характеризующий влияние на процесс резания геометрической формы режущей кромки резца;  $\rho_1$  — радиус округления режущей кромки резца, м;  $\alpha$  и  $\gamma$  — задний и передний углы резца;  $M = b/b_1$  — отношение суммарной длины режущих кромок к ширине среза.

Эффективная мощность  $N_e$ , расходуемая на процесс деформирования и срезания с заготовки слоя материала, например, при точении на токарном станке, может быть определена из выражения

$$N_e = \frac{P_z \cdot v}{60} + \frac{P_x \cdot n \cdot S_{\text{пр}}}{60 \cdot 1000}, \text{ кВт,}$$

где  $v$  — скорость резания, м/мин;  $n$  — частота вращения заготовки,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $S_{\text{пр}}$  — продольная подача инструмента, мм/об.

На практике эффективную мощность резания обычно рассчитывают только по силе  $P_z$ :

$$N_e = \frac{P_z \cdot v}{60}, \text{ кВт.}$$

Необходимая мощность электродвигателя станка  $N_{\text{Э}}$ , кВт, с учетом коэффициента полезного действия станка  $\eta$ :

$$N_{\text{Э}} = N_e / \eta,$$

где  $\eta = 0,75-0,80$ .

Для измерения составляющих сил резания и изучения влияния на них различных факторов применяют разнообразные конструкции динамометров.

### **1.5. НАРОСТ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ. ВЛИЯНИЕ НАРОСТА НА ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ**

При некоторых условиях резания под влиянием высоких давлений и температур частицы обрабатываемого материала задерживаются на передней поверхности лезвия инструмента, прочно сцепляются с ней, образуя слоистое металлическое образование, называемое наростом.

**Механизм образования нароста** можно объяснить следующим образом. Вследствие большого давления со стороны стружки на инструмент и высокой температуры пластически деформированного материала, а также микронеровностей передней поверхности инструмента происходит торможение нижнего слоя стружки, в результате чего образуется тонкий заторможенный слой и течение материала в стружку происходит с преодолением внутреннего трения. Схема образования нароста при резании приведена на рисунке 1.11.

При определенных условиях заторможенный слой начинает расти, образуя новое тело, прочно присоединяемое к передней поверхности инструмента. Нарост имеет форму клина с углом резания  $\delta_1$  меньшим, чем у резца  $\delta$ . Вследствие сильной деформации он приобретает очень большую твердость, в 2,5–3,5 раза превосходящую исходную твердость обрабатываемого материала, а поэтому может осуществлять резание. Нарост обладает особыми свойствами. Он имеет неоднородную структуру, существенно отличающуюся от структуры обрабатываемого материала и режущего инструмента. Тонкие слои нароста состоят из сильно деформированных раздробленных зерен материала с плохо выраженной текстурой. Высокая контактная температура приводит к рекристаллизации материала нароста и снижению его прочности, в результате чего он теряет свою режущую способность, контактные силы адгезии уменьшаются. Нарост раздавливается и уносится стружкой, но может вдавливаться в обработанную поверхность.

Наростообразование зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, режима резания, геометрических параметров инструментов, состава применяемых СОТС и других факторов. Наиболее интенсивно нарост образуется при резании пластичных материалов с образованием сливной стружки при использовании инструментов,

изготовленных из углеродистых и быстрорежущих сталей. Наросты могут образовываться и при резании твердосплавными, минералокерамическими и алмазными инструментами, в том числе и при обработке титановых и жаропрочных сплавов.

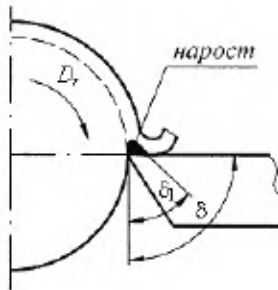


Рис. 1.11

Схема образования нароста при резании

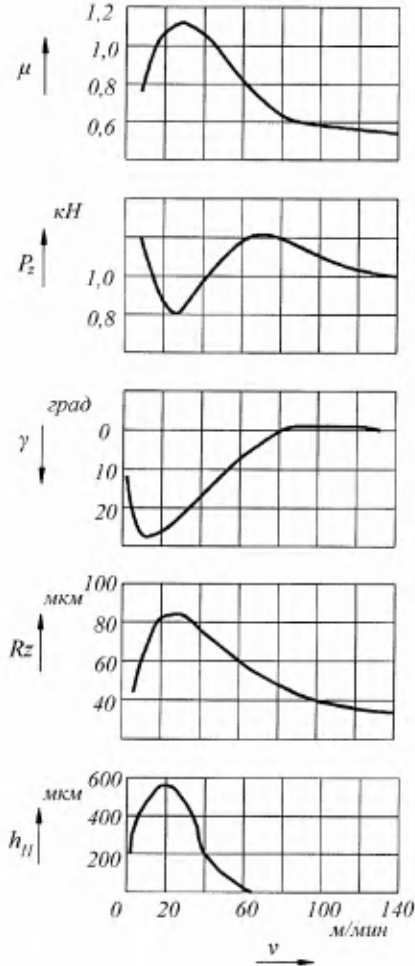
На высоту нароста и частоту его срывов оказывает большое влияние скорость резания. При определенных условиях обработки стали максимальная высота нароста  $h_N$  образуется при скорости резания  $v = 20-30$  м/мин. При малых скоростях резания ( $v = 5-8$  м/мин) и при больших (свыше  $60-80$  м/мин) нарост не образуется. Отсутствие нароста при малых скоростях резания объясняется низкой температурой в зоне контакта стружки с инструментом, а отсутствие нароста при высоких скоростях резания объясняется высокой температурой, при которой металл становится более пластичным и силы трения уменьшаются.

На рисунке 1.12 показано влияние высоты нароста  $h_N$  на коэффициент трения  $\mu$ , силу резания  $P_z$ , передний угол  $\gamma$  и шероховатость обработанной поверхности  $Rz$ .

При *черновой обработке* образование нароста считается допустимым (положительным) явлением, так как он облегчает процесс стружкообразования из-за уменьшения угла резания. Кроме того, нарост защищает лезвие инструмента от истирающего действия стружки и воздействия теплоты, возникающей в процессе резания.

При *чистовой обработке* для борьбы с наростообразованием используют следующие средства и способы: правильный выбор режимов резания и геометрических параметров

инструмента (увеличение переднего угла  $\gamma$ , уменьшение угла резания  $\delta$ ), применение высокоэффективных СОТС, тщательную заточку и доводку поверхностей лезвия инструмента для уменьшения трения на передней поверхности.



**Рис. 1.12**

Влияние нароста  $h_H$  на коэффициент трения  $\mu$ , силу резания  $P_z$ , передний угол  $\gamma$  и шероховатость обработанной поверхности  $R_z$  при различных скоростях резания стали 40X

## 1.6. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

В процессе резания металлов почти вся механическая энергия, затрачиваемая на деформирование, разрушение и трение, переходит в тепловую. Незначительная часть механической энергии расходуется на внутрикристаллические превращения.

Тепловая энергия оказывает значительное влияние на процесс деформирования при резании, работоспособность инструмента и физические процессы, протекающие в контактной области. С одной стороны, интенсивное тепловыделение способствует деформированию материала срезаемого слоя, обеспечивая образование пограничного слоя на контактных поверхностях стружки и заготовки, в результате чего уменьшается износ инструмента и повышается качество обработанной поверхности. С другой — тепловое воздействие на режущее лезвие инструмента вызывает изменение физико-механических свойств и структуры инструментального материала.

Полагая, что вся работа резания переходит в тепло, пренебрегая работой, совершаемой в направлении подачи, как малой величиной, количество образующегося в единицу времени тепла  $Q$  в процессе резания можно определить по формуле:  $Q = P_z \cdot v$ , Дж/мин, где  $P_z$  — сила резания, действующая в направлении скорости резания, Н;  $v$  — скорость резания, м/мин.

Схема образования и распространения теплоты при резании приведена на рисунке 1.13.

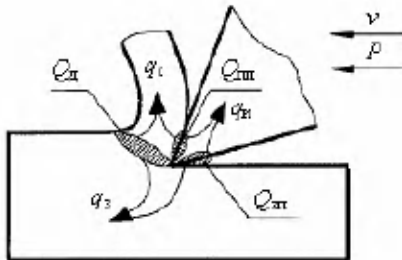


Рис. 1.13

*Схема образования и распространения теплоты при резании*

Тепловой баланс процесса резания можно представить следующим образом:

$$Q = Q_d + Q_{\text{шт}} + Q_{\text{зп}} = q_c + q_z + q_{\text{и}} + q_{\text{ос}},$$

где  $Q_d$  — количество теплоты, выделяющейся при упруго-пластическом деформировании обрабатываемого материала, Дж;  $Q_{\text{шт}}$  — количество теплоты, выделяющейся при трении стружки о переднюю поверхность резца, Дж;  $Q_{\text{зп}}$  — количество теплоты, выделяющейся при трении задней поверхности инструмента и заготовки, Дж;  $q_c$  — количество теплоты, отводимой стружкой, Дж;  $q_z$  — количество теплоты, отводимой заготовкой, Дж;  $q_{\text{и}}$  — количество теплоты, отводимой режущим инструментом, Дж;  $q_{\text{ос}}$  — количество теплоты, переходящее в окружающую среду, Дж.

В зависимости от условий обработки, марки обрабатываемого и инструментального материалов стружкой отводится 25–85%, заготовкой 10–15%, инструментом 2–8% общего количества тепла, образующегося в процессе резания. Распределение теплоты главным образом зависит от скорости резания. Характер распределения теплоты в зависимости от скорости резания конструкционной стали приведен на рисунке 1.14.

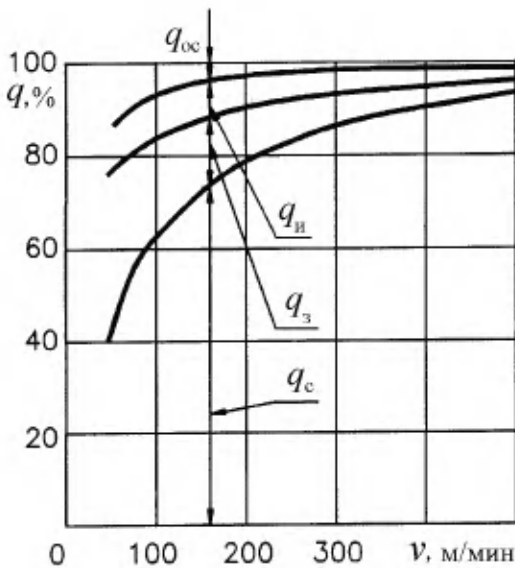


Рис. 1.14

Распределение теплоты в зависимости от скорости резания

В таблице 1.1 приведены средние значения количества теплоты, распределяющейся между стружкой, деталью и инструментом при точении материалов различной обрабатываемости на разных скоростях резания.

Таблица 1.1

## Распределение количества теплоты в зоне обработки

Обрабатываемый материал	Скорость резания $v$ , м/мин	% тепла		
		в стружку	в деталь	в инструмент
Сталь 40X	20–50	45	47	4,5
	100–350	75	22	1,6
Жаропрочный сплав ХН62ВМКЮ	3–15	25	45	30
	12–25	45	35	20

Из таблицы 1.1 видно, что с увеличением скорости резания количество тепла, идущего в инструмент, уменьшается. Это объясняется отставанием скорости передачи тепла от скорости движения стружки.

При обработке *жаропрочных сталей* количество тепла, идущего в инструмент, увеличивается по сравнению с обработкой конструкционных сталей. Это приводит к быстрому нагреву инструмента, что ограничивает применение высоких скоростей резания. Повышение температуры инструмента можно объяснить тем, что жаропрочные стали и сплавы по сравнению с конструкционными имеют повышенную прочность и пониженную теплопроводность.

При обработке *пластичных материалов* температура передней поверхности инструмента выше температуры задней поверхности, что объясняется нагревом передней поверхности вследствие трения и теплопередачи от нагретой стружки. Задняя поверхность нагревается лишь в результате трения.

При обработке *хрупких материалов*, когда образовывается стружка надлома, происходит прерывистое касание ее с передней поверхностью инструмента, что способствует уменьшению нагрева этой поверхности.

С увеличением подачи температура в зоне резания повышается, но менее интенсивно, чем с повышением скорости. Меньшее влияние на температуру оказывает глубина резания. Это можно объяснить тем, что с увеличением глубины резания возрастает длина активной части режущей кромки инструмента, что способствует улучшению теплоотвода.

Температура инструмента при обработке резанием в зависимости от условий обработки в зоне главной режущей

кромки может достигать 800–1000°C, а в отдельных случаях и выше. Высокие температуры приводят к снижению режущей способности инструмента, его тепловой деформации, что влияет на точность обработки. Кроме того, высокие температуры в зоне резания влияют на качество поверхностного слоя обрабатываемых заготовок. В связи с этими тепловыми явлениями при резании необходимо управлять так, чтобы выделяющаяся теплота облегчала резание, не снижала стойкость инструмента, а температура резания находилась в пределах, гарантирующих качество обработанных поверхностей и эксплуатационные характеристики режущего инструмента.

Влияние режимов и геометрии инструмента на температуру резания можно определять по эмпирическим формулам типа

$$\theta = c_0 \cdot v^Z \cdot S^Y \cdot t^X,$$

где  $\theta$  — температура резания, °C;  $c_0$  — коэффициент, учитывающий влияние на температуру резания свойств обрабатываемого материала и условий обработки;  $v$  — скорость резания, м/мин;  $S$  — подача, мм/об;  $t$  — глубина резания, мм;  $Z$ ,  $X$ ,  $Y$  — показатели степени, характеризующие интенсивность изменения температуры с увеличением  $v$ ,  $S$  и  $t$ .

Температура резания при точении может быть определена по формуле С. С. Силина:

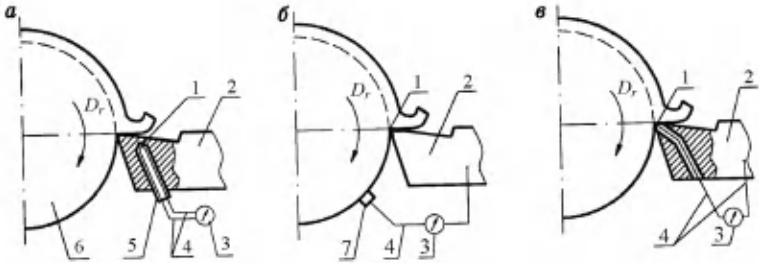
$$\theta = \frac{0,95\tau_p \left(\frac{va_1}{a}\right)^{0,375} \left(\frac{a_1}{\rho_1}\right)^{0,055} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{va_1 B}{4a}}}{c_p B^{0,625} \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \beta \epsilon\right)^{0,15} \left(\frac{a_1}{b_1}\right)^{0,045} (1 - \sin \gamma)^{0,65} \sin^{0,03} \alpha},$$

где  $\tau_p$  — сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, МПа;  $a$  — температуропроводность обрабатываемого материала, м<sup>2</sup>/с;  $B = \operatorname{tg} \beta_1$  — безразмерный комплекс, характеризующий степень пластических деформаций металла снимаемого припуска;  $\beta_1$  — угол наклона условной плоскости сдвига;  $c_p$  — удельная объемная теплоемкость материала снимаемого припуска, Дж/м<sup>3</sup>·°C;  $\lambda_p$  и  $\lambda$  — коэффициенты теплопроводности обрабатываемого и инструментального материалов, Дж/м<sup>3</sup>·с·°C.

Применяются различные *методы измерения температур* в зоне резания: калориметрические, оптические, радиационные, термокрасок и другие. Наиболее распространен метод термопар, предложенный в 1912 г. Я. Г. Усачевым.

Схемы термопар для измерения температуры резания приведены на рисунке 1.15. Искусственная термопара

(рис. 1.15а) вводится в отверстие, выполненное в инструменте. Отверстие располагается, как можно, ближе к источнику тепла. Термопара от стенок изолируется диэлектрическим материалом 5. Возникающую в цепи термоэлектродвижущую силу (ТЭДС), пропорциональную разности температур места спая и холодных концов проводов, измеряют регистрирующим прибором 3. Перевод ТЭДС в градусы осуществляется градуировкой термопары.



**Рис. 1.15**

*Схемы термопар для измерения температуры в зоне резания:*

*а — искусственная; б — естественная; в — полуискусственная; 1 — спай термопары; 2 — резец; 3 — регистрирующий прибор; 4 — провод; 5 — изоляционный элемент; 6 — обрабатываемая заготовка; 7 — токосъемник.*

В естественной термопаре (рис. 1.15б) в качестве ее элементов служат обрабатываемая заготовка и резец. Обрабатываемая заготовка зажимается в патрон станка и поддерживается вращающимся центром. Резец и заготовка изолируются от станка. В процессе резания в месте контакта резца со стружкой возникает ТЭДС. Напряжение термотока регистрируется прибором, например милливольтметром. Применяются также и полуискусственные термопары (рис. 1.15в). Одним элементом термопары является инструмент, а другим изолированная проволока, конец которой расклепан на передней или задней поверхности инструмента.

При обработке ответственных деталей бывает необходим анализ температурного поля (значений температур в точках определенного участка деформируемого слоя в определенный момент времени) в зоне резания. Температурное поле в зоне резания можно получать измерением с помощью термопар, моделированием процесса с использованием аналоговых счетно-решающих устройств и теоретическим расчетом с использованием методов теории теплопроводности.

## 1.7. ИЗНОС ИНСТРУМЕНТА

Износ инструмента происходит при высоких температурах и удельных давлениях в условиях сухого и полусухого трения и сопровождается различными физико-химическими явлениями в местах контакта инструмента со стружкой и обрабатываемой заготовкой.

В зависимости от условий резания могут иметь место различные виды износа: абразивный, адгезионный, диффузионный и окислительный. Все виды изнашивания тесно связаны между собой и влияют на суммарный износ инструмента.

При относительно невысоких скоростях резания износ происходит в основном вследствие трения стружки о переднюю поверхность инструмента и обрабатываемой заготовки о заднюю поверхность. При этом рабочие поверхности инструмента истираются твердыми включениями, находящимися в обрабатываемом материале. Такой вид износа называют *абразивным*.

При высоких температурах может происходить окисление верхних слоев трущихся поверхностей инструмента. Окисные пленки являются хрупкими и, разрушаясь, открывают нижележащие слои, которые также подвергаются разрушению. Этот вид износа называется *окислительным*.

*Адгезионное изнашивание* происходит в результате действия сил молекулярного сцепления – адгезии, которая приводит к схватыванию поверхностных слоев инструмента с обрабатываемой деталью. Частицы материала вырываются с поверхности инструмента и уносятся стружкой.

При работе твердосплавным инструментом на высоких скоростях резания, когда температура достигает 900°C, происходит *диффузионный износ*. При обработке жаропрочных сплавов и сталей диффузионный износ инструмента может иметь место при температурах 500–550°C. При этом атомы инструментального материала проникают (диффундируют) в стружку и в верхние слои обрабатываемой заготовки. В результате этого процесса изменяется химический состав и физико-механические свойства поверхностных слоев инструмента, приводя к снижению его износостойкости.

При обработке труднообрабатываемых материалов износ инструмента происходит более интенсивно по следующим причинам:

- большая доля тепла переходит в инструмент, повышая его температуру;
- выше удельные давления на режущую часть инструмента;

- интенсивнее проявляются адгезия и диффузия;
- выше истирающая способность обрабатываемого материала;
- больше коэффициенты трения на контактных поверхностях.

Износ по передней поверхности преобладает при обработке пластичных материалов с толщиной срезаемого слоя  $a_1 < 0,5$  мм с высокими скоростями резания без охлаждения. Износ по задним поверхностям преобладает при обработке твердых хрупких материалов и пластичных материалов с малой толщиной срезаемого слоя ( $a_1 < 0,1$  мм) и при низких скоростях резания.

За критерий затупления инструмента принимается допустимая высота площадки износа по задней поверхности  $h_3$ . При обработке конструкционных сталей разрушение режущей части резцов, оснащенных твердым сплавом, происходит при  $h_3 = 0,8-1$  мм. При обработке жаропрочных сплавов износ наступает при  $h_3 = 0,8-1,0$  мм при черновом точении и  $h_3 = 1,5-2,0$  мм — при грубой обработке.

При чистовой обработке устанавливается технологический критерий затупления, при котором инструмент считается изношенным, когда не обеспечивается требуемая шероховатость поверхности и точность размеров не соответствует техническим условиям.

Для оценки величины износа инструмента применяют различные методы: измерение линейных размеров износа по передней и задней поверхностям; относительное увеличение шероховатости, сил и температур резания; измерение размеров обрабатываемой детали.

## 1.8. СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДЫ ПРИ РЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ

Применение смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) при обработке конструкционных материалов является одним из основных способов, обеспечивающих уменьшение износа режущего инструмента, силы резания, улучшение качества поверхностного слоя и обеспечение эксплуатационных характеристик деталей.

Для повышения стойкости инструмента необходимо обеспечить снижение теплонапряженности процесса резания и интенсивный отвод теплоты от нагретых участков зоны резания и инструмента. Смазывающее действие оказывает дополнительное положительное влияние на условия контактирования поверхностей инструмента и обрабатываемого материала.

При обработке конструкционных материалов на контактных площадках создаются давления порядка 1–3 ГПа и температуры, близкие к температурам плавления, что затрудняет попадание СОТС на контактные поверхности.

В местах соприкосновения выступов шероховатостей трущихся поверхностей имеются большие давления, а в пустотах образуется вакуум. При этом частицы смазочного вещества проникают в пустоты и в микротрещины, производя расклинивающее действие, уменьшая силы сцепления между атомами, в результате чего происходит разрыхление срезаемого слоя и облегчается его пластическое деформирование. Охлаждающая способность жидкости тем больше, чем выше ее теплота парообразования, теплопроводность и теплоемкость. Эти свойства СОТС влияют на повышение стойкости инструмента и уменьшение его тепловой деформации.

В зависимости от технологического метода обработки, физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов и режимных параметров применяют жидкие, газообразные и твердые СОТС.

К *жидким* смазочно-охлаждающим средам относят: водные растворы минеральных электролитов; эмульсии минеральных, растительных и животных масел; растворы поверхностно-активных веществ в керосине, масла и эмульсии с добавками твердых смазочных веществ (графита, парафина и др.).

К *газообразным* смазочно-охлаждающим веществам относятся: воздух, азот, двуокись углерода, кислород, пары поверхностно-активных веществ и др.

К *твердым* СОТС относятся: неорганические материалы (графит, дисульфид молибдена, тальк, бура и др.), органические соединения (мыло, воск, парафин и др.).

Применяемые в процессе резания СОТС должны обеспечивать одновременно охлаждающее, смазывающее и защитное действие, а также хорошую вымывающую способность. На практике наибольшее распространение получило применение жидких СОТС.

Эффективность применения СОТС во многом зависит от *способа ее подвода* в зону резания. Наиболее распространенным способом подачи СОТС является полив свободной струей (рис. 1.16а). Этот метод несмотря на очевидные преимущества имеет следующие недостатки: большой расход жидкости и ее разбрызгивание, недостаточное смазывающее действие.

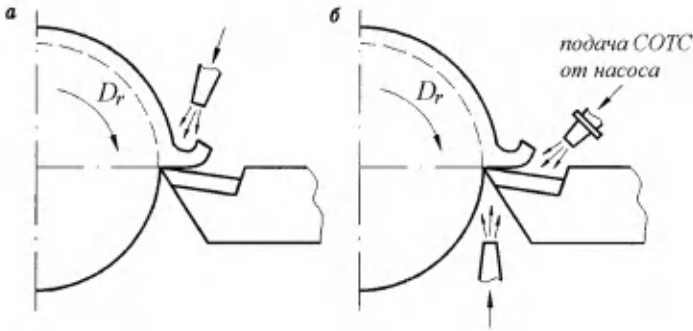


Рис. 1.16

Схемы подвода СОТС в зону резания:

*а* — полив свободной струей; *б* — высоконапорное охлаждение.

Высокий эффект обеспечивает высоконапорное охлаждение (рис. 1.16б), при котором жидкость подается под давлением 1,5–2,0 МПа в зону резания и со стороны задней поверхности инструмента через сопло диаметром 0,4–0,5 мм. В результате высокого давления частицы жидкости интенсивно проникают в зазоры и микротрещины, быстро превращаясь в пар, и охлаждают нагретые поверхности. При этом способе охлаждения значительно повышается стойкость инструмента. Например, при обработке жаропрочного сплава ХН77ТЮР стойкость резцов из быстрорежущей стали повышается в 5–7 раз по сравнению с охлаждением поливом. В труднодоступных местах используют подачу жидкости под давлением 2–2,5 МПа по каналу в инструменте непосредственно к месту отделения стружки. Таким способом обеспечивается эффективное охлаждение и вымывание стружки, например при глубоком растачивании, сверлении и других работах. При обработке нержавеющих сталей и жаропрочных сплавов высоконапорное охлаждение может подаваться и сверху на стружку. К недостаткам высоконапорного охлаждения следует отнести необходимость применения насосов высокого давления и специальных защитных устройств от разбрызгивания, и тщательной очистки жидкости.

Применяется также охлаждение распыленной жидкостью, которая подается в зону резания со стороны задней поверхности инструмента. При выходе из сопла воздушно-жидкостная смесь расширяется, что обеспечивает понижение ее температуры на 10–12°C. Попадая на нагретые поверхности инструмента и заготовки, частицы жидкости

быстро испаряются и отводят большое количество теплоты. Стойкость инструмента при этом способе охлаждения повышается по сравнению с подачей СОТС свободной струей. При работе с распыленной жидкостью необходима установка для отсасывания тумана. Применение охлаждения распыленной жидкостью позволяет повысить стойкость как быстрорежущего, так и твердосплавного инструмента в 1,5–3 раза по сравнению с охлаждением поливом.

Правильный выбор и применение СОТС позволяет повысить производительность обработки резанием в пять и более раз.

## 1.9. КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РЕЗАНИИ

Качество детали определяется точностью выполнения заданных размеров и физико-механическими свойствами поверхностного слоя. Обработанная поверхность имеет сложную геометрию, а поверхностный слой детали значительно отличается от свойств материала заготовки.

Отклонения от теоретической поверхности определяют макрогеометрией и микрогеометрией. Макрогеометрию характеризуют следующие отклонения от геометрической формы: бочкообразность, эллипсность, овальность, конусность и др., а микрогеометрию – шероховатость и волнистость. Погрешности геометрической формы должны укладываться в допуск на размер в соответствии с заданной точностью изготовления детали.

Физико-механические свойства поверхностного слоя характеризуются микрорельефом поверхности (шероховатостью), глубиной и степенью упрочнения, остаточными напряжениями, глубиной их залегания и знаком.

Учитывая, что качество обработанной поверхности определяет эксплуатационные свойства деталей, рассмотрим *важнейшие характеристики поверхностного слоя* при обработке резанием.

Шероховатость поверхности представляет совокупность неровностей, образующих рельеф поверхности. Она характеризуется большим числом показателей, из которых чаще всего нормируется высота неровностей  $R_z$  и среднеарифметическое отклонение профиля  $R_a$ .

Волнистость поверхности, в отличие от шероховатости, представляет совокупность периодически чередующихся выступов и впадин синусоидальной формы, имеющих шаг больше базовой длины для определения шероховатости (на практике больше 5 мм).

При резании различают шероховатость в продольном и поперечном направлениях. Поперечная шероховатость измеряется в направлении, перпендикулярном следам обработки по толщине срезаемого слоя, а продольная — вдоль следов обработки срезаемого слоя. При резании поперечная шероховатость превышает продольную и является определяющей. Требования к шероховатости поверхности следует устанавливать исходя из функционального назначения поверхности для обеспечения заданного качества деталей.

Определяющее влияние на шероховатость поверхности оказывают геометрия инструмента, величина подачи и скорость резания. Влияние геометрии инструмента связано с переносом формы его вершины на обработанную поверхность (углы  $\varphi$ ,  $\varphi_1$  и радиус при вершине резца в плане  $r$ ) и условиями контактирования задней поверхности с обработанной поверхностью детали (углы  $\alpha$  и  $\alpha_1$ ). Подача определяет высоту и периодичность следования микронеровностей. От скорости резания зависят условия отбегания или отрыва срезаемого слоя материала от обрабатываемой поверхности.

Материал поверхностного слоя обрабатываемой детали испытывает наклеп, разупрочнение, изменение структуры и микротвердости. В нем образуются остаточные напряжения.

Наклеп поверхностного слоя оценивают по глубине  $h_H$ , степени  $U_H$  и градиенту  $U_{ГР}$  наклепа. Степень и градиент наклепа определяются по формулам:

$$U_H = \frac{H_{\max} - H_{\text{исх}}}{H_{\text{исх}}} \cdot 100\% ;$$

$$U_{ГР} = \frac{H_{\max} - H_{\text{исх}}}{h_H} ,$$

где  $H_{\max}$  и  $H_{\text{исх}}$  — максимальная и исходная микротвердость поверхностного слоя материала обрабатываемой заготовки.

Степень наклепа сильно зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала. Жаропрочные, нержавеющие и другие пластичные материалы обладают большой склонностью к наклепу. Например, при обработке жаропрочного сплава ХН77ТЮР глубина наклепа в три раза больше, чем при обработке стали 45.

На глубину и степень наклепа оказывают влияние режимы резания, геометрия режущего инструмента и другие параметры процесса резания. С увеличением скорости резания степень и глубина наклепа уменьшаются. Подача влияет на наклеп в большей мере по сравнению с глубиной резания. Большое влияние на наклеп оказывает износ режущего инструмента, который ухудшает условия резания и вызывает

повышение пластической деформации. При работе затупленным инструментом глубина наклепа увеличивается.

Возникающая в зоне деформации теплота повышает локальную температуру поверхностного слоя. При температурах более  $0,4 T_{пл}$  возможна рекристаллизация и снятие деформационного упрочнения.

Важной характеристикой физического состояния поверхностного слоя при резании являются величина и знак остаточных напряжений, которые формируются в результате совместного воздействия неравномерного поля деформации и температур. В зависимости от режима резания, геометрии инструмента и состояния его лезвия в поверхностном слое могут создаваться растягивающие или сжимающие напряжения. За счет движения инструмента, например резца, в поверхностном слое возникают растягивающие напряжения, а за счет подмятия части срезаемого материала под режущую кромку и уплотнения материала поверхностного слоя могут создаваться сжимающие напряжения. Таким образом, управляя процессом формирования поверхностного слоя, можно получать наиболее благоприятные напряжения, обеспечивающие повышение предела выносливости ответственных деталей.

## 1.10. ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ

В современном машиностроении применяются материалы, обладающие следующими свойствами: жаропрочностью, жаростойкостью, повышенной прочностью, коррозионной стойкостью в различных средах и т. д. Изготовление деталей из таких материалов связано с увеличением трудоемкости обработки вследствие снижения скорости резания.

Учитывая значительное количество марок сталей и сплавов, их классифицируют по обрабатываемости резанием, в основу которой положен химический состав материала, поскольку в основном от него зависит обрабатываемость материала, являющаяся важным технологическим свойством всех конструкционных материалов.

Количественно обрабатываемость оценивают коэффициентом обрабатываемости, представляющим собой отношение скорости резания, допускаемой при резании определенного материала, к скорости резания, допускаемой материалом, принятым за эталонный. Если коэффициент обрабатываемости больше единицы, то данный материал обрабатывается лучше, чем эталонный, а если меньше единицы, то материал является труднообрабатываемым.

Классификация материалов по группам обрабатываемости резанием по отношению к конструкционной стали 45, для которой коэффициент обрабатываемости принят равным единице, и рекомендуемые инструментальные материалы для изготовления режущих инструментов, применяемых при обработке деталей из некоторых труднообрабатываемых материалов, приведены в таблице 1.2.

К **I группе** обрабатываемости отнесены стали, характеризующиеся содержанием хрома до 6%, никеля до 3%, молибдена до 0,6%, ванадия до 0,8% и кремния 2%. Эти стали применяются для изготовления деталей, работающих при температурах до 500–600 °С. Обрабатываемость сталей этой группы удовлетворительная, она близка к обрабатываемости углеродистых и низколегированных сталей соответствующей прочности. Обработка резанием сталей этой группы в основном выполняется в отожженном состоянии. В результате термообработки прочностные характеристики повышаются, и обрабатываемость резко снижается, что вызывает необходимость применения инструмента из твердого сплава.

Стали **II группы** характеризуются высоким содержанием хрома и небольшим содержанием других легирующих элементов (до 40%). Они применяются в основном для деталей, работающих при температуре 500–550°С. В результате термообработки обрабатываемость этих сталей снижается, что вызывает необходимость предпочтительного применения твердосплавного лезвийного инструмента.

К **III группе** отнесены аустенитные стали с содержанием хрома более 15%, никеля более 5% и в небольшом количестве другие легирующие элементы. К этой группе отнесены также стали аустенитно-ферритного и аустенитно-мартенситного классов. Скорости резания, применяемые при обработке деталей из сталей III группы, примерно в 2 раза ниже, чем при обработке стали 45.

К **IV группе** относятся сложнелегированные стали аустенитного класса, содержащие хром (12–15%), никель (более 5%) и в несколько меньшем количестве марганец, молибден, титан, вольфрам, ванадий. Обрабатываемость резанием деталей из материалов этой группы в 3–4 раза ниже обрабатываемости стали 45.

К **V группе** относятся жаропрочные деформируемые сплавы на никелевой и железоникелевой основах, легированные большим количеством хрома (10–20%) и несколько меньшим количеством титана, алюминия, вольфрама, молибдена. Обрабатываемость деталей из сплавов этой группы в 6–12 раз ниже, чем из стали 45.

*Таблица 1.2*  
**Классификация материалов по обрабатываемости резанием и инструментальные материалы для изготовления режущих инструментов, применяемых при обработке деталей**

Номер группы материала	Класс материала	Марки материалов	Коэффициент обрабатываемости по отношению к стали 45	Рекомендуемые инструментальные материалы для изготовления режущих инструментов		Ориентировочная скорость резания, м/мин.	
				Быстрорежущая сталь	Твердый сплав	Быстрорежущая сталь	Твердый сплав
1	2	3	4	5	6	7	8
I	Теплостойкие хромистые, хромоникелевые хромомолибденовые стали перлитного и мартенситного классов	20X3MВФ 15X5M 15X6CЮ	0,5 0,9 0,9	P6M5 P12	T5K10, T15K6, T30K4, BK8, BK6M, КТН-16	20-30 45-60 45-60	120-150 200-250 200-250

Продолжение табл. 1.2

Номер группы материала	Класс материала	Марки материалов	Коэффициент обрабатываемости по отношению к стали 45	Рекомендуемые инструментальные материалы для изготовления режущих инструментов		Ориентировочная скорость резания, м/мин.	
				Быстрорежущая сталь	Твердый сплав	Быстрорежущая сталь	Твердый сплав
1	2	3	4	5	6	7	8
II	Коррозионно-стойкие нержавеющие, хромистые и сложнoleгированные стали ферритного, мартенситно-ферритного классов	12X13 25X13H2 11X11H2B2MФ	0,7 0,9 0,65	P9K10, P6M5, P9M4K8Ф, P10K5Ф5, P18	T5K10, T15K6, BK8, BK6M, BK10M, KHT-16	35-50 45-60 30-40	180-220 200-250 170-200

Продолжение табл. 1.2

Номер группы материала	Класс материала	Марки материалов	Коэффициент обрабатываемости по отношению к стали 45	Рекомендуемые инструментальные материалы для изготовления режущих инструментов		Ориентировочная скорость резания, м/мин.	
				Быстрорежущая сталь	Твердый сплав	Быстрорежущая сталь	Твердый сплав
I	2	3	4	5	6	7	8
III	Коррозионно-стойкие, кислотостойкие, жаростойкие, хромоникелевые стали	20X23H18 12X21H5T 07X16H6	0,6 0,45 0,5	P12Ф2К8М3, P9К5, P9M4K8Ф	ВК8, ВК8В, ВК60М, ВК3М, Т15К6, ВК10М, КНТ-16	30-40 20-30 25-35	140-120 110-130 120-150
IV	Жаропрочные, жаростойкие, кислотостойкие хромоникелевые	37X12H8Г8МФБ 45X14H14В2М 12X25H16Г7АР	0,23 0,4 0,3	P12Ф2К5М3, P9M4K8Ф P9К5, P10K5Ф5	ВК6М, ВК8, ВК60М, ВК3М, Т15К6, ВК10М, Т15К6, КНТ-16	12-20 20-28 15-25	50-60 100-120 80-100

Продолжение табл. 1.2

Номер группы материала	Класс материала	Марки материалов	Коэффициент обработки мости по отношению к стали 45	Рекомендуемые инструментальные материалы для изготовления режущих инструментов		Ориентировочная скорость резания, м/мин.	
				Быстрорежущая сталь	Твердый сплав	Быстрорежущая сталь	Твердый сплав
I	2	3	4	5	6	7	8
V	Жаропрочные деформируемые сплавы на железоникелевой основе	ХН60ВТ ХН67ВМТЮ ХН82ТЮМБ	0,16 0,1 0,08	Р9М4К8Ф, Р6М5, Р9К10, Р18	ВК8, ВК6М, ВК10М, ВК150М	8-12 6-10 5-10	40-50 20-25 18-20
VI	Окалиностойкие и жаропрочные легированные сплавы на никелевой основе	ВЖ36-Л2 ХН67ВМТЮЛ ЖС6К	0,05 0,05 0,05	Р9М4К8Ф, Р12Ф2К8М3, Р18Ф2К8М, Р9К10, Р10К5Ф5	ВК8, ВК60М, ВК6М, ВК150М, ТТ10К8Б, ВК3М	— — —	18-20 18-20 18-20

Продолжение табл.1.2

Номер группы материала	Класс материала	Марки материалов	Коэффициент обрабатываемости по отношению к стали 45	Рекомендуемые инструментальные материалы для изготовления режущих инструментов		Ориентировочная скорость резания, м/мин.	
				Быстрорежущая сталь	Твердый сплав	Быстрорежущая сталь	Твердый сплав
I	2	3	4	5	6	7	8
VII	Сплавы на титановой основе	BT3-1	0,28	P8M3K6C,	ВК3М, ВК8,	18-25	50-70
		OT4-1	0,4	P9M4K8Ф,	ВК60М, ВК4,	25-35	70-100
		BT22	0,24	P9K10, P18, P12Ф3К10М3	ВК10М, ВК6М		
VIII	Высокопрочные стали	28Х3СНМВФА	0,22	P9M4K8Ф,	ВК3М, ВК6М,	15-20	45-60
		33Х3СНМВФА	0,18	P18Ф2К8М,	ВК8, ВК8,	5-10	40-65
		43Х3СНМВФА	0,12	P12Ф2К8М,	ВК60М, ВК100М, КНТ-16, ТТ10К8Б	4-5	40-50
						—	20-30

К VI группе отнесены литейные жаропрочные сплавы, они более легированы и, вследствие этого, более жаропрочные, чем деформируемые. Эти сплавы менее вязки, в них имеется большое количество интерметаллидных и карбидных включений, которые сильно изнашивают инструмент. При обработке литейных жаропрочных сплавов скорости резания в двенадцать и более раз ниже, чем при обработке стали 45.

VII группа — это сплавы на титановой основе. Они имеют широкий диапазон обрабатываемости резанием, который зависит от предела прочности сплава. Титановые сплавы активно взаимодействуют с газами при повышенных, начиная с 600°C, температурах. Микротвердость насыщенных слоев в 3–5 раз выше. Скорости резания, применяемые при обработке титановых сплавов, в 1,5–4 раза ниже, чем из стали 45.

В последние годы для улучшения обрабатываемости труднообрабатываемых сталей и сплавов применяются следующие методы:

- повышение работоспособности режущего инструмента за счет нанесения на его рабочие поверхности упрочняющих износостойких покрытий;
- введение в зону резания дополнительной энергии.

Наибольшее применение нашли следующие *способы упрочнения поверхности инструмента*:

- конденсация газообразных соединений из газовой среды с образованием твердых пленок на поверхности режущего инструмента;
- термодиффузия в материал инструмента твердых соединений из металлических порошков;
- конденсация веществ из плазменной фазы в условиях ионной бомбардировки (способ КИБ).

## Глава 2

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Широкие пределы характеристик деталей в современном машиностроении по габаритным размерам, точности, свойствам обрабатываемых материалов и масштабам производства ставят перед технологом сложную многовариантную задачу выбора рациональных типов и конкретных моделей станков.

В настоящее время станкостроительной промышленностью выпускается широкая номенклатура металлообрабатывающих станков и автоматических линий, в том числе, станков особо высокой точности, тяжелых станков для обработки крупногабаритных деталей, станков для физико-химических методов обработки, станков-автоматов для контурной программной обработки сложных по форме деталей.

Особое развитие получило числовое программное управление станками. Микропроцессорные устройства управления превращают станок в гибкий станочный модуль, сочетающий универсальность с возможностью автоматической программной переналадки станка на выполнение другой операции, что особо важно для условий средне-серийного производства.

На базе гибких станочных модулей в сочетании с автоматизированным вспомогательным оборудованием (транспортные и складские системы) создаются гибкие автоматизированные линии (ГАЛ) и гибкие автоматизированные участки (ГАУ), обеспечивающие переход по программе на обработку новых деталей.

Таким образом, современное станочное оборудование является базой для развития гибкого автоматизированного производства, резко повышающего производительность труда в условиях средне- и мелкосерийного производства.

#### **2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАНКОВ**

Основным признаком классификации станков является технологический, т. е. принадлежность для обработки определенных форм поверхностей деталей. Классификация станков по технологическому признаку приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1

## Классификация металлорежущих станков

Наименование	Группа	Тип									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Токарные	1	автоматы и полуавтоматы специализированные	одношпиндельные	многوشпиндельные	токарно-револьверные	токарно-револьверные полуавтоматы	карусельные	токарные и лоботоккарные	многорезцовые и копировальные	специализированные	разные
Сверлильные и расточные	2	—	насто- льно- и вер- тикально- сверлиль- ные	одношпиндельные	полуавтоматы	координатно- расточные	радиально- и коор- динатно- свер- лильные	расточные	отдельно- расточные	горизонтально- свер- лиль- ные	разные свер- лильные

Продолжение табл. 2.1

Наименование	Группа	Тип										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Шлифовальные, полировальные, доводочные, заточные	3	—	круглошлифовальные	внутришлифовальные	обдирочные, шлифовальные	специализированные шлифовальные	—	заточные	плоскошлифовальные	притирочные и полировальные	—	—
Электроэрозионные и электрохимические	4	—	—	светолучевые	—	электротрохимические	—	—	электроэрозионные, ультразвуковые, прошивочные	анодные, механические отрезные	—	—

Продолжение табл. 2.1

Наименование	Группа	Тип									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Зубо- и резы- бо- обра- баты- ваю- щие	5	резьбо- нарез- ные	зубодол- бежные для ци- линдриче- ских ко- лес	зуборез- ные для кониче- ских ко- лес	для цилин- дриче- ских ко- лес и шли- цевых вали- ков	для чер- вячных ко- лес	для об- работки торцев зубьев	резь- бофре- зерные	зубоот- делоч- ные, про- вероч- ные и обкат- ные	зубо- резы- бо- шлифо- вальные	разные зубо- резы- бо- обра- баты- ваю- щие
Фре- зер- ные	6	бара- бан- но- фре- зерные	верти- кально- фрезерные консоль- ные	фрезер- ные непре- равного дейст- вия	про- дол- ные одно- стоеч- ные	копиро- вальные и гравир- оволь- ные	верти- кально- фрезер- ные бескон- сольные	про- дол- но- фре- зерные двух- стоеч- ные	кон- сольно- фрезер- ные опера- ционные	горизон- тально- фрезер- ные кон- сольные	разные фрезер- ные

Продолжение табл. 2.1

Наименование	Группа	Тип									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Строгальные, долбежные, протяжные	7	—	продольно-строгальные	поперечные	дольбежные	протяжные	протяжные	протяжные вертикальные для протягивания	—	—	разные
								двух-стоечные			
Разрезные	8	—	отрезные, работающие		пильные	отрезные	ленточные	отрезные с дисковой пилой	отрезные ножовочные	—	—

Продолжение табл. 2.1

Наименование	Группа	Тип										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Разные	9	—	резцом	абразивным кругом	гладким или насеченым диском	—	—	—	—	—	—	—
		—	муфто- и трубообработывающие	пилонателевые	бесцентровые обдирочные и прашильные	—	—	для испытания инструментов	дельтельные машины	балансировочные	—	—

**По технологическому признаку** предусматривается разделение станков на типы. Тип характеризует особенности обрабатываемых деталей или особенности метода обработки, если в одной группе имеются станки, обрабатывающие детали различными методами. Номера групп и типов положены в основу обозначения моделей станков. Первая цифра модели станка соответствует его группе, вторая — типу.

**По уровню автоматизации** станки делятся на станки с ручным управлением, станки-полуавтоматы и станки-автоматы. На станках с ручным управлением все перемещения исполнительных органов, определяющие формообразование детали, производятся при прямом участии станочника, т. е. требуют от него подготовки и частичной или полной реализации задуманной последовательности работы станка, а также выполнения вспомогательных работ (смена заготовок и инструмента) и контроля обработанных деталей.

Станок-полуавтомат выполняет основные технологические переходы в автоматическом цикле, но некоторые вспомогательные (в основном это переходы, связанные с установкой и снятием заготовок) выполняются оператором.

Станок-автомат выполняет в автоматическом цикле все переходы (основные и вспомогательные), входящие в технологическую операцию. К автоматическому оборудованию относятся робототехнологические комплексы (РТК) и гибкие производственные модули (ГПМ). Особенностью ГПМ является способность переходить по управляющей программе на обработку новых деталей в пределах заданных характеристик.

**По уровню специализации** станки делятся на универсальные, специализированные и специальные. Универсальные станки предназначены для изготовления широкой номенклатуры деталей, обрабатываемых небольшими партиями в условиях мелкосерийного и серийного производства. Специализированные станки предназначены для обработки заготовок сравнительно узкой номенклатуры. Например, токарные станки для обработки коленчатых валов, шлифовальные станки для обработки колец шарикоподшипников. Специальные станки применяются для обработки одной или нескольких одинаковых деталей в условиях крупносерийного и массового производства.

**По габаритным размерам** станки образуют размерные ряды, в которых за каждым станком закрепляется определенный диапазон размеров обрабатываемых деталей.

Например, в группе токарных станков размерные возможности станка характеризуются цилиндрическим рабочим пространством, а для многооперационных станков — прямоугольным рабочим пространством (рис. 2.1).

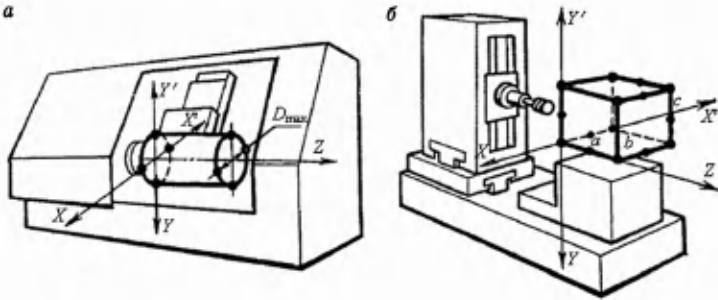


Рис. 2.1

Рабочие пространства станков:

*a* — токарного; *б* — многооперационного.

По размерным характеристикам установлен ряд стандартных значений какого-либо параметра, обычно в геометрической прогрессии с некоторым знаменателем  $\phi$ . Так, для станков токарной группы  $\phi = 1,25$  стандартный ряд наибольших диаметров обрабатываемых деталей составляет 250, 320, 400, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3200, 4000 мм.

Размерная характеристика в модели станка указывается каким-либо параметром (у токарных станков — высота центров, у фрезерных — номер размерного ряда стола, у сверлильных — наибольший диаметр обрабатываемого отверстия и др.). Параметр указывается после типа станка.

**По классу точности** станки подразделяются на 5 групп, которые в моделях станков обозначаются соответствующими буквами:

- станки нормальной точности — Н;
- станки повышенной точности — П;
- станки высокой точности — В;
- станки особо высокой точности — А;
- станки особо точные (прецизионные) — С.

Характеристика класса точности в модели станка ставится после размерной характеристики. Буква Н в модели станка не указывается. Любые буквы, стоящие после группы или типа станка, обозначают модификацию базовой модели станка.

**В зависимости от массы** станки делятся на легкие (до 1 т), средние (1–10 т) и тяжелые (более 10 т).

Основные классификационные характеристики содержатся в обозначении модели станка. Например, модель 16К20ПФЗ соответствует токарно-винторезному станку с высотой центров (половина обрабатываемого диаметра) 20 см, повышенной точности П с числовым программным управлением (ФЗ — управление контурное). Буква К обозначает модификацию станка.

Выбор станков осуществляют методом сравнения *ряда базовых технико-экономических характеристик*, которые приведены ниже.

**Эффективность** — способность повышать производительность труда при снижении затрат на обработку детали:

$$A = \frac{N}{\sum C},$$

где  $A$  — эффективность станка;  $N$  — годовой выпуск деталей, шт.;  $\sum C$  — сумма годовых затрат на изготовление деталей, р. При выборе станочного оборудования всегда необходимо стремиться к максимальной эффективности, т. е.

$$A = \frac{N}{\sum C} \rightarrow \max.$$

Если задана годовая программа выпуска деталей, то функцией должен быть минимум затрат:

$$\sum C \rightarrow \min.$$

Сравнение эффективности вариантов станков ведется по разности приведенных затрат:

$$P = \sum C_1 - \sum C_2,$$

где  $\sum C_1$  и  $\sum C_2$  — суммарные затраты при обработке деталей на разных вариантах станков.

**Производительность** — способность станка обеспечивать изготовление определенного количества деталей в единицу времени.

Штучная производительность  $Q$  определяется числом деталей, изготавливаемых в единицу времени (шт./ч, шт./смену):

$$Q = \frac{T_0}{T},$$

где  $T_0$  — расчетный фонд времени (работы оборудования);  $T$  — время изготовления детали.

Штучная производительность характеризует уровень автоматизации станка, скорость холостых перемещений исполнительных органов, возможности управления.

Технологическая производительность  $K$  определяется продолжительностью только рабочих ходов, т. е. временем на резание материала:

$$K = \frac{T_0}{t_{p.x}},$$

где  $t_{p.x}$  — время резания при обработке детали.

Технологическая производительность характеризует мощность главного привода, скорости рабочих подач, жесткость и точность станка.

Наряду со штучной производительностью иногда станки оцениваются по производительности резания, которая определяется объемом материала, снятого с заготовки в единицу времени.

В таблице 2.2 приведены данные по производительности различных методов обработки и затратам мощности для удаления  $1 \text{ см}^3$  материала за 1 мин.

Таблица 2.2

**Производительность размерной обработки**

Вид обработки	Производительность, $\text{см}^3/\text{мин}$	Удельная мощность, $(\text{кВт}\cdot\text{мин})/\text{см}^3$
Точение	1 500	0,06
Шлифование	800	0,6
Электроискровая	15	1
Электрохимическая	15	10
Ультразвуковая	1	25
Лазерная	0,001	4000

**Надежность** — свойство станка обеспечивать бесперебойный выпуск годной продукции в заданном количестве в течение определенного срока службы. Это комплексный показатель, характеризующий безотказность, долговечность, ремонтпригодность, технический ресурс станка.

**Безотказность** — свойство станка непосредственно сохранять работоспособность в течение некоторого времени. Вероятность безотказной работы  $P(t)$  определяется по формуле

$$P(t) = 1 - Q(t) = \frac{N_i}{N_o},$$

где  $Q(t)$  — вероятность отказа по результатам испытаний;  $N_{и}$  — количество элементов, которые оказались исправными при испытаниях;  $N_0$  — общее количество элементов, подвергнутых испытанию.

*Долговечность станка* — свойство сохранять работоспособность в течение некоторого времени с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонта до наступления предельного состояния.

*Ремонтпригодность* — свойство, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

*Технический ресурс* — наработка от начала эксплуатации или ее возобновления после среднего или капитального ремонта до перехода в предельное состояние.

**Гибкость** — способность станка к быстрому переналаживанию. Чем чаще должна происходить смена обрабатываемых деталей и чем больше число различных деталей требует обработки, тем большей гибкостью должен обладать станок. Гибкость характеризуется универсальностью и переналаживаемостью.

*Универсальность* оценивается номенклатурой деталей, подлежащих обработке на станке. Соотношение между серийностью деталей, годовой программой выпуска и номенклатурой оценивается отношением

$$S' = \frac{N}{n},$$

где  $S'$  — серийность деталей (средний размер партии выпуска, шт.);  $N$  — годовая программа изготовления деталей, шт.;  $n$  — номенклатура (количество наименований) деталей, намечаемых для обработки на станке.

На рисунке 2.2 показаны области применения различных вариантов автоматизированного оборудования в зависимости от номенклатуры и размера партии обрабатываемых деталей.

*Переналаживаемость* определяется потерями времени и средств на переналадку станка при переходе на обработку другой партии деталей. Таким образом, переналаживаемость является показателем гибкости и зависит от числа партий деталей, обрабатываемых на данном оборудовании.

Значительно повысить переналаживаемость и гибкость позволяет использование числового программного

управления в совокупности с групповой технологией обработки деталей.

**Точность** станка определяется точностью обработанных на станке деталей. Этот обобщенный показатель, зависящий от множества причин, влияющих на погрешность обработки, может быть представлен в виде нескольких составляющих.

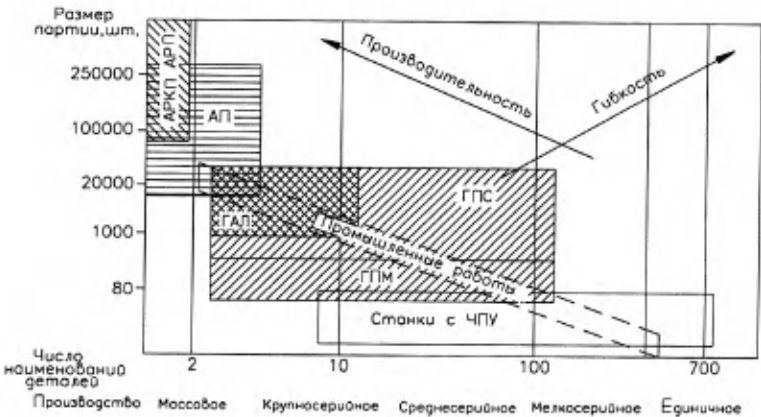


Рис. 2.2

*Область применения автоматизированного металлорежущего оборудования:*

АРКП и АРП — автоматические роторные производства; АП — автоматизированные и автоматические линии; ГАЛ, ГПС — гибкие автоматизированные производства.

**Геометрическая точность** зависит от точности взаимного расположения узлов станка, т. е. качества его сборки. На погрешности расположения узлов существуют нормативы, зависящие от класса точности станка. Соответствие станков нормативу периодически проверяется, и погрешности устраняются в процессе ремонта.

**Кинематическая точность** характеризуется погрешностями, возникающими от несогласованных взаимных перемещений узлов станка, что приводит к нарушению расчетной или заданной траектории перемещения. Особое значение этот вид погрешности имеет для зубообрабатывающих, резьбонарезных и других станков со сложными перемещениями органов станка. Кинематическая точность обеспечивается при наладке станка.

**Жесткость** — характеризует свойство станка противостоять появлению упругих перемещений под действием

силовых нагрузок при резании. Жесткость определяется формулой

$$j = F/\delta,$$

где  $F$  — сила, действующая на узел станка, Н;  $\delta$  — упругая деформация в направлении действия силы, мкм.

Величина, обратная жесткости, называется податливостью и определяется

$$C = 1/j = \delta/F.$$

Податливость сложной системы, состоящей из  $n$  узлов, работающих последовательно, равна сумме податливостей каждого из узлов  $C_i$ :

$$C_n = \sum_{i=1}^n C_i.$$

Для повышения общей жесткости станков проводятся специальные испытания, выявляются элементы с пониженной жесткостью и принимаются меры к ее повышению до уровня жесткости других последовательно нагруженных упругих звеньев.

*Виброустойчивость* — способность станка противостоять возникновению колебаний, снижающих его точность и производительность. Вынужденные колебания возникают в упругой системе станка из-за неуравновешенности вращающихся звеньев приводов, действия периодических перемещений в передачах и внешних периодических возмущений. Основные пути повышения виброустойчивости — устранение источников периодических возмущений, повышение демпфирующих свойств, применение автоматического гашения уровня колебаний.

*Теплостойкость* — сопротивляемость станка возникновению недопустимых температурных деформаций при действии тех или иных источников теплоты. Станок является сложной системой с множеством источников тепловыделения, главными из которых являются процесс резания и электропривод. Тепловыделение носит переменный характер, поэтому устранение погрешностей из-за температурных деформаций является сложной задачей.

*Точность позиционирования* — ошибка вывода узла станка в заданную позицию по одной или нескольким координатам. Ошибку перемещения обычно характеризуют систематической составляющей при фиксированном направлении подвода. Для станков с числовым программным управлением точность позиционирования указывается в технических характеристиках станка.

Таким образом, при выборе модели станка необходимо оценивать все основные технико-экономические характеристики и выбрать модель, обеспечивающую минимальные приведенные затраты при заданном качестве деталей и серийности их изготовления.

## 2.2. КИНЕМАТИКА И СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Форма обрабатываемых деталей на металлорежущих станках образуется за счет взаимных перемещений заготовки и инструмента, обеспечиваемых исполнительными органами и узлами станков. Эти перемещения называются *исполнительными движениями*.

По целевому признаку их можно разделить на движения: формообразования  $\Phi$ , установочные  $У_{ст}$ , деления  $Д$ , управления  $У_{пр}$ , вспомогательные  $В_{сп}$ .

*Формообразующие движения* — это согласованные относительные движения заготовки и режущего инструмента, которые непрерывно создают производящие линии, а следовательно, поверхность заданной формы в целом. В зависимости от формы производящей линии и метода ее образования формообразующие движения могут быть простые или сложные. К простым относятся вращательное ( $\Phi(V)$ ) и поступательное ( $\Phi(\Pi)$ ). Сложными формообразующими движениями являются те, траектория которых образуется в результате согласованности взаимозависимых двух и более вращательных или поступательных движений —  $\Phi(V_1V_2)$ ,  $\Phi(V_1\Pi_2)$ ,  $\Phi(V_1\Pi_2\Pi_3)$  и т. п.

Каждое исполнительное движение осуществляется определенной кинематической группой, представляющей собой совокупность источника движения, исполнительного органа (органов), кинематических связей и настроек станка, обеспечивающих требуемые параметры движения. Группу, создающую формообразующее движение, называют *формообразующей группой*.

Примеры вращательной и поступательной кинематических групп приведены на рисунке 2.3.

В зависимости от числа исполнительных органов кинематические группы делятся на простые (один исполнительный орган) и сложные (два и более исполнительных органа). Любая кинематическая группа включает в себя два качественно различных вида связей — внутреннюю и внешнюю.

Под кинематической связью в станках понимают такую связь между звеньями или исполнительными органами

станка, которая накладывает условия ограничения, не позволяющие занимать исполнительным органам произвольные положения в пространстве относительно друг друга и иметь произвольные скорости.

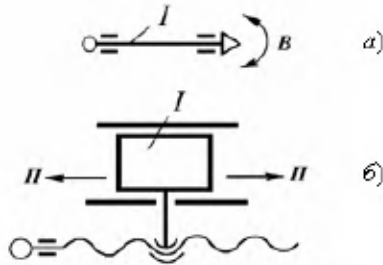


Рис. 2.3

Исполнительные кинематические группы:

*a* — вращательная; *б* — поступательная.

Под внутренней кинематической связью группы понимают совокупность кинематических звеньев и соединений, обеспечивающих качественную характеристику движений, т. е. траекторию. Под внешней кинематической связью группы понимают совокупность кинематических звеньев и их соединений, обеспечивающих количественные характеристики движения, т. е. его скорость, направление, путь и исходную точку.

Структурные схемы кинематических групп различной сложности приведены на рисунке 2.4.

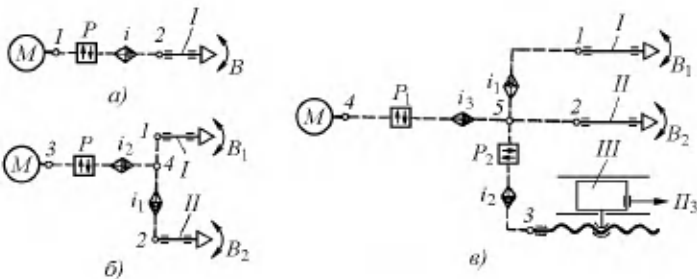




Рис. 2.4

Структурные схемы кинематических групп:

*a* — простая; *б* — сложная с двумя исполнительными органами; *в* — сложная с тремя исполнительными органами.

Для изменения и регулировки параметров движения в станках используют специальные устройства, которые называют органами настройки. Органы настройки, изменяющие траекторию, скорость, а иногда и путь, на структурных схемах обозначают знаком  с буквой *i*, а органы настройки, изменяющие направление движения, знаком  и буквой *P*.

Совокупность кинематических групп станка составляет его кинематическую структуру. Главной частью кинематической структуры любого станка является его формообразующая часть, определяющая общее число групп формообразования, а также их кинематическое соединение. По этому признаку все многообразие кинематических структур металлорежущих станков можно разделить на три класса.

1. Класс элементарных структур Э, к которому относятся станки с кинематической структурой, содержащей только простые группы формообразования.

2. Класс сложных структур С, к которому относятся станки с кинематической структурой, содержащей только сложные группы формообразования.

3. Класс комбинированных структур К, к которому относятся станки с кинематической структурой, содержащей одновременно простые и сложные группы формообразования.

Для расчета кинематической настройки станка наряду с кинематической структурой используется кинематическая схема – изображение с помощью условных обозначений взаимосвязи отдельных элементов и механизмов станков, участвующих в передаче движения различным органам. Условные обозначения на кинематических схемах наиболее распространенных элементов станков в соответствии с ГОСТ 2.701-2008 и ГОСТ 2.703-2011 приведены в таблице 2.3.

Для станков, у которых наряду с механическими передачами имеются гидравлические, пневматические и электрические устройства, составляются соответственно гидравлические, пневматические и электрические схемы в соответствии ГОСТ 2.780-96, ГОСТ 2.782-96, ГОСТ 2.784-96 (табл. 2.4).

Кинематическая цепь составляется из движущихся сопряженных между собой и передающих друг другу движение деталей. Если началом кинематической цепи является

электродвигатель (рис. 2.5), то можно найти связь между начальным и конечным звеньями:

$$n_{\text{дв}} \cdot \frac{d_1}{d_2} \cdot \eta_p \cdot i_N = n_{\text{шп}},$$

где  $n_{\text{дв}}$ ,  $n_{\text{шп}}$  — частота вращения начального и конечного звеньев,  $\text{с}^{-1}$ ;  $d_1$ ,  $d_2$  — диаметры шкивов ременной передачи, мм;  $\eta_p$  — КПД ременной передачи;  $i_N$  — передаточное отношение зубчатой передачи.

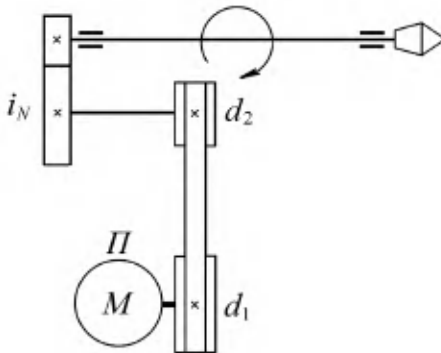


Рис. 2.5

Кинематическая цепь привода вращения шпинделя

Таблица 2.3

Условные обозначения элементов кинематических схем

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Вал		Ременная передача:	
Соединение двух валов:			
глухое		плоским ремнем	
глухое с предохранением от перегрузок			

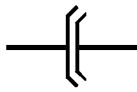
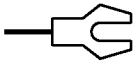
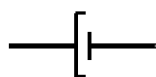

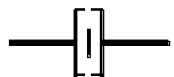
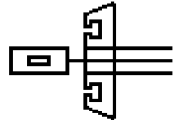
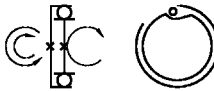
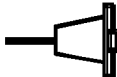
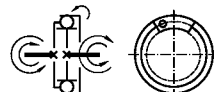
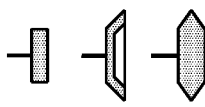

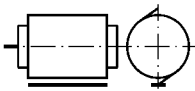
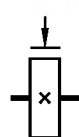
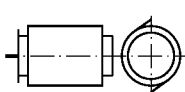
Продолжение табл. 2.3

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	
эластичное		плоским ремнем перекрестная		
шарнирное				
телескопическое			клиновидным ремнем	
плавающая муфта				
зубчатая муфта				
Соединение деталей с валом:		Передача цепью		
свободное для вращения		Передачи зубчатые:		
подвижное без вращения при помощи вытяжной шпонки			цилиндрическими колесами	
неподвижное				
Подшипники скольжения:		коническими колесами		
радиальный				

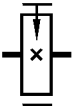
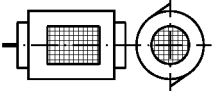
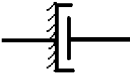
Продолжение табл. 2.3

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
радиально-упорный односторонний		Передача червячная	
радиально-упорный двусторонний			
Подшипники качения:		Передача зубчатая реечная	
радиальный		Передача ходовым винтом с гайкой:	
радиально-упорный односторонний		неразъемной	
радиально-упорный двусторонний		разъемной	
Муфты:		Концы шпинделей станков:	
кулачковая односторонняя		центровых	
кулачковая двусторонняя		патронных	

Продолжение табл. 2.3

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
конусная		прутковых	
дисковая односторонняя		свер- лильных	
дисковая двусторонняя		расточ- ных с планшай- бой	
обгонная односто- ронняя		фрезер- ных	
обгонная двусторон- няя		шлифо- вальных	
Тормоза:		Электро- двигате- ли:	
конусный		на лап- ках	
колодоч- ный		фланце- вые	

Продолжение табл. 2.3

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
ленточный		встроенные	
дисковый			

Представленное выражение является уравнением кинематического баланса для данной кинематической цепи. Таким образом, уравнение кинематического баланса для любого привода главного вращательного движения будет иметь вид:

$$n_{\text{н}} \cdot i = n_{\text{к}},$$


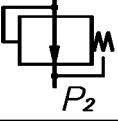

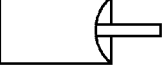
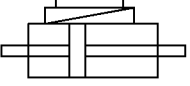





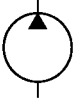

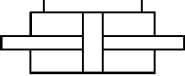
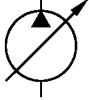
где  $n_{\text{н}}$  и  $n_{\text{к}}$  — частота вращения начального и конечного звена, об/с;  $i$  — передаточное отношение кинематической цепи.

Таблица 2.4



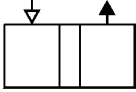

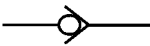


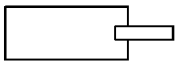
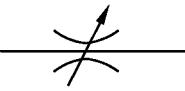
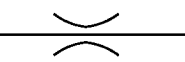

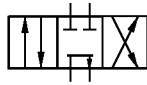
**Условные обозначения элементов гидравлических,  
пневматических и электрических схем**

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Линии связи (трубопроводы): всасывания, напора, слива управления		Соединение линий связи	
		Перекрестивание линий связи	
		Трубопровод гибкий	

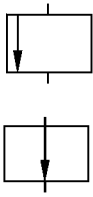
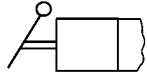
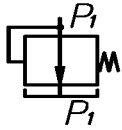
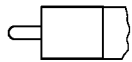
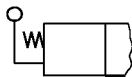
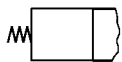
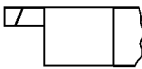
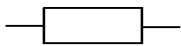
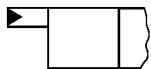
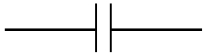
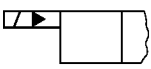

Продолжение табл. 2.4

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
дренажные		Клапан дифференциальный	
Подвод жидкости		Гидроцилиндры двухстороннего действия: с одно- сторонним штоком  с двух- сторонним штоком	  
Слив жидкости			
Подвод воздуха			
Выпуск воздуха			
Гидробак			
Фильтр			
Насосы: с постоянным потоком		Распределитель: четырёхлинейный двухпозиционный  четырёхлинейный трехпозиционный	  
регулируемые			



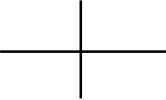

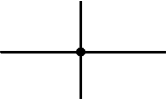





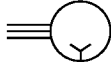
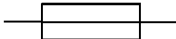
Продолжение табл. 2.4

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Гидромоторы:  с постоянным направлением потока  регулируемые	 	с дифференциальным поршнем  плунжерный одностороннего действия	 
Гидроклапан обратный		Тип управления распределителя:	
Кран		ручное  от кулачка	 
Дроссель:  нерегулируемый  регулируемый	 	пружинной  от рукоятки с фиксатором	 




Продолжение табл. 2.4

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Регулируемый орган: нормально закрытый нормально открытый		от электромагнита	
Клапан предохранительный с собственным управлением		гидравлическое	
Камера мембранная двустороннего действия		электрогидравлическое	
Гидроусилитель		Резистор (сопротивление)	
Пневмогидравлический преобразователь		Конденсатор	
Аккумулятор пневмогидравлический		Катушка индуктивности	

Продолжение табл. 2.4

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Линия электрической связи		Амперметр	
Линии электрической связи перекрещивающиеся, электрически не соединенные		Вольтметр	
Линии электрической связи, электрически соединенные		Выключатель; контакт выключателя замыкающий	
		Диод полупроводниковый	
Род тока:  постоянный  переменный	  	Лампа накаливания	
		Двигатель трехфазный	
		Предохранитель	

Продолжение табл. 2.4

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Обмотка трехфазная: соединение в звезду		Электромагнит	
	соединения в треугольник		Муфта электромагнитная

Уравнение кинематического баланса для цепи, у которой начальное звено имеет вращательное движение, а конечное — прямолинейное:

$$n_H \cdot i \cdot H = S_K,$$

где  $H$  — ход кинематической пары, преобразующей вращательное движение в прямолинейное, мм/об;  $S_K$  — линейное перемещение конечного звена, мм/с.

Величина хода кинематической пары равна перемещению прямолинейно движущегося звена за один оборот вращающегося звена. Для винтовой пары (винт-гайка):

$$H = k \cdot t_B,$$

где  $k$  — число заходов резьбы;  $t_B$  — шаг винта, мм.

Для реечной передачи:

$$H = \pi \cdot m \cdot z,$$

где  $m$  — модуль зацепления, мм;  $z$  — число зубьев реечного колеса.

На этом основании уравнение кинематического баланса для секундной подачи цепи с винтовой парой:

$$n_{дв} \cdot i \cdot k \cdot t_B = S_K.$$

Для цепи с реечной передачей:

$$n_{дв} \cdot i \cdot \pi \cdot m \cdot z = S_K.$$

Уравнение кинематического баланса для подачи на один оборот:

$$1об \cdot i \cdot H = S_K, \text{ мм/об.}$$

Из приведенных выше уравнений определяется передаточное отношение органа настройки станка (например, сменных колес гитары скоростей):

$$i = n_{\text{шп}}/n_{\text{дв}}.$$

### 2.3. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ И МЕХАНИЗМЫ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Исполнительные движения реализуются узлами и механизмами станка, к которым относятся:

1) базовые детали (станины, плиты, коробчатые базовые детали, суппорты, салазки, столы), служащие для создания требуемого пространственного размещения узлов, несущих инструмент и обрабатываемую заготовку, и обеспечивающие точность их взаимного расположения под нагрузкой;

2) приводы, обеспечивающие рабочие, вспомогательные и установочные перемещения инструмента и заготовки. Их делят на приводы главного движения (скорости резания), приводы подач (координатных перемещений) и приводы вспомогательных перемещений;

3) шпиндельные узлы, предназначенные для крепления инструмента или заготовки, передачи на них расчетных режимов, обеспечения заданной точности вращения инструмента или заготовки;

4) манипуляторы, предназначенные для автоматизации вспомогательных операций замены заготовки, инструмента с целью внедрения трудосберегающей («безлюдной») технологии в автоматизированном и гибком автоматизированном производстве.

**Станины** предназначены для размещения и монтажа основных узлов станка. Главными требованиями к станинам являются высокая жесткость, виброустойчивость, длительное сохранение точности, технологичность.

Для обеспечения жесткости станины выполняются коробчатой формы с ребрами (перегородками), соединяющими ее стенки. Наиболее распространенные профили станин приведены на рисунке 2.6.

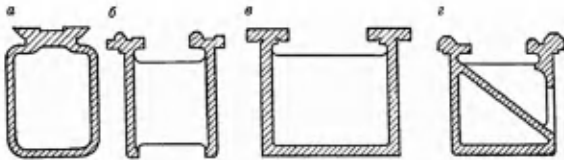


Рис. 2.6

*Профили поперечного сечения станин*

Замкнутый профиль (рис. 2.6а) характерен для станин фрезерных, сверлильных и других станков. Для горизонтальных станин применяют либо открытый профиль (рис. 2.6б), когда две стенки соединены ребрами той или иной формы (токарные, револьверные, расточные станки), либо полукрытый (рис. 2.6в) (строгальные, фрезерные станки), когда у станины имеется верхняя или нижняя стенка. При необходимости отводить большое количество стружки станине придают специальную форму, например с наклонной перегородкой и окнами в боковой стенке (рис. 2.6г).

Станины изготавливаются литыми из серого чугуна СЧ20, СЧ30, СЧ40 (ГОСТ 1412-85). Для высокоточных станков применяется легированный чугун. Литые станины при прочих равных условиях более виброустойчивы, так как чугун имеет большой коэффициент внутреннего трения и обладает способностью гасить возникающие колебания. Однако для того, чтобы снизить массу станины, достигающую в литых конструкциях 30% массы станка, применяют сварные станины. Они могут быть изготовлены в более короткие сроки, поддаются модернизации и исправлению путем приварки дополнительных ребер и допускают использование для направляющих более качественных материалов, чем для всей станины. Для тяжелых уникальных станков иногда делают железобетонные станины. Для особо точных станков станины изготавливаются из гранита природного или искусственного (синтегран). Синтегран состоит из гранитной крошки и эпоксидной смолы, являющейся связующим материалом. Станины из гранита и синтегранита обладают высокими виброгасящими характеристиками, имеют значительно меньшие температурные колебания по сравнению с чугунными и стальными станинами.

Наиболее ответственными элементами станин являются *направляющие*, служащие для перемещения сборочных единиц станка и находящихся на них инструментов и заготовок. В станках применяются направляющие скольжения (рис. 2.7) и качения для прямолинейного и кругового перемещений.

По форме рабочих поверхностей направляющие бывают плоские (рис. 2.7а, б), призматические (рис. 2.7в, г), трапецеидальные (в форме ласточкина хвоста) (рис. 2.7д, е) и круглые (рис. 2.7ж, з).

По ограничению степени свободы перемещающегося узла направляющие бывают закрытые (рис. 2.7д, е, ж),

когда узел имеет одну степень свободы, и открытые, когда такое условие не накладывается.

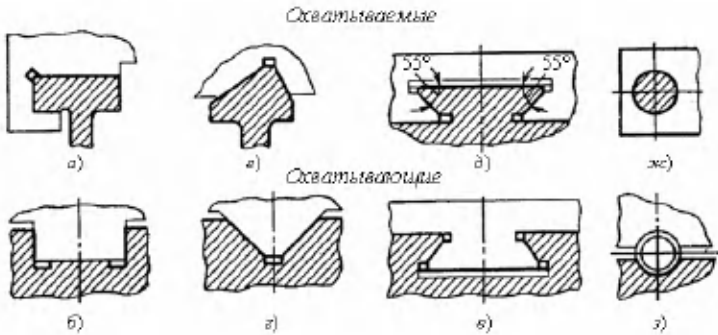


Рис. 2.7

*Типы направляющих скольжения*

По характеру сопряжения с подвижным узлом направляющие могут быть охватываемые и охватывающие. Охватываемые направляющие хорошо очищаются от стружки, но плохо удерживают смазку, поэтому применяются для станков с ручным управлением и небольшими величинами и скоростями перемещения узлов. Охватывающие направляющие хорошо удерживают смазку, но требуют надежной защиты от попадания стружки и применяются в станках с большими величинами перемещения подвижных узлов.

Конструктивно направляющие могут быть единой частью станины или в виде отдельных планок, прикрепленных к станине с помощью разъемных или неразъемных соединений. Такие направляющие называются накладными.

Для уменьшения трения плоские направляющие могут покрываться тонким слоем материала с низким коэффициентом трения (фторопласт, тефлон, эпоксидные смолы с наполнителем).

По способу смазки направляющие скольжения бывают с полужидкостной смазкой, гидродинамические, гидростатические и аэростатические (на воздушной подушке). При полужидкостной смазке смазывающий материал наносится капельным путем на поверхность направляющей вручную или от специального насоса. Такой способ применяется на станках с ручным управлением при небольших скоростях перемещения исполнительных органов.

*Гидродинамические* направляющие отличаются простой конструкции, но хорошо работают лишь при достаточно больших скоростях скольжения, которым соответствуют

скорости главного движения (в продольно-строгальных, карусельных станках). Гидродинамический эффект, т. е. «всплывание» подвижного узла, создается пологими клиновыми скосами между смазочными канавками, выполненными на рабочей поверхности направляющих (рис. 2.8).

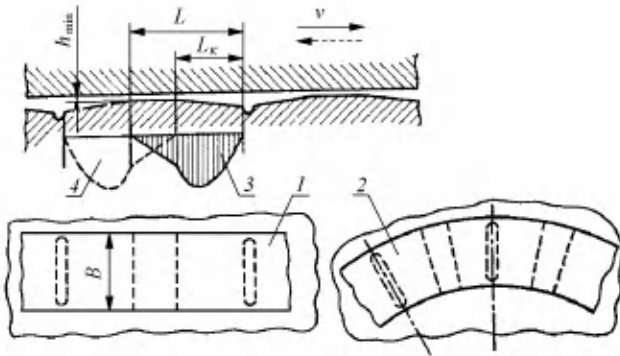


Рис. 2.8

*Гидродинамические направляющие  
(на разрезе показан профиль масляных канавок):*

1 — прямолинейного движения; 2 — кругового движения; 3, 4 — соответственно эпюры давлений при прямом и обратном ходе.

В образованные таким образом сужающиеся зазоры при движении затягивается смазочный материал, и обеспечивается разделение трущихся поверхностей слоем жидкости. Критическая скорость скольжения, после которой наступает жидкостная смазка, определяется по формуле

$$v \geq 2,5 \cdot 10^5 \frac{P \cdot h_{\min}^2}{\mu \cdot L^2 \cdot B}, \text{ м/с,}$$

где  $P$  — общая нагрузка на направляющую, Н;  $h_{\min}$  — минимальная толщина слоя смазки (0,06–0,1 мм);  $\mu$  — динамическая вязкость, МПа·с;  $L$ ,  $B$  — длина и ширина направляющей, мм.

Направляющие, предусматривающие подвод масла и обеспечивающие создание масляной подушки  $h$  по всей площади контакта, носят название *гидростатических*. Последние широко распространены в современных станках. Схемы гидростатических направляющих приведены на рисунке 2.9.

Гидростатические направляющие обеспечивают жидкостную смазку при любых скоростях скольжения, а

значит, равномерность и высокую чувствительность точных исполнительных движений. Недостатком последних является сложность системы смазывания и необходимость применения специальных устройств для фиксации переключаемого узла в заданной позиции.

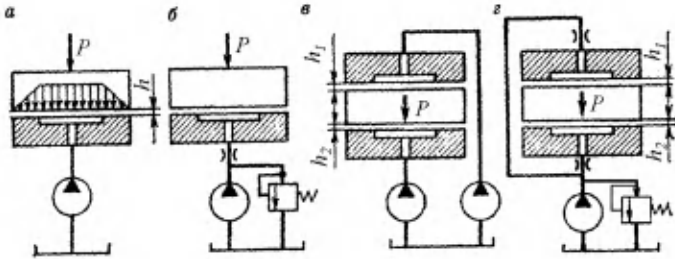


Рис. 2.9

Схемы гидростатических направляющих:

а, б — открытых; в, г — замкнутых.

Иногда в станках применяются *аэростатические* направляющие, предусматривающие создание воздушной подушки в зазоре между сопряженными поверхностями направляющих.

Наряду с направляющими скольжения в станках применяются *направляющие качения*, которые подобно направляющим скольжения могут быть закрытыми и открытыми. Схемы наиболее распространенных форм направляющих качения приведены на рисунке 2.10.

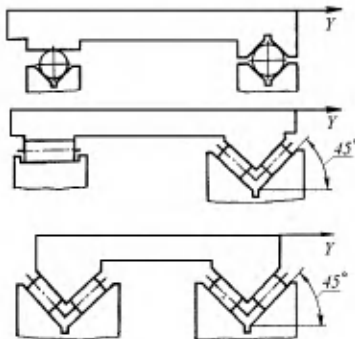


Рис. 2.10

Схемы форм направляющих качения

Направляющие качения имеют хорошие характеристики трения, равномерность и плавность движения при малых скоростях, точность установочных перемещений. Они длительно сохраняют точность, обеспечивают малое тепловыделение. Их просто смазывать. Недостатком таких направляющих является высокая стоимость и трудоемкость изготовления, пониженное демпфирование, повышенная чувствительность к загрязнениям.

По принципу организации перемещения тел качения направляющие бывают с закрепленными осями роликов со свободным перемещением тел качения (применяются при небольших величинах перемещений) или с возвратом тел качения (применяются при больших перемещениях) (рис. 2.11).

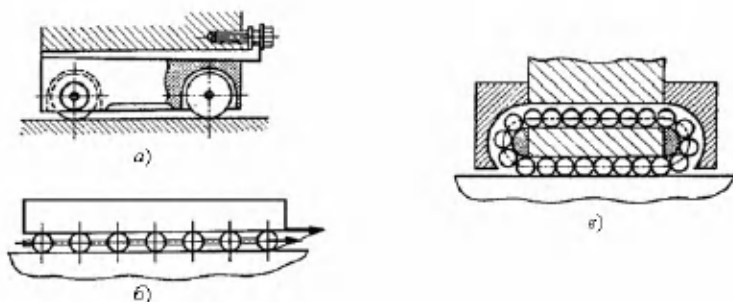


Рис. 2.11

Основные схемы направляющих качения:

*a* — на роликах с закрепленными осями; *б* — с потоком тел качения; *в* — с возвратом тел качения.

**Приводы станков** — это узлы, служащие для приведения в действие исполнительных органов станка. Они должны обеспечивать возможность регулирования скорости движения исполнительного органа. Приводы станков подразделяются на бесступенчатые и ступенчатые.

К бесступенчатым приводам относятся приводы с механическими вариаторами, электродвигателями постоянного тока с регулируемой частотой вращения, асинхронные регулируемые электродвигатели, гидравлические двигатели или комбинированные, представляющие собой сочетание регулируемого электродвигателя постоянного тока или привода с вариатором и ступенчатой коробки скоростей, или наоборот, механического вариатора с многоступенчатым асинхронным электродвигателем переменного тока.

В станках с числовым программным управлением применяются, как правило, бесступенчатые приводы на базе электродвигателей постоянного тока.

К ступенчатым относятся приводы со ступенчатыми шкивами, шестеренчатыми коробками скоростей и многоскоростными асинхронными электродвигателями. Возможны ступенчатые приводы, являющиеся комбинацией приведенных выше механизмов.

Источником движения в станках обычно является электродвигатель. Современные металлорежущие станки имеют одно- или многодвигательные приводы. Наиболее часто применяются приводы с шестеренчатыми коробками скоростей. Их достоинством является компактность, удобство в управлении и надежность в работе. К недостаткам таких коробок следует отнести невозможность бесступенчатого регулирования и низкий КПД на высоких частотах вращения при широком диапазоне регулирования. Разновидности переключения скоростей, применяемые в шестеренчатых коробках, приведены на рисунке 2.12.

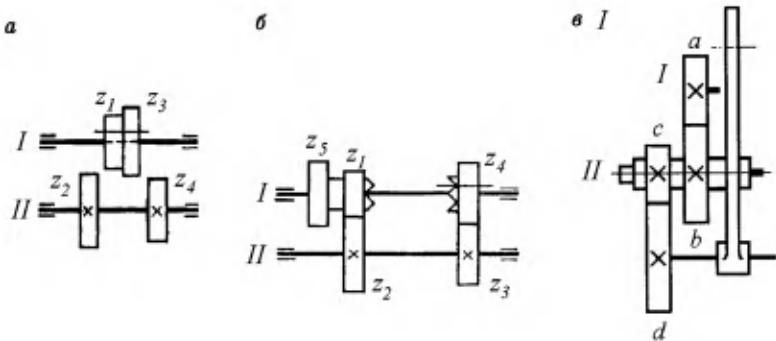


Рис. 2.12

Варианты переключения скоростей в шестеренчатых коробках:

*a* — передвижными (скользящими) колесами; *b* — кулачковыми, фрикционными и электромагнитными муфтами; *v* — сменными зубчатыми колесами.

Основными кинематическими характеристиками привода являются: пределы регулирования, т. е. минимальные и максимальные значения чисел оборотов или подач ( $n_{\min}$ ,  $S_{\min}$ ;  $n_{\max}$ ,  $S_{\max}$ ); количество различных скоростей или подач ( $Z_n$ ;  $Z_S$ ); количество кинематических групп, обеспечивающих регулирование  $p$ ; число передач в каждой кинематической группе  $P$ .

Сравнительные характеристики вариантов переключения приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5

## Характеристика вариантов переключения скоростей

Тип коробки	Достоинства	Недостатки
1. С передвижными колесами	Передача больших крутящих моментов при наибольших размерах колес; рациональная нагрузка колес и малый их износ	Невозможность переключения на ходу; невозможность использования косозубых колес; необходимость блокировки для исключения возможности включения сразу двух колес
П2. Кулачковые муфты	Малые осевые перемещения при переключении; возможность использования косозубых колес	Повышенный износ из-за постоянного зацепления; невозможность переключения на ходу
3. Фрикционные муфты и электрические магнитные муфты	Возможность быстрого и плавного переключения на ходу	Потери мощности. Износ колес; большие радиальные и осевые размеры; снижение КПД из-за трения при переключении
4. Со сменными колесами	Простота и низкая стоимость	Сложность наладки и потери времени на наладку

Схема привода главного движения представлена на рисунке 2.13. Привод имеет 3 кинематические группы регулирования: группа 1 (между валами II и III) имеет 3 передачи  $P_1 = 3$ ; группа 2 (между валами III и IV) имеет 2 передачи  $P_2 = 2$ ; группа 3 (между валами IV и V) имеет 2 передачи  $P_3 = 2$ . Общее число различных частот вращения определяется как произведение числа передач в группах

$$Z = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 = 12.$$

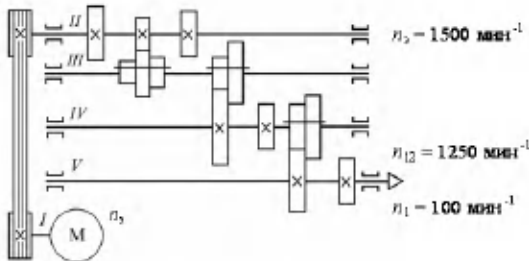


Рис. 2.13

Схема привода главного движения

Важной характеристикой привода является диапазон регулирования, определяемый по формулам

$$R_n = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}; R_S = \frac{S_{\max}}{S_{\min}},$$

где  $n_{\max}$ ,  $n_{\min}$ ,  $S_{\max}$ ,  $S_{\min}$  — пределы регулирования частот вращения и подач.

Числовые значения частот вращения или подач внутри пределов регулирования рассчитываются по закону геометрической прогрессии со знаменателем  $i$ , т. е. при расчете числовых значений пользуются формулами:

$$n_1 = n_{\min}; \quad n_2 = n_1 \cdot i; \quad n_3 = n_2 \cdot i = n_1 \cdot i^2; \\ n_4 = n_3 \cdot i = n_1 \cdot i^3; \quad n_z = n_{z-1} \cdot i = n_1 \cdot i^{z-1}.$$

Значения  $i$  стандартизованы. За минимальное значение принято

$$i_{\min} = \sqrt[40]{10} = 1,06.$$

Другие значения знаменателей прогрессии являются производными от возведения  $i_{\min}$  в какую-либо степень. Такой подход при проектировании ступенчатых приводов удобен тем, что удовлетворяет принципам «удешевления» и «удвоения» величин скоростей и подач для кинематического проектирования промежуточных передач.

В приводах станков с ЧПУ применяются, в основном, электродвигатели с регулируемой частотой вращения, шаговые электродвигатели, беззачерные кинематические передачи, передачи винт-гайка качения. Для обеспечения точности формообразующих движений используются системы обратной связи.

В таблице 2.6 приведены основные варианты кинематических схем приводов подач линейного перемещения, применяемые в станках с ЧПУ. Применяются как приводы без обратной связи (разомкнутые), так и с обратной связью (замкнутые). Разомкнутые приводы строятся на основе силовых или несиловых шаговых двигателей (ШД). В последнем случае ШД используются в комплекте с гидроусилителем (ГУ) — схема *a*. В этом случае возможна погрешность действительного положения рабочего органа (РО) из-за погрешностей обработки шаговых двигателей, гидроусилителей или передаточных механизмов привода.

Замкнутые приводы подач обеспечивают контроль перемещения рабочего органа. Применяются различные варианты контроля. Так, в схеме *b* между электродвигателем М и ходовым винтом З установлен редуктор 2, передаточное

отношение которого выбирается исходя из того, что при номинальной частоте вращения ротора должна быть наибольшая подача. Датчик обратной связи (круговой измерительный преобразователь ИП) соединен с двигателем через пару зубчатых колес.

Таблица 2.6

**Основные варианты кинематических схем приводов подач станков с ЧПУ**

Тип привода	Кинематическая схема	Тип датчика обратной связи
Редукторный	<p><i>а</i></p>	Нет
	<p><i>б</i></p>	Круговой, соединен с валом электродвигателя
	<p><i>в</i></p>	Круговой, соединен с ходовым винтом
	<p><i>г</i></p>	Круговой, соединен с рабочим органом
	<p><i>д</i></p>	Линейный, соединен с рабочим органом
	<p><i>е</i></p>	Круговой, соединен с валом электродвигателя
Безредукторный	<p><i>ж</i></p>	Круговой, соединен с ходовым винтом

Продолжение табл. 2.6

Тип привода	Кинематическая схема	Тип датчика обратной связи
Безредукторный		Линейный, соединен с рабочим органом

В приводе по схеме *в* производится косвенное измерение перемещения рабочего органа с помощью кругового измерительного преобразователя, присоединенного непосредственно к ходовому винту. По данному варианту требуется высокая точность изготовления пары винт-гайка.

В приводе по схеме *г* круговой измерительный преобразователь измеряет непосредственно перемещение рабочего органа через реечную передачу. В данном случае погрешность вносится только из-за неточности изготовления реечной передачи.

В приводе по схеме *д* используется линейный измерительный преобразователь. Такая система позволяет измерять непосредственное перемещение рабочего органа и охватить обратной связью передаточные механизмы подачи, обеспечивая высокую точность.

В приводе по схеме *е* измерительный преобразователь связан с рабочим органом через редуктор. В приводе по схеме *з* использован линейный измерительный преобразователь, фиксирующий перемещение рабочего органа. В приводе по схеме *ж* вал двигателя *М* через муфту *1*, имеющую высокую крутильную жесткость, соединен с ходовым винтом *2*, непосредственно к которому присоединен круговой измерительный преобразователь.

Применение высокомоментных электродвигателей позволяет предельно упростить кинематическую схему станка, что особенно важно для зубообрабатывающих станков с ЧПУ.

**Шпиндельные узлы** предназначены для передачи вращательного движения и крутящего момента от приводов коробок скоростей к инструменту или заготовке, закрепленным в шпинделе, и являются одними из основных узлов металлорежущего станка. Работоспособность и длительное сохранение точности шпиндельного узла в значительной мере определяет технический уровень станка. К шпиндельным узлам предъявляются следующие основные требования:

- точность вращения, определяемая радиальным и осевым биением посадочного конца шпинделя;
- виброустойчивость, особенно у скоростных станков;
- износоустойчивость трущихся поверхностей, высокий ресурс работы с сохранением точности;
- высокая жесткость и способность реализации больших мощностей резания.

Шпиндельный узел состоит из корпуса шпинделя и подшипниковых опор. Современным является шпиндельный узел гильзовой конструкции, у которого корпус выполнен в виде цилиндрической гильзы, устанавливаемой в отверстие передней бабки станка.

Шпиндели изготавливают из стали 45 с закалкой или из стали 20ХС с цементацией и закалкой, а также из азотируемой стали 38ХМЮА. Рабочие поверхности и посадочные шейки под подшипники должны иметь высокую твердость  $HRC \geq 60$  и высокую износоустойчивость. Конструктивное оформление шпиндельных узлов разнообразно, так как их компоновка связана с компоновкой всего станка. В прецизионных станках (токарных, координатно-расточных и др.) стремятся выделить шпиндель в самостоятельный узел, отделив его от коробки скоростей для уменьшения влияния последней на точность вращения шпинделя. В многшпиндельных станках расположение шпинделя зависит от положения в пространстве оси  $X-X$  и расположения по отношению к ней осей вращения шпинделей  $Z-Z$ .

В качестве опор шпиндельных узлов применяются подшипники качения или скольжения. Так как от шпинделя требуется высокая точность, то подшипники качения должны быть высоких классов точности. На рисунке 2.14 приведен пример шпиндельного узла на опорах качения, состоящих из роликовых радиальных и шарикового упорного подшипников качения.

Выбор класса точности подшипников определяется допуском на биение переднего конца шпинделя. Обычно в передней опоре применяют более точные подшипники, чем в задней.

На конструкцию шпинделя существенное влияние оказывают расстояние от переднего конца до передней опоры —  $a$ , расстояние между опорами —  $l$ , посадочные диаметры под подшипники  $d$ , наличие центрального отверстия  $d_0$ .

Подшипники скольжения, применяемые в качестве опор шпинделей, бывают нерегулируемые (применяются

редко), регулируемые с радиальным и осевым регулированием зазора, гидростатические, гидродинамические и с газовой смазкой.

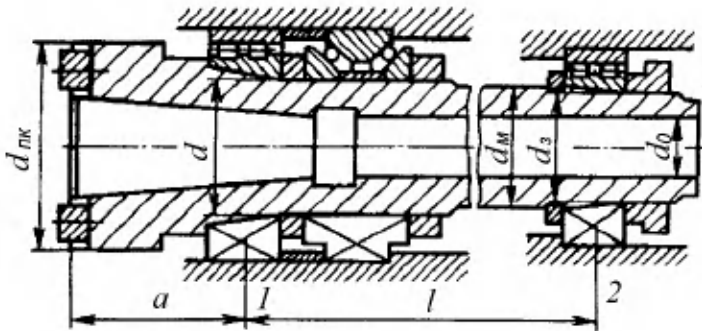


Рис. 2.14

*Шпиндельный узел на опорах качения*

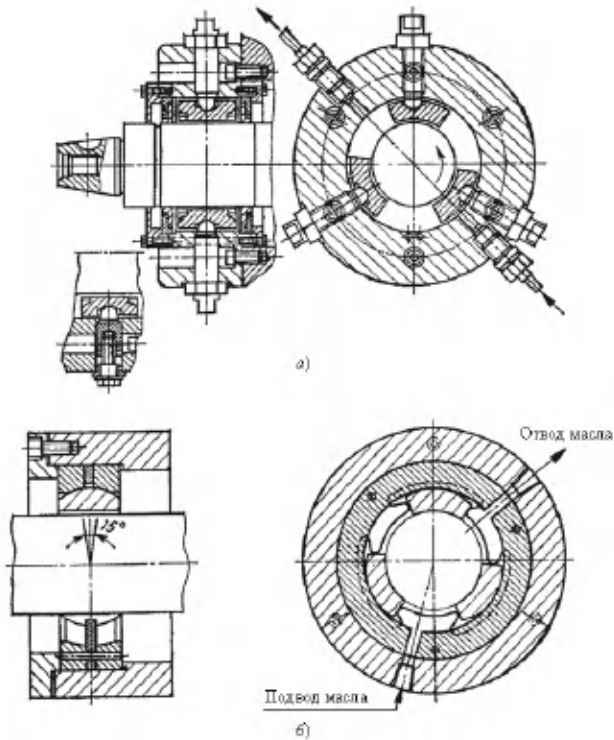
Вкладыши подшипников скольжения изготавливаются из баббитов марок Б83, Б16, БН и из свинцовистых бронз типа БрС30. Для ответственных подшипников применяются оловянистые бронзы марок БрОФ 6,5–0,15 и БрОЦС 5–6,5. В подшипниках скольжения осуществляется жидкостное трение за счет создания слоя масла, находящегося под определенным давлением.

В последние годы в шпиндельных узлах станков широко применяются гидродинамические (рис. 2.15) и гидростатические (рис. 2.16) подшипниковые опоры. Принципы образования смазочного слоя в данных подшипниковых опорах аналогичны гидродинамическим и гидростатическим направляющим.

Конструкции гидростатических подшипников весьма разнообразны. Из всех конструкций выделяют два основных типа — осевые (рис. 2.16а) и радиальные (рис. 2.16б). Принцип их действия аналогичен. Различие состоит в конструкции карманов, в которые подается смазочная жидкость. У осевых опор подъемная сила зависит от площади кольцевого канала, а у радиальных — от соотношения размера карманов и опорных перемычек.

Исследования показали, что гидростатические и гидродинамические подшипники могут обладать высокой жесткостью и большой несущей способностью. Однако при высо-

ких скоростях скольжения область применения подшипников с жидкостным трением снижается, так как в смазочном слое возрастает тепловыделение и возрастает момент трения. В связи с этим большой интерес представляет применение подшипников с газовой смазкой (аэродинамические подшипники). Малая вязкость воздуха уменьшает потери на трение и, соответственно, тепловыделение, поэтому не требуется специальных устройств для отвода тепла, кроме вентиляции. В настоящее время разработаны электрошпиндели на аэродинамических опорах с частотой вращения до 2400 об/с, которые применяются в специальных станках. Большие перспективы применения имеют электрошпиндели на управляемых магнитных опорах.



**Рис. 2.15**

*Конструкция гидродинамического подшипника скольжения:*

- а* — с поворотом опорных башмаков на сферических опорах; *б* — с поворотом относительно втулки опорных башмаков.

Важной характеристикой шпиндельных опор является скоростной параметр — произведение частоты вращения вала на диаметр шейки шпинделя. В таблице 2.7 приведены значения наивысших точностных характеристик и скоростного параметра для различных типов опор.

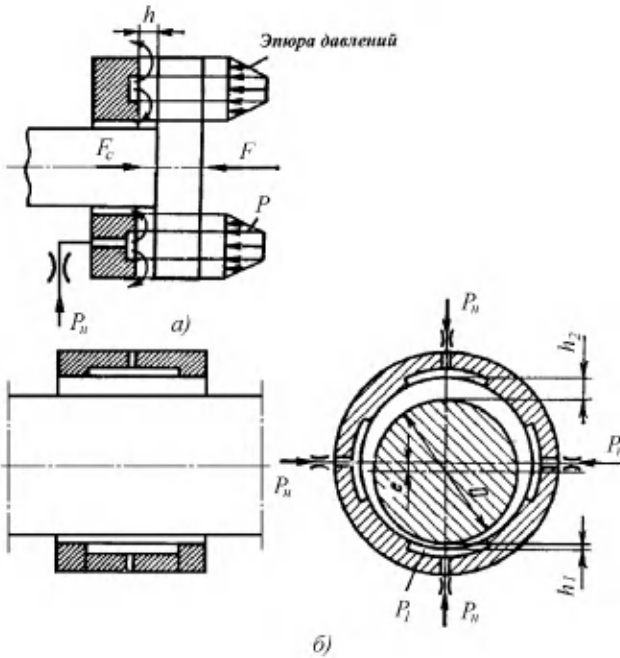


Рис. 2.16

Конструкция гидростатического подшипника:

*a* — осевая опора; *б* — радиальная опора.

Таблица 2.7

**Точностные характеристики и скоростные параметры подшипниковых опор**

Тип опоры	Радиальное и осевое биение, мкм	Отклонение от круглости шейки, мкм	Скоростной параметр $d \cdot n \cdot 10^5$
1. Качения	1,0	1,0	0–10

Продолжение табл. 2.7

Тип опоры	Радиальное и осевое биение, мкм	Отклонение от круглости шейки, мкм	Скоростной параметр $d \cdot n \cdot 10^5$
2. Гидродинамическая	0,5	0,5	1–10
3. Гидростатическая	0,05	0,2	0–15
4. Аэростатическая	0,1	0,5	5–40

## 2.4. ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИМИ СТАНКАМИ

С точки зрения управления любой станок можно рассматривать как технологический комплекс механизмов, действующих автономно и связанных между собой лишь управлением. При ручном управлении станком включение и выключение всех механизмов производится либо станочником (оператором), либо конечными выключателями.

Станки с **ручным управлением** применяются в основном в единичном и мелкосерийном производстве. *Ручное управление* упрощается, увеличивая производительность станков, за счет применения регулируемых упоров, которые заранее настраиваются и ограничивают величину перемещения рабочих органов, соответствующую рабочему ходу инструмента. Упоры широко применяются при управлении токарно-револьверными станками. Вторым способом повышения эффективности ручного управления является применение устройств цифровой индикации и управления. Схема такого устройства приведена на рисунке 2.17.

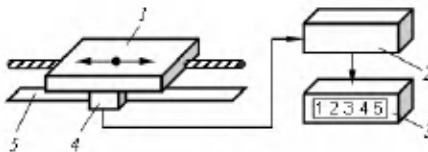


Рис. 2.17

Схема устройства цифровой индикации:

- 1 — перемещающийся орган станка; 2 — блок обработки информации (счетчик);  
3 — цифровое табло; 4 — датчик линейных перемещений; 5 — индуктивная линейка.

При перемещении рабочего органа станка 1 (стола, суппорта, шпиндельной бабки) подвижная часть 4 измерительного преобразователя, связанная с рабочим органом, проходя относительно неподвижной части 5 измерительного преобразователя, преобразует перемещения в пропорциональное ему число импульсов, которые поступают в счетчик 2 и индицируются на цифровом табло 3. Начало отсчета может быть совмещено с любой точкой контролируемого перемещения путем установки счетчика в нуль. В качестве измерительного преобразователя применяются импульсные фотоэлектрические и фазовые датчики (сельсины и индуктосины).

При **автоматическом управлении** станком должны быть решены следующие задачи:

- управление траекторией движения исполнительных органов при использовании простых движений в качестве внутреннего источника информации о положении узла станка;
- программирование и контроль перемещения рабочих органов станка;
- задание и отработка исходных (основных и промежуточных) положений рабочих органов станка;
- получение информации, корректирующей по каким-либо параметрам исходную информацию управления;
- задание цикловых команд (оптимальной скорости перемещения, направления и последовательности движений, выполнения стандартных самостоятельных циклов).

В зависимости от способов организации решения этих задач, видов программносителей для управления металлорежущими станками, применяются следующие *основные системы*:

- кулачковые системы с распределительным валом;
- копировальные системы;
- цикловые системы программного управления;
- системы числового программного управления.

В *кулачковых системах управления* (рис. 2.18) в качестве программносителя используются специальные кулачки, определяющие величины перемещений исполнительных органов станка.

Суммирование или синхронизация движений происходит за счет установки и закрепления кулачков на общем распределительном валу. При вращении вала движение от рабочих профилей кулачков через рычаги и толкатели передается на исполнительные органы, осуществляющие

сложное формообразование. Кулачковые системы относятся к незамкнутым системам механического типа, т. к. отсутствует информация о фактическом местонахождении исполнительных органов.

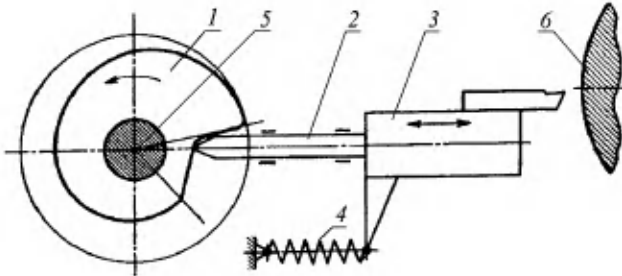


Рис. 2.18

*Управление с кулачковым приводом:*

- 1 — кулачок; 2 — толкатель; 3 — исполнительное устройство (суппорт станка);  
4 — пружина; 5 — распределительный вал; 6 — обрабатываемая заготовка.

За один оборот распределительного вала совершается полный цикл обработки. Изменяя профиль кулачков, можно получить любой закон движения исполнительных органов. Кулачки управляют и вспомогательными цикловыми командами (подача материала, смена инструмента и др.).

Кулачковые системы с распределительным валом очень надежны, станки имеют жесткую конструкцию и обеспечивают высокую точность обработки деталей. Применяются, в основном, для управления токарными прутковыми автоматами.

*Копировальные системы управления* аналогичны кулачковым, но в этом случае копир можно рассматривать как кулачок, развернутый на одну плоскость (рис. 2.19) или несколько плоскостей (например, при обработке пера лопатки).

Вместо распределительного вала применяются крестовый суппорт (при токарной обработке) или крестовый стол (при фрезерной обработке), обеспечивающие продольную подачу синхронно с поперечной, получаемой от копира, являющегося программносителем.

*Цикловые системы управления* характерны тем, что управляющая программа работы станка не содержит информации о величине перемещения рабочих органов, а содержит только команды на направление и последовательность включения и выключения отдельных устройств

станка (цикловые команды) и указания о величине подачи, скорости резания и т. д. (технологические команды). Структурная схема цикловой системы управления приведена на рисунке 2.20.

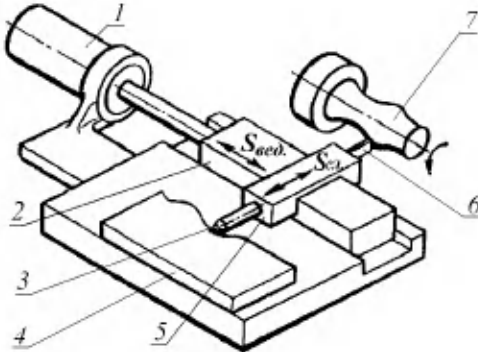


Рис. 2.19

Копировальная система управления:

1 — гидроцилиндр; 2 — продольная каретка; 3 — щуп; 4 — копир; 5 — поперечная каретка; 6 — резец; 7 — обрабатываемая заготовка.

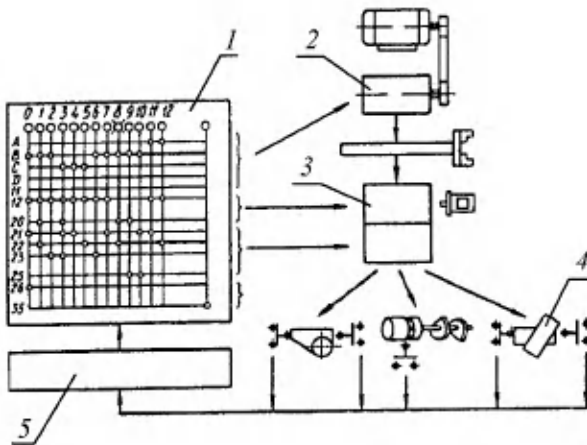


Рис. 2.20

Структурная схема цикловой системы управления:

1 — устройство задания и ввода программы; 2 — коробка скоростей; 3 — коробка подач; 4 — исполнительные органы; 5 — блок контроля выполнения этапа программы и подачи сигналов.

Величина требуемых перемещений инструмента или детали обеспечивается при помощи расстановки упоров, кулачков, копиров, а программноноситель содержит лишь цикловые и технологические команды.

Устройство задания программы выполняется чаще всего в виде штекерной наборной или кнопочной панели, а устройство поэтапного ввода программы — в виде шагового искателя или счетно-релейной схемы. Штекерные панели представляют собой систему горизонтальных и вертикальных шин. Система горизонтальных шин определяет программируемые параметры, а система вертикальных шин — этапы программы работы станков. Несмотря на низкую стоимость, простоту организации выпуска, цикловые системы не нашли широкого применения, так как требуют ручного труда при перепрограммировании работы станка.

Особенностью *числового программного управления* (ЧПУ) является то, что с помощью определенных символов (знаков, чисел и букв в соответствии с ГОСТ 20999-83) в системах ЧПУ создаются информационные потоки и строятся информационные модели технологической операции. Эти модели описывают все процессы формообразования поверхностей детали на станке, а также позиционирование и организацию состояний любых объектов, связанных с работой станка (промышленного робота, магазина инструментов, накопителя заготовок и т. д.). Эти задачи другие системы управления решить не могут.

В зависимости от сложности системы ЧПУ в нее закладывается при проектировании и изготовлении или вводится программным обеспечением различное число алгоритмов. Системы ЧПУ по технологическому признаку подразделяются на позиционные, контурные, адаптивные и системы группового управления.

Позиционные системы ЧПУ применяются для управления станками, в которых перемещение рабочих органов осуществляется в заданные точки, однако сама траектория перемещения не отслеживается. Это относится к станкам сверлильной и расточной групп для обработки деталей с большим числом отверстий.

Контурные системы ЧПУ управляют станками, у которых перемещение рабочих органов происходит по заданной траектории с заданной скоростью для получения необходимого контура обработки. Такой режим управления характерен для токарных, фрезерных, электроэрозионных и других станков. Для обработки плоских деталей применяются

двухкоординатные системы, а для объемных деталей — трехкоординатные.

Адаптивные системы ЧПУ обеспечивают автоматическую подстройку процесса резания к изменяющимся условиям обработки с поддержанием режимов обработки по заданным критериям или производительности.

Групповое управление — числовое программное управление группой станков от ЭВМ, имеющей общую память для хранения управляющих программ, распределяемых по запросам от станков.

В соответствии со структурами приводов главного движения и приводов подач системы ЧПУ строятся по разомкнутому или замкнутому принципам обработки информации.

В разомкнутых системах ЧПУ (рис. 2.21а) формируется только один поток информации, направленный от считывающего устройства к исполнительному органу станка. Сответствие действительного перемещения исполнительного органа заданному в этих системах не контролируется.

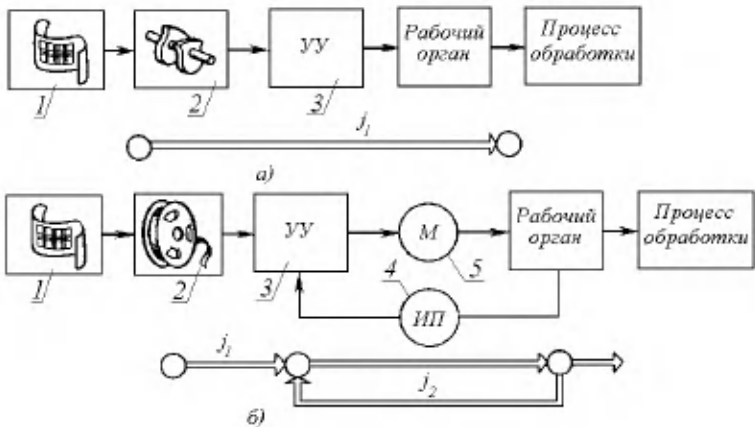


Рис. 2.21

Структурные схемы систем ЧПУ:

- 1 — расчетно-технологическая карта; 2 — управляющая технологическая программа; 3 — устройство управления; 4 — измерительный преобразователь; 5 — источник движения.

В замкнутых системах ЧПУ (рис. 2.21б) существуют два потока информации: один из считывающего устройства, устройства управления 3 до рабочего органа, другой от

датчика обратной связи и, расположенного на рабочем органе, в устройство управления 3 для коррекции начальной информации.

В сравниваемом блоке устройства управления эти потоки информации сопоставляются и при наличии рассогласования между ними на выходе устройства управления появляется соответствующий корректирующий сигнал на исправление положения исполнительного органа.

В настоящее время подготовка управляющих программ для станков с ЧПУ производится с помощью систем автоматизированного программирования (САП), которые входят в состав задач автоматизированных систем технологической подготовки производства. На рисунке 2.22 приведена последовательность разработки управляющей программы автоматизированным методом.



Рис. 2.22

*Последовательность автоматизированной разработки управляющих программ для станков с ЧПУ*

Система автоматизированного программирования представляет собой программно-математическое обеспечение, выполняющее функции обработки информации. САП

разделяются на универсальные, рассчитанные на широкую гамму станков, и специализированные, предназначенные для программирования станков определенной модели или станков, оснащенных определенными системами ЧПУ. Автоматизация программирования позволяет существенно снизить затраты на подготовку управляющих программ.

## 2.5. КОНСТРУКЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ ОСНОВНЫХ ГРУПП МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

### 2.5.1. Токарные станки

На токарных станках обрабатываются детали «тела вращения». Выбор типов станков зависит от типа производства и габаритных размеров деталей.

Обработка деталей в условиях крупносерийного и массового производства выполняется на токарных полуавтоматах и автоматах. Пример классификации токарных полуавтоматов и автоматов приведен на рисунке 2.23.

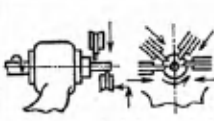
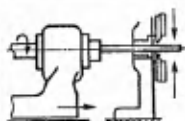
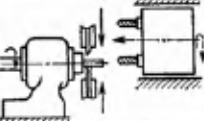
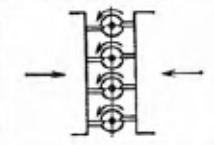
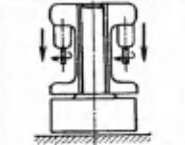
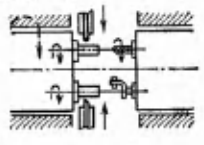
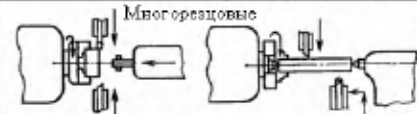
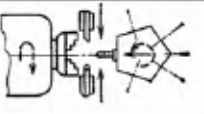
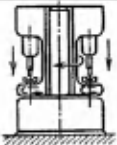
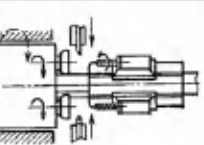
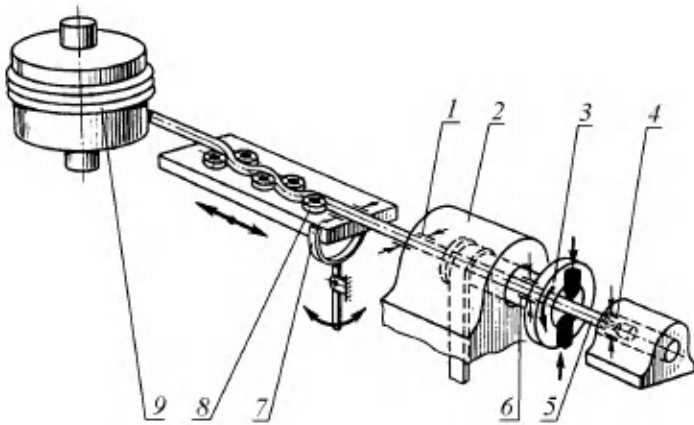
Тип станка		Вид работы		
		Фасонно-отрезные	Продольно-фасонные	Последовательные револьверные
Автоматы	Одношпиндельные			
	Многошпиндельные			
Полуавтоматы	Одношпиндельные	Многоотрезковые 		
	Многошпиндельные			

Рис. 2.23

Пример классификации токарных полуавтоматов и автоматов

**Фасонно-отрезные автоматы** применяются для обработки простых деталей небольшой длины. Схема работы фасонно-отрезных автоматов приведена на рисунке 2.24. Особенностью этих автоматов является то, что ни проволока (заготовка), ни шпиндельная бабка в процессе обработки перемещения не имеют.



**Рис. 2.24**

*Схема работы фасонно-отрезного автомата:*

1 — задний зажим; 2 — шпиндельная бабка; 3 — резцовая головка; 4 — передний зажим; 5 — заготовка; 6 — средний зажим; 7 — салазки; 8 — ролики; 9 — бунт.

Обработка производится методом врезания и отрезки полученной детали вращающимися фасонными, отрезными и другими резцами, установленными в резцовой головке 3 и имеющими поперечную подачу. После отрезки готовой детали заготовка разжимается и подается в зажимное устройство для обработки следующей детали. После подачи заготовка зажимается в трех местах: передним 4, задним 1 и средним 6 зажимами. При отходе салазок 7 назад после зажима заготовки часть заготовки, смотанная из бунта, правится правящими роликами 8. Фасонно-отрезные автоматы могут обрабатывать детали из прутка или трубы без использования бунта.

На **автоматах продольного точения** обрабатываются детали, имеющие соотношение длины  $d$  к наружному диаметру  $l/d$  больше трех. На этих автоматах может быть

выполнено значительно большее число различных технологических операций и переходов, чем на фасонно-отрезных автоматах. Схема работы автомата продольного точения приведена на рисунке 2.25.

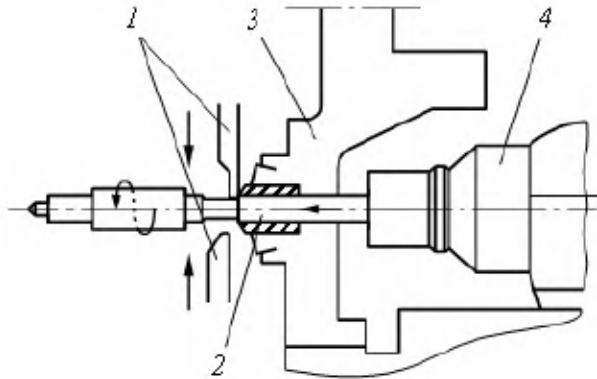


Рис. 2.25

*Схема работы автомата продольного точения:*

*1 — резцы; 2 — пруток; 3 — люнет; 4 — шпиндельная бабка.*

Резцы 1 устанавливаются в поперечных суппортах, имеющих только поперечную подачу. Продольная подача реализуется за счет выдвижения прутка 2 через люнет 3, воспринимающий силы резания и предохраняющий заготовку от прогиба, что обеспечивает высокую точность обработки.

При сочетании продольной подачи прутка и поперечной подачи инструментов, расположенных на поперечных суппортах, можно обрабатывать детали сложной конфигурации. Продольная подача прутка осуществляется перемещением шпиндельной бабки 4 или пиноли шпинделя в зависимости от модели автомата.

С помощью дополнительных приспособлений на автомате можно выполнять сверление, нарезание резьбы, прорезку шлицев и другие операции. Все рабочие и холостые ходы инструментов осуществляются от кулачков, расположенных на распределительном валу.

На **токарно-револьверных одношпиндельных автоматах** обрабатываются малогабаритные детали с соотношением длины к диаметру  $l/d$  меньше трех. Схема работы такого автомата приведена на рисунке 2.26.

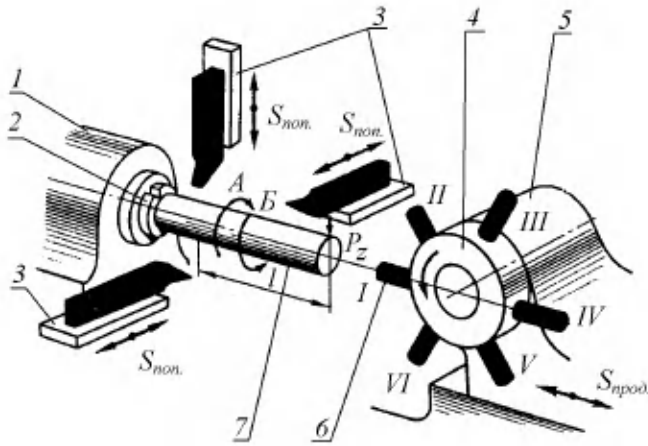


Рис. 2.26

Схема работы токарно-револьверного автомата:

- 1 — шпиндельная бабка; 2 — шпиндель; 3 — поперечные суппорты;  
 4 — револьверная головка; 5 — продольный револьверный суппорт; 6 — упор для  
 подачи прутка; 7 — пруток.

В отличие от автоматов продольного точения шпиндельная бабка 1 токарно-револьверного автомата установлена на станине жестко и продольного перемещения не имеет. Шпиндель автомата 2 имеет два вращения: правое *Б* (против часовой стрелки) — применяется для свинчивания резьбонарезного невращающегося инструмента и левое *А* (по часовой стрелке) — применяется для точения и нарезания резьбы невращающимся инструментом. Токарно-револьверные автоматы имеют несколько поперечных суппортов 3 для протачивания канавок, обработки фасонных поверхностей, отрезки деталей и других видов обработки, требующих поперечной подачи, и один продольный суппорт 5 с револьверной головкой для размещения различных инструментов (поз. *I–VI*), обрабатывающих заготовки с продольными подачами. Применение значительного количества инструментов позволяет обрабатывать довольно сложные детали, а применение специальных приспособлений существенно расширяет технологические возможности этих станков.

**Многошпиндельные прутковые автоматы** применяются при обработке деталей в условиях массового производства. Схема работы автомата приведена на рисунке 2.27. Автомат

представляет собой блок шпинделей 1 с прутками материала, расположенными по окружности. Вокруг этого блока размещены поперечные суппорты 2 с инструментами, работающими с поперечными подачами, а в центральной гильзе 4 расположен общий для всех шпинделей инструментальный суппорт 5, на гранях которого устанавливаются инструменты, работающие с продольной подачей. Поперечные суппорты управляются от индивидуальных кулачков, а продольный суппорт — от одного общего кулачка. В случае необходимости на продольном суппорте могут устанавливаться скользящие державки с режущими инструментами, получающими другую подачу от индивидуальных кулачков. Здесь же могут устанавливаться инструментальные шпиндели с независимым приводом вращения.

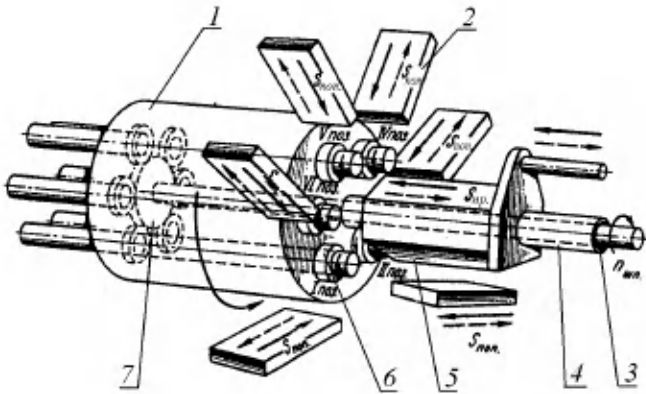


Рис. 2.27

Схема работы многошпиндельного пруткового автомата:

- 1 — шпиндельный блок; 2 — поперечные суппорты; 3 — приводной вал; 4 — центральная гильза; 5 — продольный суппорт; 6 — привод вращения шпинделей; 7 — центральное зубчатое колесо.

Шпиндели автомата имеют одинаковую скорость вращения, так как у них общий привод 6. При обработке заготовок операция разбивается равномерно по позициям. Обработка производится при последовательном прохождении заготовки через все позиции с отрезкой обработанной детали и подачей прутка для изготовления следующей детали. Подача заготовок с одной позиции на другую производится при периодическом повороте шпиндельного блока на одну позицию. Во время обработки шпиндельный блок стоит на месте зафиксированным.

На многошпиндельных патронных полуавтоматах обрабатываются детали из штучных заготовок. Автоматы выпускаются с горизонтальным и вертикальным расположением шпинделей, количество которых может быть шесть или восемь. Конструкция и характер работы горизонтальных патронных полуавтоматов аналогичны многошпиндельным прутковым автоматам. Значительное отличие в конструкции имеет практически только блок шпинделей. Это объясняется тем, что при обработке в патроне съём обработанных деталей и установка новой заготовки производятся в первой позиции при остановленном шпинделе. В этой позиции поперечного суппорта нет. Зажим и разжим патрона в загрузочной позиции производится гидроприводом. На горизонтальных многошпиндельных полуавтоматах обрабатываются детали типа «фланцев», «крышек», «круглых корпусов» средних габаритов.

Крупногабаритные детали из штучных заготовок обрабатываются на многошпиндельных вертикальных полуавтоматах. По принципу организации обработки деталей эти станки могут быть или последовательного, или параллельного действия. На рисунке 2.28 приведены схема работы вертикального многошпиндельного полуавтомата последовательного действия и положение съема готовой детали и установки новой заготовки.

Обработка заготовок на таком полуавтомате производится несколькими группами режущих инструментов, расположенных на суппортах 2. Заготовки, закрепленные в патронах, последовательно обходят обрабатывающие позиции путем периодического поворота стола на определенный угол  $\alpha$  относительно основания 5 и колонны 3, несущей на своих гранях продольные суппорты. Поперечных суппортов на этих станках нет. Для обеспечения поперечной подачи инструментов используют специальные суппорты, в которых продольное движение преобразуется в поперечное. Во время поворота стола вращение шпинделей прекращается. В загрузочной позиции (поз. I, рис. 2.28б) шпиндель не вращается. Здесь производится съём готовой детали и установка новой заготовки. Таким образом, за один оборот стола происходит полная обработка заготовки, и после каждого поворота стола на одну позицию снимается одна готовая деталь.

Вертикальные многошпиндельные автоматы параллельного действия представляют собой как бы блок одношпиндельных полуавтоматов, поставленных вертикально по окружности на общей карусели, которая при обработке

заготовки медленно вращается вокруг неподвижной колонны, установленной на основании. На каждой позиции полуавтомата имеется свой суппорт с одинаковым комплектом инструментов. Привод суппортов осуществляется от одной группы неподвижных кулачков при вращении карусели со всеми суппортами вокруг колонны. Съем готовой детали и установка новой заготовки на этих станках производится на ходу, когда очередная позиция со шпинделем проходит мимо рабочего в зоне загрузки. В момент подхода к этой зоне вращение шпинделя с деталью прекращается, а суппорт отходит в верхнее положение.

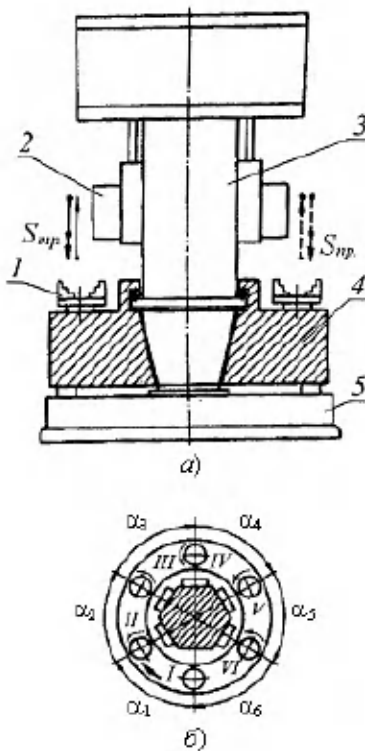


Рис. 2.28

Схема работы полуавтомата последовательного действия (а) и положение съема готовой детали установки новой заготовки (б):

1 — патрон для крепления заготовки; 2 — инструментальный суппорт; 3 — колонна; 4 — поворотный стол; 5 — основание; I-VI — номера позиций.

Имеется разновидность полуавтоматов параллельного действия, в которых вращение карусели происходит прерывисто с остановкой во время съема готовой детали и установки новой заготовки. Во время смены заготовки прекращается вращение шпинделя только на загрузочной позиции. На других позициях, благодаря индивидуальным приводам, вращение продолжается. Периодическая остановка карусели облегчает условия загрузки станка и упрощает его автоматизацию. Схема работы такого полуавтомата приведена на рисунке 2.29. По сравнению с полуавтоматами последовательного действия такие станки имеют меньшие технические возможности, так как обработка на них ведется инструментами, расположенными на одной позиции. Поэтому на них обрабатываются более простые заготовки.

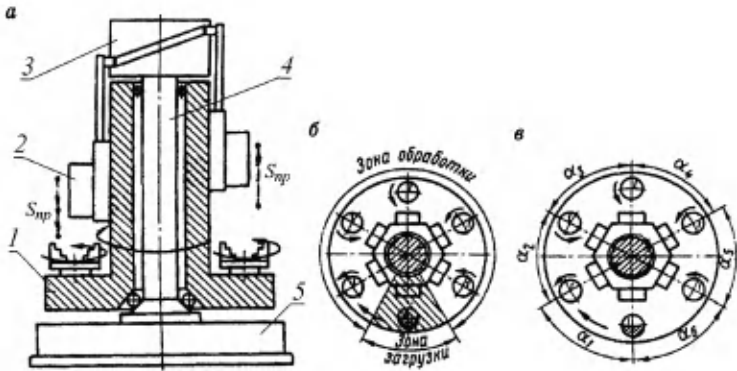


Рис. 2.29

Схема работы полуавтомата параллельного действия (а), с непрерывным вращением карусели (б) и периодическим вращением карусели (в):

1 — карусель; 2 — суппорт; 3 — кулачки; 4 — колонна; 5 — основание.

**Одношпиндельные токарные горизонтальные полуавтоматы** применяются в основном для обработки валов. В зависимости от принципа организации работы и управления их можно разбить на три группы: многорезцовые, копировальные и многорезцово-копировальные.

Обработка заготовок на многорезцовых полуавтоматах выполняется сравнительно большим количеством инструментов, работающих по одинаковым траекториям, так как они установлены на поперечном и продольном суппортах. Схема работы станка приведена на рисунке 2.30.

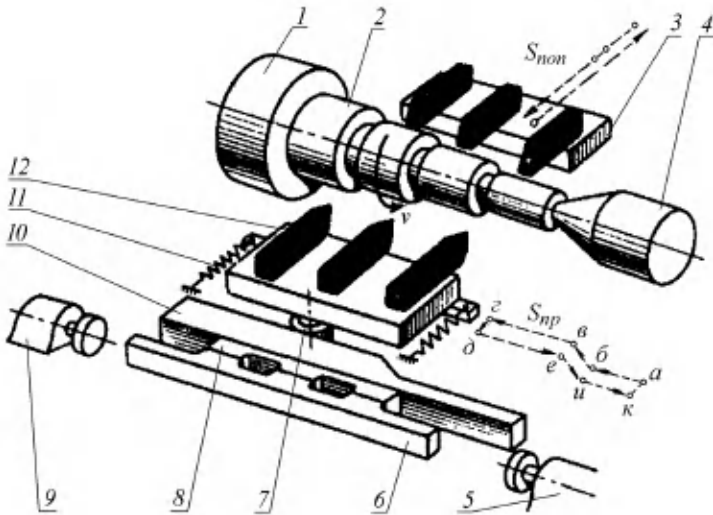


Рис. 2.30

Схема работы многорезцового полуавтомата:

- 1 — патрон передней бабки; 2 — заготовка; 3 — поперечный суппорт; 4 — центр задней бабки; 5 — правый упор; 6, 8 — планки; 7 — ролик; 9 — левый упор; 10 — неподвижная линейка; 11 — пружина; 12 — продольный суппорт.

Станок работает в полуавтоматическом цикле. Заготовка зажимается в патроне или в поводковом центре передней бабки и поджимается центром задней бабки. Управление сменой заготовки и пуском станка производится оператором. Дальнейшая работа выполняется автоматически. Продольный суппорт перемещается вместе с планками 6 и 8 относительно неподвижной линейки 10 и постоянно поджат к ней пружинами. При этом происходит обработка заготовки. В конце рабочего хода планка 6 наезжает на левый упор 9 и смещается относительно планки 8. При этом происходит «отскок» линейки 10 вместе с суппортом от заготовки на глубину впадины планки 8. В результате этого при отходе назад резцы не касаются обрабатываемой поверхности. После возвращения в исходное положение планка 6 нажимает на правый упор и линейка 10 с суппортом приходит в исходное положение. Поперечный суппорт имеет возвратно-поступательное перемещение со скоростью рабочей подачи при обработке заготовки и со скоростью быстрых перемещений при подходе к заготовке и отходе после обработки.

На копировальных полуавтоматах, в отличие от много-резцовых, основной профиль заготовки обрабатывается одним резцом. Схема работы полуавтомата приведена на рисунке 2.31.

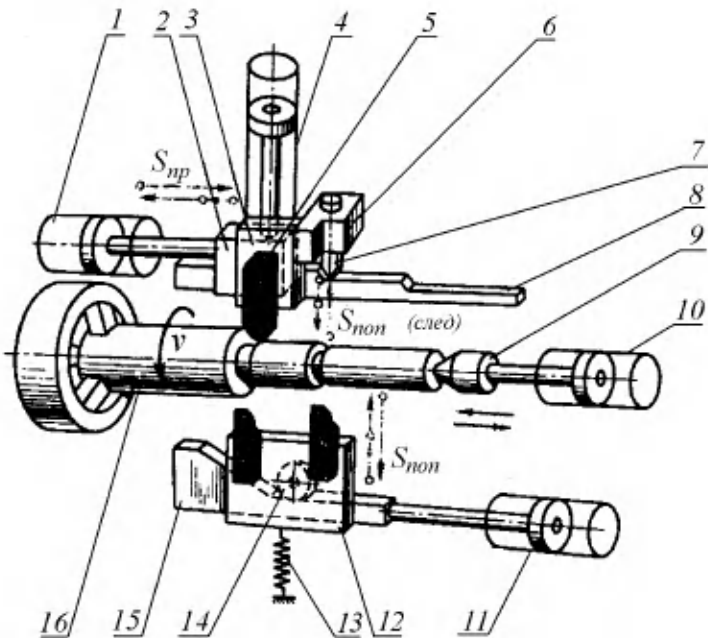


Рис. 2.31

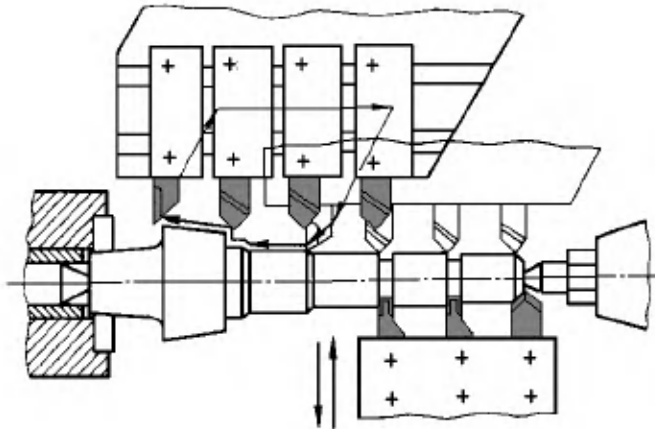
Схема работы копировального полуавтомата:

- 1 — гидроцилиндр продольной подачи; 2 — продольная каретка; 3 — копировальная головка; 4 — гидроцилиндр; 5 — резец; 6 — золотник копировальной головки; 7 — наконечник шупа; 8 — копир; 9 — пиньоль; 10, 11 — гидроцилиндр; 12 — поперечный суппорт; 13 — пружина; 14 — ролик; 15 — ползун; 16 — основной профиль заготовки.

Резец устанавливается на верхней части копировального суппорта 12, привод которого в продольном и поперечных направлениях осуществляется гидравлической следящей системой, управляемой по специальному копиру или эталонной детали. При этом резец точно воспроизводит на обрабатываемой детали форму и размеры копира, который должен соответствовать размерам детали. Доделочные переходы (прорезка канавок, снятие фасок и др.), которые не

могут быть выполнены с копировального суппорта, выполняются с поперечного суппорта, которых может быть один или два. Поперечная подача суппорта 3 производится от отдельного гидроцилиндра. Каждый суппорт имеет свой независимый цикл, управляемый по упорам.

Многорезцовые копировальные полуавтоматы по принципу работы во многом похожи на копировальные полуавтоматы и применяются для обработки деталей, имеющих фасонные поверхности, но используют преимущества многоинструментальной обработки. Обработка шеек производится одновременно несколькими инструментами (по количеству цилиндрических шеек детали), как на многорезцовом полуавтомате с копировального суппорта. Схема обработки заготовки блоком резцов приведена на рисунке 2.32. При обработке фасонной части остальные резцы в работе не участвуют. Доделочные операции выполняются с поперечного суппорта.



**Рис. 2.32**

*Схема обработки заготовки блоком резцов*

Для обработки деталей «тела вращения» в условиях мелкосерийного и серийного производства применяются токарно-винторезные, токарные, токарно-револьверные, токарно-лобовые и токарно-карусельные станки. Отечественной промышленностью выпускается широкая гамма

токарных станков. При этом наибольший диаметр обрабатываемых деталей колеблется от 95 до 12 500 мм при длине заготовки от 125 до 10 000 мм. Наибольшее распространение получили токарно-винторезные станки, предназначенные для выполнения самых разнообразных операций: обработка наружных и внутренних цилиндрических, конических, фасонных и торцевых поверхностей, нарезание наружных и внутренних резьб, отрезка, сверление, зенкерование и развертывание отверстий.

**Токарные станки** предназначены для выполнения различных токарных операций, за исключением нарезания резьбы резцами. В токарных станках главным движением является вращение заготовки, а движениями подачи — перемещение суппорта с резцом. Остальные движения являются вспомогательными.

Общий вид **токарно-винторезного станка**, на котором может осуществляться и нарезание резьбы резцами, приведен на рисунке 2.33. Такая компоновка является типичной для всех токарно-винторезных и токарных станков. Главными узлами станка являются: станина, передняя шпиндельная бабка, коробка подач, суппорт с резцедержателем, фартук, задняя бабка.

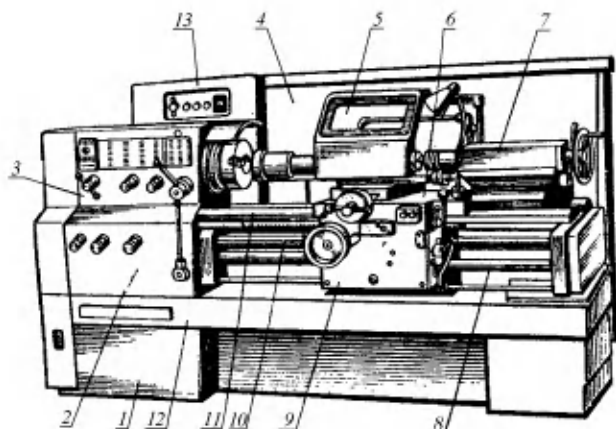


Рис. 2.33

Общий вид токарно-винторезного станка:

- 1 — основание; 2 — коробка подач; 3 — передняя бабка; 4 — защитный экран;  
 5 — щиток; 6 — суппорт; 7 — задняя бабка; 8 — ходовой вал; 9 — фартук;  
 10 — ходовой винт; 11 — станина; 12 — корыто; 13 — электрошкаф.

Станина 1 служит для монтажа основных узлов станка. Наиболее ответственной частью станины являются направляющие, по которым перемещаются каретка суппорта 6 и задняя бабка 7.

Передняя бабка 3 расположена на левом конце станины. В ней находится коробка скоростей, основной частью которой является шпиндель. В некоторых станках коробка скоростей размещается в передней тумбе станины. В этом случае со шпинделем она связана ременной передачей. Такие станки называются станками с разделенным приводом.

Коробка подач 2 служит для передачи вращения от шпинделя к ходовому валу 8 и ходовому винту 10 для обеспечения движений подачи инструментов. Различные скорости перемещения достигаются путем изменения передаточного отношения коробки подач.

Задняя бабка служит для поддержания обрабатываемой заготовки от прогиба при работе в центрах, а также для закрепления инструмента при обработке осевых отверстий (сверл, зенкеров, разверток) и нарезания резьбы (метчиков, плашек). Защитный экран 4 предохраняет распространение стружки по территории участка.

Суппорт предназначен для закрепления режущего инструмента и сообщения ему движения подачи. Инструмент устанавливается в резцедержатель, который размещается на поперечных салазках. Салазки используются для поперечной подачи инструмента.

Фартук преобразует вращательное движение ходового винта и ходового вала в прямолинейное поступательное движение суппорта.

В зависимости от назначения токарно-винторезные и токарные станки выпускаются в трех исполнениях.

1. Патронно-центровые — для обработки как валов, так и фланцев. Они имеют зажимной патрон для закрепления заготовок и заднюю бабку с поддерживающим центром.

2. Патронные — для обработки фланцев. Они не имеют задней бабки и заднего центра.

3. Центровые — для обработки валов. Они не имеют патрона, а детали закрепляются в поводковых центрах или в инерционных патронах.

Переходными между токарными автоматами, полуавтоматами и универсальными токарными станками являются **токарно-револьверные станки**, которые применяются в серийном производстве для обработки деталей из прутков или из штучных заготовок. На этих станках можно выполнять все основные токарные операции. Нарезание резьбы произ-

водится с помощью специального копировального устройства. Револьверные станки отличаются от токарно-винторезных тем, что не имеют задней бабки и ходового винта, а имеют продольный суппорт, несущий револьверную головку, в которой может быть установлен разнообразный инструмент. Заготовки зажимаются патронами или специальными цанговыми зажимными устройствами.

Револьверная головка поворачивается вокруг своей оси и тогда инструменты последовательно подводятся к детали, обрабатывая ее за несколько переходов. Инструмент, работающий с поперечной подачей, крепится в резцедержателе поперечного суппорта. В зависимости от вида обрабатываемых заготовок револьверные станки делятся на прутковые, патронные и комбинированные. В зависимости от конструкции револьверной головки станки бывают с вертикальной осью головки и горизонтальной осью головки. Типы головок приведены на рисунке 2.34.

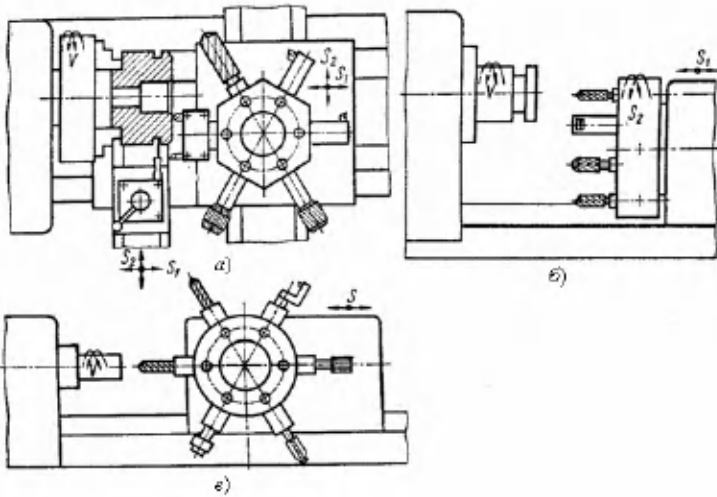


Рис. 2.34

*Типы револьверных головок*

Призматические головки (рис. 2.34а) имеют обычно вертикальную ось вращения и шесть граней с гнездами. Цилиндрические головки бывают с горизонтальной осью вращения, расположенной параллельно оси шпинделя (рис. 2.34, б), и горизонтальной осью, расположенной перпендикулярно оси вращения шпинделя (рис. 2.34в).

Главным движением в токарно-револьверных станках является вращение заготовки, движениями подач — продольное и поперечное перемещения суппортов, несущих режущий инструмент. В револьверных головках с горизонтальной осью вращения поперечная подача  $S_2$  осуществляется медленным вращением головки.

Вспомогательными движениями в этих станках являются индексированные повороты револьверной головки, подача и зажим прутка, быстрый подвод и отвод револьверного суппорта.

**Токарные лобовые станки** применяются для обработки заготовок небольшой длины и большого диаметра (например, диски турбин или компрессоров) в условиях мелкосерийного и единичного производства. При сравнительно небольшой длине они имеют планшайбу большого диаметра. Задней бабки станки не имеют. На рисунке 2.35 приведены общие виды лобовых станков с суппортом, установленным на одной станине со шпиндельной бабкой (рис. 2.35а), и с суппортом, установленным отдельно от шпиндельной бабки (рис. 2.35б). Последние предназначены для обработки особо крупных деталей, превышающих диаметр планшайбы.

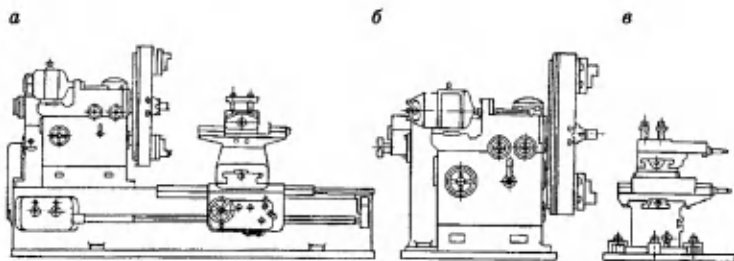


Рис. 2.35

*Токарно-лобовые станки*

Ввиду сложности установки крупногабаритных заготовок на вертикальную планшайбу, лобовые станки не всегда могут быть применены, поэтому они дополняются более современными карусельными станками.

**Токарно-карусельные станки** применяются для обработки деталей большого диаметра и небольшой длины. Станок имеет горизонтальную планшайбу, что облегчает установку и выверку заготовок. Станки с диаметром планшайбы до 1600 мм обычно выпускаются одностоечными, а станки с диаметром более 1600 мм — двухстоечные. Общий вид двухстоечного станка показан на рисунке 2.36.

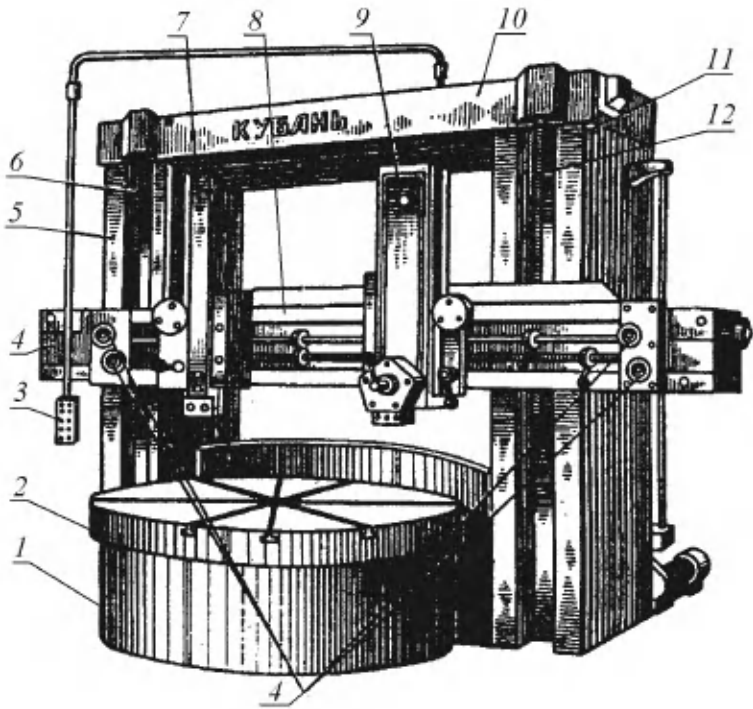


Рис. 2.36

*Двухстоечный токарно-карусельный станок:*

1 — стол; 2 — планшайба; 3 — блок управления; 4 — траверса; 5 — стойка; 6, 12 — ходовые винты; 7 — боковой суппорт; 8 — направляющие горизонтальной подачи; 9 — револьверный суппорт; 10 — перемычка; 11 — направляющие вертикальной подачи.

Главным движением в станке является вращение планшайбы 2, движения подачи — горизонтальные и вертикальные перемещения суппортов 7 и 9 с резцедержателями. Вспомогательные движения — ускоренные перемещения суппортов, поворот револьверных головок резцедержателей и др.

**Обозначение и технические характеристики станков с ЧПУ.** Токарные станки, оснащенные системами ЧПУ, обозначаются маркой соответствующей модели обычного станка с добавлением буквы и цифры, определяющих тип системы ЧПУ: Ф1 — цифровая индикация с предварительным набором координат; Ф2 — система ЧПУ позиционного типа;

Ф3 — контурного типа; Ф4 — универсальная система ЧПУ; Ф5 — пятикоординатный обрабатывающий центр.

К обозначению модели станка с ЧПУ добавляются индексы С1, С2, С3, С4, С5, характеризующие различные модели систем ЧПУ и технологические возможности станков.

Станки модификаций С4 и С5 имеют более высокий диапазон подач, обеспечивают полуавтоматическую обработку заготовок со сложными наружными и внутренними поверхностями, а также нарезание резьб.

Технические характеристики наиболее распространенных токарных станков с ЧПУ приводятся в таблицах 2.8–2.14. Станки приведенные в таблице 2.8 наиболее широко используются в машиностроении чем остальные, поэтому кроме технических характеристик приведены их кинематические схемы.

Общая компоновка токарного станка 16К20Ф3С5 с ЧПУ показана на рисунке 2.37.

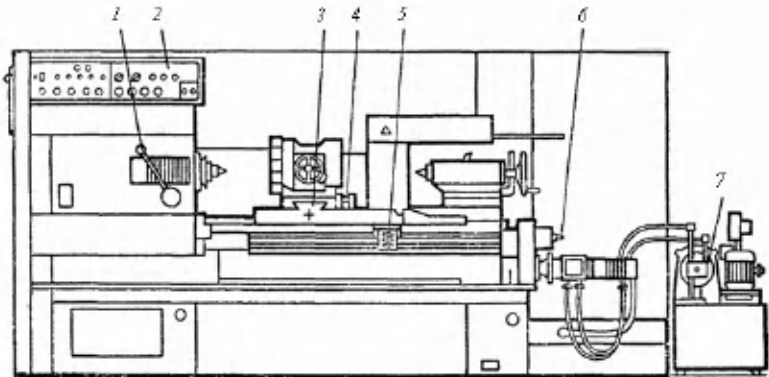


Рис. 2.37

Органы управления станком 16К20Ф3С5:

- 1 — рукоятка переключения диапазонов частот вращения шпинделя; 2 — пульт управления; 3 — гнездо для съемной рукоятки перемещения поперечного суппорта; 4 и 5 — блоки конечных выключателей поперечного и продольного суппортов; 6 — хвостовик для рукоятки продольного перемещения суппорта; 7 — блок гидропривода.

Станки с ЧПУ имеют шаговые двигатели (рис. 2.38), которые предназначены для импульсного перемещения рабочих органов станка. Ротор и статор двигателя имеют по три секции: I, II, III. Полюсы ротора сдвинуты относительно

друг друга по окружности на  $1/3$  полюсного расстояния  $s$ . Когда полюсы секции I ротора находятся напротив полюсов статора, то полюсы секций II и III сдвинуты относительно полюсов статора соответственно на  $1/3$  и  $2/3$  полюсного расстояния  $s$ .

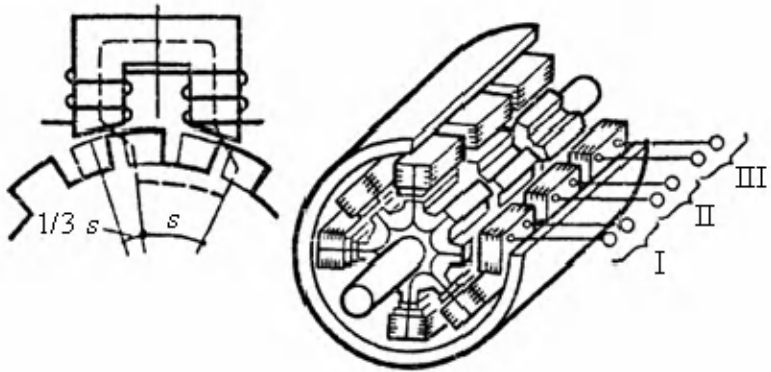


Рис. 2.38

Шаговый двигатель

Путем последовательной подачи импульсов на обмотки трех секций осуществляется шаговое вращение ротора.

Таблица 2.8

**Технические характеристики токарных патронно-центровых станков с ЧПУ 16А20МФЗ, КА-280Ф, 1М63РФЗ, 16К40РФЗ**

№ п/п	Наименование характеристики	Значение по моделям			
		16К20ФЗС5	16К20ФЗ	1Б732ФЗ	16К40РФЗ
1	Наибольший диаметр детали, устанавливаемой над станиной, мм	400	400	590	840
2	Наибольшая длина обрабатываемых деталей, мм	900	900	1400	750 – 3000
3	Пределы частот вращения шпинделя об/мин	12,5–2000	12,5 – 2000	25 – 1250	10 – 1600

Продолжение табл. 2.8

№ п/п	Наименование характеристики	Значение по моделям			
		16К20Ф3С5	16К20Ф3	1Б732Ф3	16К40РФ3
4	Пределы рабочих подач суппорта, м/мин:				
	продольная	0–2000	0–2000	0–2000	0–2000
	поперечная	0–1000	0–1000	0–1000	0–1000
5	Количество позиций инструментальной головки	6	6	6	4
6	Мощность главного привода, кВт	10	10	40	22
7	Габаритные размеры, мм:				
	длина	3400	3400	4000	5800
	ширина	1700	1700	1000	1950
	высота	1700	1700	2700	1900
8	Масса, кг	5000	5000	11 500	6000

*Назначение:* для выполнения токарных работ при обработке деталей из различных, в том числе и труднообрабатываемых материалов.

Таблица 2.9

**Технические характеристики токарных станков с ЧПУ для комплексной обработки деталей в условиях серийного производства МК6510Ф4, 160НТ**

№ п/п	Наименование характеристики	Значение по моделям	
		МК6510Ф4	160НТ
1	Наибольший диаметр заготовки, устанавливаемой над станиной, мм	300	240
2	Наибольший диаметр обработки, мм	300	160
3	Наибольшая длина обработки, мм	200	500
4	Диаметр вращения шпинделя об/мин	10–8000	30–7000

Продолжение табл. 2.9

№ п/п	Наименование характеристики	Значение по моделям	
		МК6510Ф4	160НТ
5	Пределы рабочих подач суппорта мм/об	0,01–0,3	0,001–2,0
6	Дискретность перемещения суппорта, мм	0,001	0,0001
7	Мощность главного привода, кВт	11	10
8	Габаритные размеры, мм:		
	длина	2300	1100
	ширина	1700	1250
	высота	2000	1500
9	Масса, кг	3500	2500

*Назначение:* для прецизионной обработки деталей из различных материалов и сплавов. Наряду с токарной обработкой на станках возможно выполнение фрезерных, сверлильных и расточных операций вращающимся инструментом.

Таблица 2.10

**Технические характеристики токарных двухшпиндельных станков с ЧПУ ПАБ-130, ПАБ-160, ПАБ-200, МК 7130Ф3**

№ п/п	Наименование характеристики	Значение по моделям			
		ПАБ-130	ПАБ-160	ПАБ-200	МК 7130Ф3
1	Наибольший диаметр заготовки, мм	100	140	180	250
2	Наибольшая длина заготовки, мм	80	80	80	125
3	Пределы частот вращения шпинделей, об/мин	100–4000	60–3000	40–2200	40–2500
4	Величины подач суппорта мм/мин:				
	по оси <i>x</i>	10 000	10 000	10 000	10 000
	по оси <i>z</i>	20 000	20 000	20 000	20 000

Продолжение табл. 2.10

№ п/п	Наименование характеристики	Значение по моделям			
		ПАБ-130	ПАБ-160	ПАБ-200	МК 7130ФЗ
5	Мощность главного привода, кВт	15	22	30	20
6	Габаритные размеры, мм:				
	длина	2750	2750	2750	2650
	ширина	1800	1800	1800	2650
	высота	1800	1800	1800	2200
7	Масса, кг	2000	2200	2500	5500

*Назначение:* для выполнения разнообразных токарных работ в патронах в условиях крупносерийного и массового производства. На станке МК 7130ФЗ возможна комплексная обработка деталей вращающимся инструментом.

Таблица 2.11

**Технические характеристики вертикально-токарных обрабатывающих центров 300VT, 500VT**

№ п/п	Наименование характеристики	Значение по моделям	
		300VT	500VT
1	Наибольший диаметр детали, устанавливаемый в патроне, мм	250	250 (до 500)
2	Перемещение (ось $x$ )	1000	1850
3	Перемещение шпиндельной бабки (ось $z$ )	400	1000
4	Максимальная скорость вращения шпинделя, об/мин	6000	6000
5	Скорость работы подачи, м/мм	20 000	20 000
6	Точность позиционирования, мм	$\pm 0,005$	$\pm 0,005$
7	Мощность главного привода, кВт	10	18

Продолжение табл. 2.11

№ п/п	Наименование характеристики	Значение по моделям	
		300VT	500VT
8	Габаритные размеры, мм:		
	длина	2800	5000
	ширина	2500	3300
	высота	3200	3100
9	Масса, кг	6500	9800

*Назначение:* для комплексной обработки деталей типа «втулка», «фланец», в условиях крупносерийного и серийного производства

Таблица 2.12

### Технические характеристики вертикальных токарных двухшпиндельных станков с ЧПУ 450VT

№ п/п	Наименование характеристики	Значение
1	Наибольший диаметр обрабатываемых деталей, мм	250
2	Наибольшие перемещения, мм:	
	продольное (ось <i>x</i> )	835
	поперечное (ось <i>z</i> )	400
3	Пределы частот вращения шпинделей об/мин	18–6000
4	Пределы рабочих подач, мм/ин	1–10 000
5	Точность позиционирования, мм	0,01
6	Мощность главного привода, Вт	18
7	Габаритные размеры, мм: длина/ширина/высота	5460/2650/3100
8	Масса, кг	11 000

*Назначение:* для обработки в условиях серийного и крупносерийного производства деталей типа «фланец».

Таблица 2.13

### Технические характеристики токарных патронных станков с ЧПУ КТ141, 1751Ф3, 1П752МФ3, 1П756ДФ3

№ п/п	Наименование характеристики	Значение по моделям			
		КТ141	1751Ф3*	1П752МФ3	1П756ДФ3
1	Наибольший диаметр обрабатываемой детали над станиной, мм	200	500	500	500

Продолжение табл. 2.13

№ п/п	Наименование характеристики	Значение по моделям			
		КТ141	1751Ф3*	1П752МФ3	1П756ДФ3
2	Наибольшая длина обрабатываемых деталей, мм	100	200	250	500
3	Пределы оборотов шпинделей, об/мин	50–2500	31,5–710	6,3–1250	6–1600
4	Пределы подачи суппорта, мм/мин продольных, поперечных	0–1200	1–1200	1–1200	1–2000
5	Дискретность перемещений, мм: продольных поперечных	0,01 0,005	0,01 0,005	0,01 0,005	0,002 0,002
6	Мощность главного привода, кВт	13	13,5	22	30
7	Габаритные размеры, мм: длина ширина высота	2165 3050 1870	2420 2256 3035	3565 2078 2350	3200 2000 2600
8	Масса, кг	5350	8200	9000	8000

*Назначение:* для обработки деталей типа «фланец» в патроне в условиях мелкосерийного производства. \* — станок имеет вертикальную компоновку оси шпинделя.

Таблица 2.14

**Технические характеристики роботизированных токарных комплексов 16К20РФ3 с роботом М10П.62.01 и 16К20Ф3Р с роботом М20П.40.01**

№ п/п	Наименование характеристики	Значение по моделям	
		16К20РФ3 с М10П.62.01	16К20Ф3Р с М20П.40.01
1	Диаметр устанавливаемых промышленным роботом деталей, мм	20–150	50–250
2	Наибольшая длина деталей, мм: типа валов типа фланцев	500 150	500 150

Продолжение табл. 2.14

№ п/п	Наименование характеристики	Значение по моделям	
		16К20РФЗ с М10П.62.01	16К20ФЗР с М20П.40.01
3	Грузоподъемность промышленного робота, кг суммарная на один схват	10 5	20 10
4	Количество рук/схватов на руку	1/2	1/2
5	Количество программируемых координат робота	6	5
6	Способ программирования перемещений робота	обучение	обучение
7	Объем памяти системы управления роботом, точек	300	300
8	Погрешность позиционирования робота, мм	±0,5	±1
9	Количество позиций тактового стола	24	24
10	Размер площадки тактового стола, мм	220×220	220×220
11	Мощность, кВт: главного привода станка общая	11 15	11 16
12	Габаритные размеры, мм: длина ширина высота	6100 3800 1900	6500 5800 2400
13	Масса, кг	4110	4570

*Назначение:* для обработки деталей «тела вращения» в автоматическом режиме в условиях серийного производства.

Гидроусилители служат для увеличения малых крутящих моментов шаговых двигателей (рис. 2.39). Гидроусилитель соединяется с ходовым винтом суппортов посредством зубчатой пары или непосредственно.

Выходной вал 5 гидромотора 4 соединяется с исполнительным механизмом. Втулка 2 золотника соединена с валом 5, а пробка 1 – с входным валом 3, получающим вращение от шагового двигателя.

Масло от насоса поступает в золотник через отверстия 6 и 10, которые перекрываются при нейтральном положении пробки 1. При смещении пробки от нейтрального положения масло из золотника через отверстия 13 к 9 поступает в гидромотор, а через отверстия 7 и 8 и 11 и 12 – на слив.

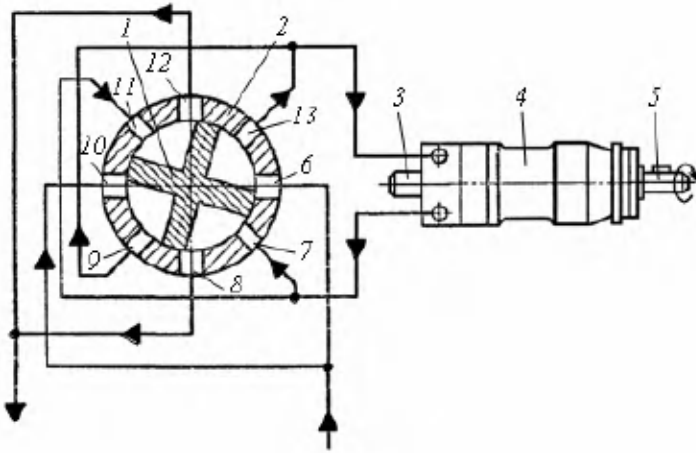


Рис. 2.39

*Схема гидроусилителя*

Вместе с валом 5 вращается по часовой стрелке и втулка 2 золотника до тех пор, пока она не займет нейтрального положения относительно пробки 1.

Станок 16К20Ф3 (рис. 2.40) имеет привод главного движения от электродвигателя  $D_1$  через клиноременную передачу 126/182 и автоматизированную коробку скоростей АКС30-16-51 с шестью электромагнитными муфтами ЭМ<sub>1</sub>–ЭМ<sub>6</sub>. Их переключение обеспечивает девять частот вращения шпинделя на выходном валу III. Отсюда через вторую клиноременную передачу 200/280 вращение передается на приемный вал шпиндельной бабки. За счет передвижного блока  $Z_{16}$ – $Z_{17}$  на шпинделе он получает два диапазона частот вращения:  $n = 35$ – $560$  и  $n = 100$ – $1600$ , в том числе двенадцать различных и шесть повторяющихся в обоих диапазонах.

Продольная подача осуществляется от шагового электрогидравлического привода ЭГ<sub>1</sub> через редукторную зубчатую пару 30/125 и ходовой винт с шариковой гайкой. Для поперечной подачи имеется аналогичный привод (ЭГ<sub>2</sub> и пара 24/100).

Поворот шестипозиционной резцовой головки осуществляется посредством электродвигателя  $D_2$ , зубчатой пары 20/62 и червячной 1/38. Для нарезания резьбы вращение от шпинделя через беззазорную зубчатую пару 60/60 передается на специальный датчик ВЕ-51.

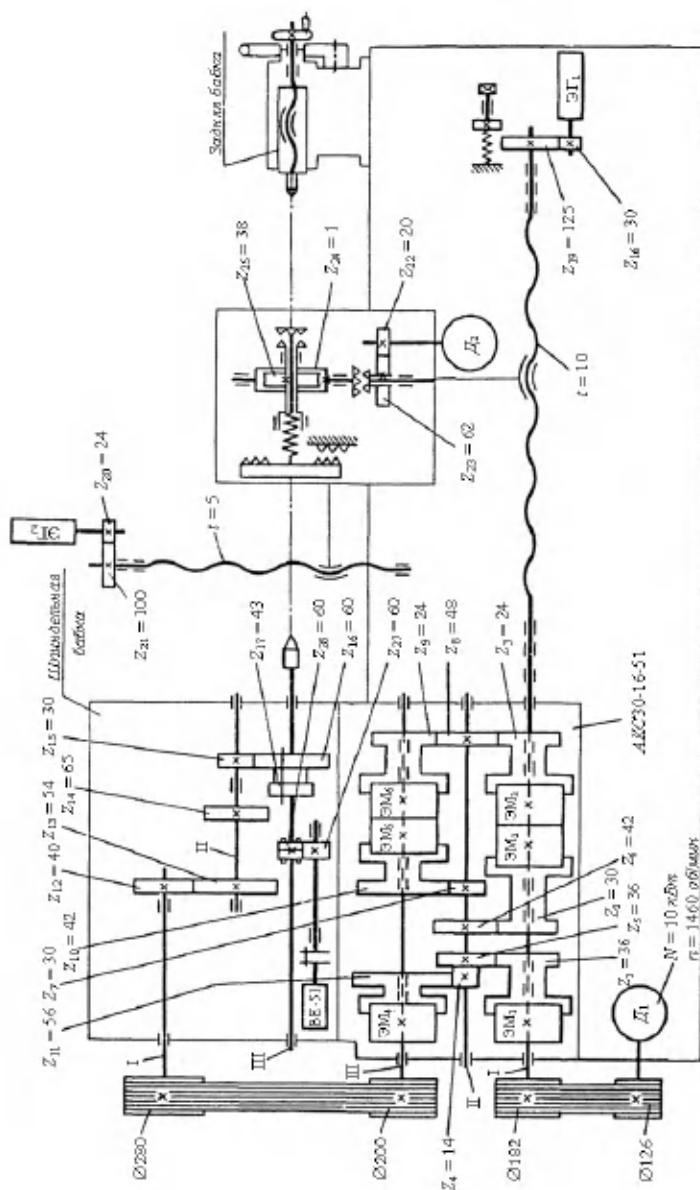


Рис. 2.40

Кинематическая схема станка 16К20Ф3

Токарно-центровой полуавтомат 1Б732Ф3 (рис. 2.41) имеет станину наклонно-коробчатого типа, как у обычных гидрокопировальных станков. Отдельно устанавливаются устройство ЧПУ, гидростанция и электрошкаф.

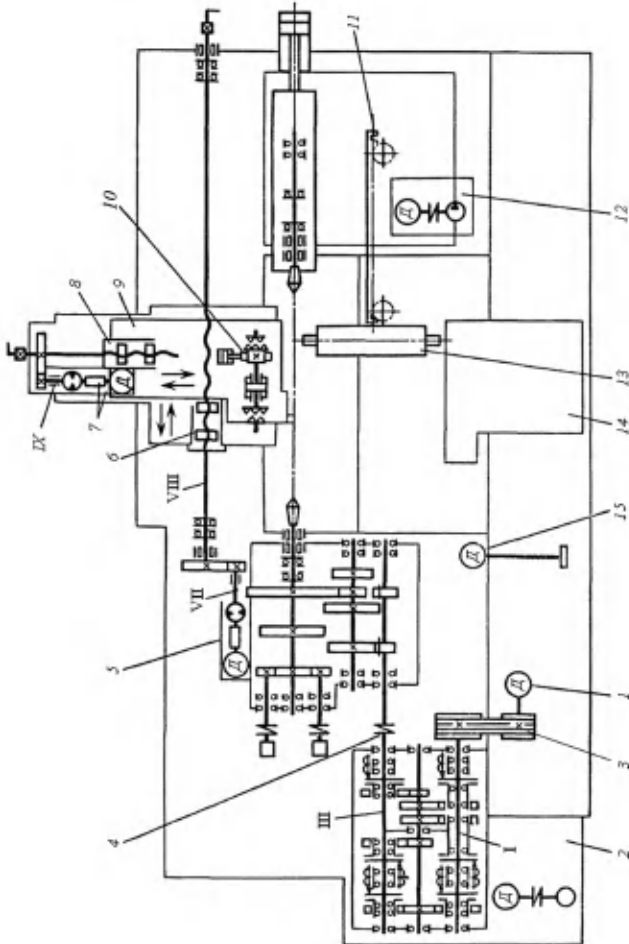


Рис. 2.41

Кинематическая схема полуавтомата 1Б732Ф3:

- 1 — электродвигатель главного движения; 2 — автоматическая коробка скоростей; 4 — втучно-пальцевая муфта; 5 и 7 — гидроусилители; 6 и 8 — винтовые шариковые пары; 9 — суппорт; 10 и 11 — рейки; 12 — станция смазки; 13 — люнет; 14 — транспортер стружки; 15 — электронасос.

Привод шпинделя осуществляется от электродвигателя  $D_1$  ( $N = 40$  кВт), через автоматическую коробку скоростей (АКС). Втулочно-пальцевая муфта связывает выходной вал АКС III с валом шпиндельной бабки. Задняя бабка перемещается посредством реечной передачи II вдоль станины. Пиноль поджимается гидроцилиндром.

Шаговый двигатель с гидроусилителем 5 посредством ходового винта и винтовой шариковой пары 6 перемещает каретку продольного суппорта. Другой шаговый двигатель с гидроусилителем 7 через винтовую шариковую пару 8 передает движение поперечному суппорту 9, на котором установлена шестипозиционная резцовая головка. Ее поворот осуществляется посредством гидроцилиндра, шток которого перемещает рейку 10, связанную с зубчатым колесом и муфтой на оси резцовой головки.

Станки с ЧПУ требуют особых условий эксплуатации и размещения в цехах. Станки классов нормальной (Н) и повышенной (П) точности могут быть размещены в обычных производственных помещениях, а более высокой точности — в термоконстантных цехах. При этом нормальной температурой эксплуатации считается  $20^{\circ}\text{C}$  с колебаниями:  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  — для станков класса Н;  $+5^{\circ}\text{C}$  — для станков класса П;  $+2^{\circ}\text{C}$  — для станков класса В и  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  — для станков класса А.

Повышенные требования предъявляются к инструментальной оснастке.

Настройка на размер должна производиться с точностью до 3–5 мкм и выше при помощи специальных устройств вне станка. Резцовые блоки должны иметь точные базовые поверхности для установки в резцовые головки. Окончательно положение инструмента корректируется при пробной обработке.

Японская фирма MORI SEIKI выпускает серии машинно-обрабатывающих центров принципиально новой конструкции. Универсальность данного технологического оборудования заключается в том, что оно позволяет выполнять большое количество формообразующих операций: сверление, растачивание, токарную обработку, фрезерование и даже шлифование. В конструкции станков используется до девяти управляемых координат (револьверные головки, противошпиндели, качающаяся фрезерная головка и т. д.), что позволяет обрабатывать корпусные детали, детали типа тела вращения, лопатки, моноколеса, коленчатые валы и многое другое (рис. 2.42).



Рис. 2.42

*Примеры обрабатываемых деталей*

На рисунке 2.43 представлен модельный ряд станков фирмы MORI SEIKI, универсальные обрабатывающие центры MT1500, MT2500, MT3000, MT4000. Данные станки отличаются как по размеру рабочей зоны, так и по компоновке рабочих органов. Обрабатывающие станки одной серии, например MT2500, имеют несколько различных модификаций: MT2500, MT2500Z, MT2500S, MT2500SZ. Указанные модификации станков отличаются по наличию или отсутствию, в зависимости от пожеланий заказчика, в компоновке станка второго шпинделя, задней бабки или револьверной головки. Так, вместо второго шпинделя может быть установлена задняя бабка.

В таблице 2.15 приведены основные технические характеристики станков MT1500, MT2500 и MT4000. Как видно из представленных данных, с увеличения размера станка, увеличивается размер рабочей зоны и максимальные габариты обрабатываемых заготовок. Так, на станке MT4000 возможна обработка валов длиной до 4 м.

Таблица 2.15

**Технические характеристики станков**

Параметр	MT1500	MT2500	MT4000
Максимальная длина заготовки, мм	920	1528	2000–4000

Продолжение табл. 2.15

Параметр	MT1500	MT2500	MT4000
Максимальный диаметр обрабатываемой заготовки, мм	400	540	940
Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	6000	4000	2400
Габариты станка, мм	3675×4247×2415	5130×3194×2646	8523×3975×3946

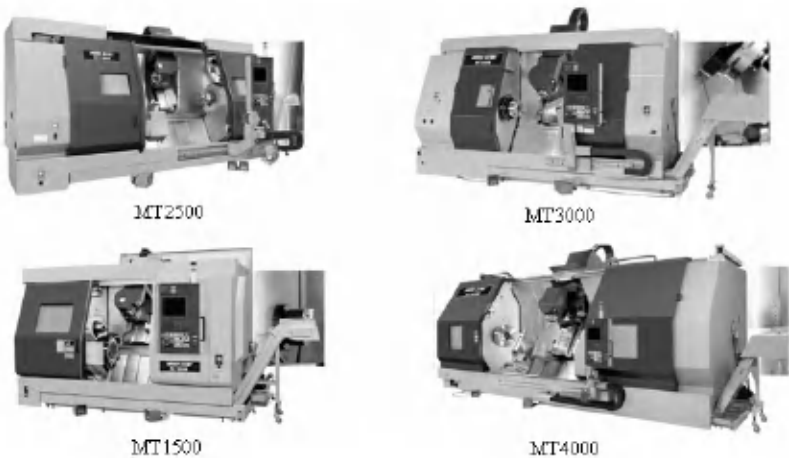


Рис. 2.43

Модельный ряд станков фирмы MORI SEIKI

В компоновку станка MT2500SZ включены два синхронизированных шпинделя, револьверная головка, инструментальный шпиндель. В таблице 2.16 приведены технические характеристики станка MT2500SZ. Следует отметить высокие пределы подачи, до 24 м/мин и частот вращения шпинделя, до 8000 мин<sup>-1</sup>, по сравнению с другими традиционными станками токарной группы, что значительно увеличивает технологические возможности оборудования.

Таблица 2.16

## Технические характеристики станка MT2500SZ

Параметр станка	Значение параметра
Количество управляемых координат, шт.	9
Максимальная скорость главного шпинделя, мин <sup>-1</sup>	4000
Максимальная скорость инструментального шпинделя, мин <sup>-1</sup>	8000
Тип оправки	Coromant Capto C6
Количество позиций revolverной головки, шт.	12
Подача инструментального шпинделя, мм/мин	X: 24000; Y: 16000; Z: 24000; B: 27 (мин <sup>-1</sup> ); C: 400 (мин <sup>-1</sup> )
Подача revolverной головки, мм/мин	X: 20 000; Z: 24 000
Расстояние между шпинделями, мм	1602–1828
Максимальная длина заготовки, мм	910
Максимальный диаметр заготовки	540
Количество мест в инструментальном магазине, шт.	20
Число сохраняемых программ, шт.	125

Многоосевой токарный центр MT2500SZ (рис. 2.44) имеет 9 управляемых координат, что позволяет производить обработку деталей сложной формы за один установ. Применение инструментального шпинделя с возможностью качения в плоскости XZ на угол  $\pm 120^\circ$  позволяет осуществлять наряду с токарной, фрезерную обработку по 5-ти координатам одновременно, а также сверление наклонных отверстий. При помощи инструментального шпинделя возможна также операция шлифования абразивными кругами диаметром до 400 мм, для чего требуется специальная шлифовальная головка (рис. 2.45). Однако не всегда следует применять этот вид обработки на данном типе оборудования, так как наличие абразива на образующих станка существенно снижает его долговечность и точность.

Инструментальный шпиндель оснащен инструментальным магазином, рассчитанным на 20 (базовый вариант), 40, 60, 120 и 180 мест. Смена инструмента осуществляется за 1,6 с, поэтому вспомогательное время значительно снижается за счет экономии времени на смену инструмента.

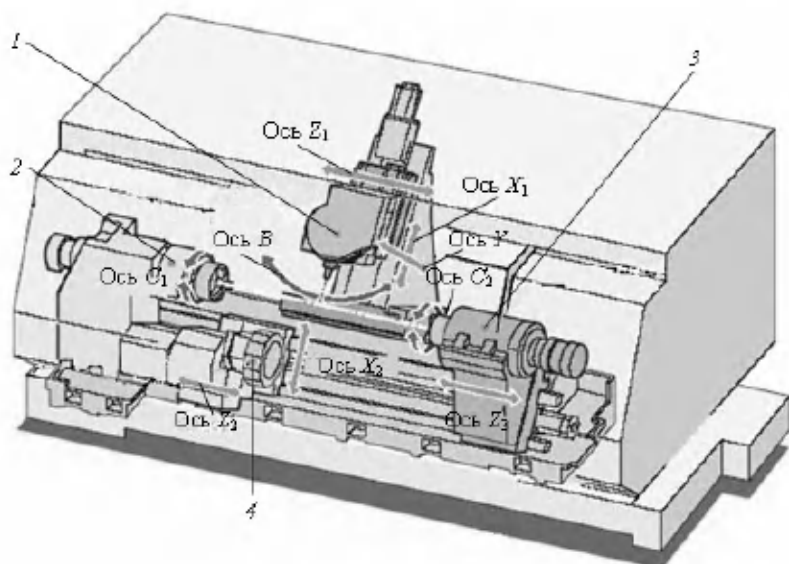


Рис. 2.44

Схема станка MT2500SZ:

1 — инструментальный шпindel; 2 — шпindel 1 (левый); 3 — шпindel 2 (правый); 4 — револьверная головка.

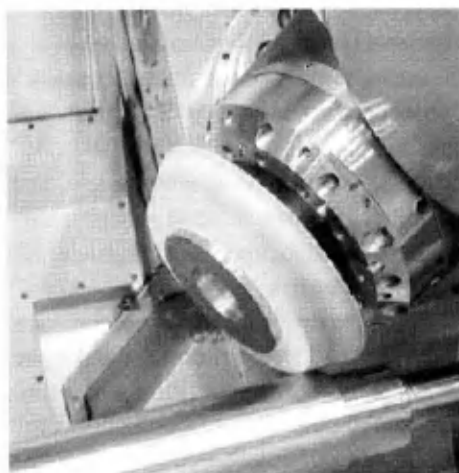


Рис. 2.45

Шлифовальная головка к машинно-обрабатывающему центру MT2500SZ

Обработывающий центр MT2500SZ имеет два противоположно расположенных синхронизированных шпинделя, что существенно расширяет технологические возможности станка. Синхронизация двух шпинделей повышает жесткость и точность обработки длинных заготовок. При обработке длинного вала в двух синхронизированных шпинделях пропадает необходимость в центровых отверстиях, которые в ряде случаев являются недопускаемыми элементами в конструкции детали. На практике часто производится одновременная обработка двух деталей, то есть задействованы 2 шпинделя. Инструментальный шпиндель и револьверная головка могут работать как с одним шпинделем, так и перемещаться от одного шпинделя к другому в зависимости от управляющей программы. Не менее важным преимуществом является также и то, что детали, требующие обработки с двух сторон, например, диски, могут переустанавливаться с одного шпинделя на другой, и будет производиться обработка одновременно двух деталей (револьверной головкой на одном шпинделе и шпиндельной головкой на другом).

На шпинделе 2 производятся такие же формообразующие операции, как и на шпинделе 1, однако второй шпиндель отличается от первого меньшими габаритными размерами, меньшей мощностью и служит для обработки небольших по диаметру заготовок.

Во многих случаях в процессе обработки задействована двенадцатиместная револьверная головка (рис. 2.46). Она позволяет вести как токарную обработку, так и фрезерную. Токарный инструмент устанавливается в инструментальный блок, который крепится на револьверной головке с помощью специального ключа или болтов. Способ крепления зависит от вида револьверной головки, который выбирает заказчик при покупке станка.

Использование вращающегося инструмента в револьверной головке возможно благодаря наличию редуктора мощностью от 1,5 кВт до 7,5 кВт, расположенного внутри головки, но при этом необходимо иметь специальные инструментальные оправки, позволяющие передавать вращение от редуктора к инструменту. Время смены инструмента (поворота револьверной головки) составляет 0,26 с, что значительно сокращает вспомогательное время обработки.

Револьверная головка позволяет устанавливать люнет, который занимает три места для инструмента. При этом люнет может быть подвижным благодаря перемещению револьверной головки по направляющим станка. На практике при обработке одной детали чаще используется

инструментальный шпиндель, имеющий больше технологических возможностей, чем револьверная головка.

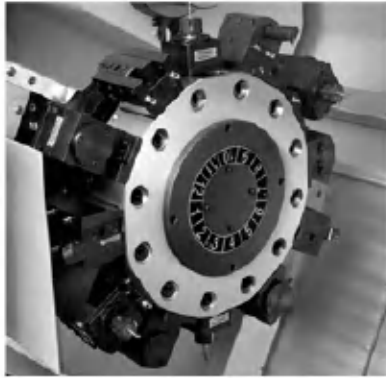


Рис. 2.46

*Револьверная головка*

Дополнительные возможности обрабатывающего центра MT2500SZ:

- наличие системы настройки вылета инструмента. Использование данного устройства позволяет свести к минимуму погрешности установки, выверки настройки инструмента;
- встроенная измерительная система. Аналогично координатно-измерительной машине измерение детали на станке производится специальной измерительной головкой «RENISHAW», установленной в инструментальный шпиндель. Замеры головкой производятся 2-х видов: замеры базовых поверхностей для определения системы координат обрабатываемой заготовки; замеры обработанных на станке поверхностей для определения годности изготавливаемой детали;
- подача СОЖ через шпиндель. При этом должен применяться специальный инструмент с внутренними отверстиями для подачи охлаждения;
- кабинетные ограждения зоны обработки. Обрабатывающий центр имеет надежные раздвижные двери, блокирующиеся в процессе обработки;
- управление зажимом патрона pedalю обеспечивает удобство установки и снятия детали, значительно экономит время на зажим-разжим приспособления. Для тонкостенных деталей возможна предварительная настройка силы закрепления;

- для разработки и редактирования управляющих программ непосредственно на станке в системе числового программного управления «FANUC» встроена система программирования «MAPPS II». Данная система благодаря расширенному набору стандартных циклов позволяет быстро в автоматическом режиме проектировать управляющие программы на стойке станка.

В настоящее время в связи с развитием числового программного управления широкое распространение получили **токарные обрабатывающие центры**. На этих станках наряду с традиционными токарными операциями, выполняемыми на универсальных станках, могут быть обработаны торцевые несоосные отверстия, боковые отверстия и пазы, проконтролировано качество обработки деталей. На рисунке 2.47 приведен пример обработки сложной многоэлементной детали на токарном обрабатывающем центре модели TNS-65 фирмы «Traub» (Германия).

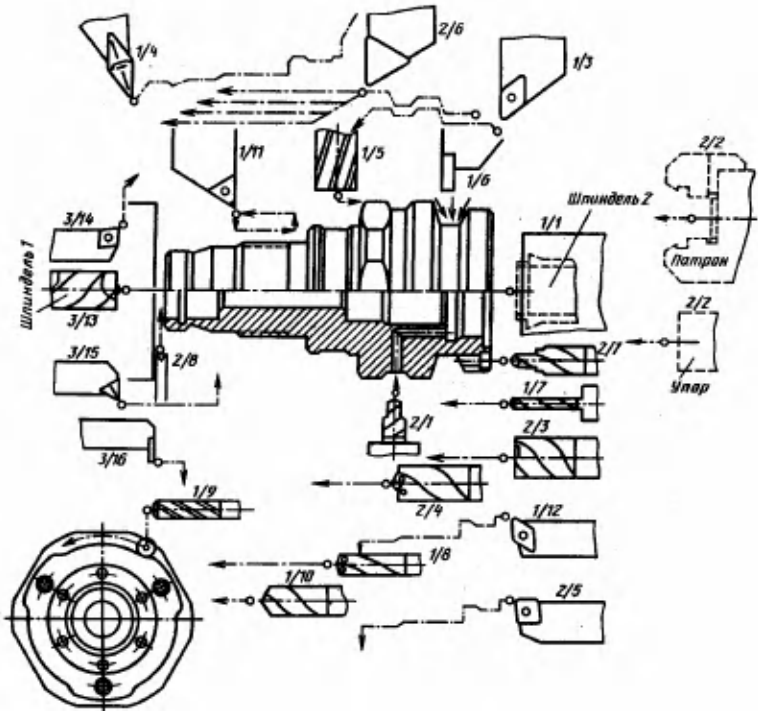


Рис. 2.47

Пример обработки поверхностей на токарном обрабатывающем центре

Станок имеет три револьверные головки с 24 инструментами, причем 14 из них могут вращаться. Обработка производится поочередно в двух шпинделях, что обеспечивает обработку детали с двух сторон. На рисунке в числителе обозначены номера револьверных головок, а в знаменателе — номера позиций инструментов. Оба шпинделя могут работать или синхронно или автономно. При концентрации операций на одном станке совмещение операций, переходов во времени, использование комбинированных инструментов и многоинструментальных наладок обеспечивает существенное увеличение производительности при одновременном повышении качества обрабатываемых деталей.

### 2.5.2. Фрезерные станки

Фрезерные станки предназначены для обработки плоских и фасонных поверхностей. Главным движением у фрезерных станков является вращение фрезы, движения подачи — относительные перемещения фрезы и заготовки.

В зависимости от расположения узлов (компоновки) фрезерные станки бывают консольные и бесконсольные.

Основным отличием *консольных* станков является наличие консоли 1, перемещающейся по вертикальным направляющим станины 2. На консоли размещены салазки и несущий стол. На столе в приспособлении закрепляется обрабатываемая заготовка. Варианты компоновок консольно-фрезерных станков приведены на рисунке 2.48.

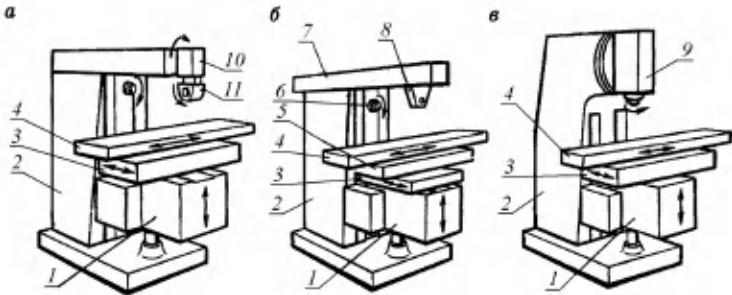


Рис. 2.48

Варианты компоновки консольно-фрезерных станков:

а — широкоуниверсальный; б — горизонтальный; в — вертикальный; 1 — консоль; 2 — станина; 3 — салазки поперечного перемещения; 4 — стол; 5 — салазки продольного перемещения; 6 — шпиндель; 7 — хобот; 8 — серьга; 9 — шпиндельная головка; 10 — дополнительная шпиндельная головка; 11 — накладная шпиндельная головка.

Широкоуниверсальные станки (рис. 2.48а) имеют дополнительную шпиндельную головку 10, смонтированную на выдвижном хоботе 7. Головка может поворачиваться на любой угол в вертикальной плоскости. Еще большую универсальность придает станку накладная фрезерная головка 11 со шпинделем, поворачивающимся на любой угол в горизонтальной плоскости. На станине горизонтального станка (рис. 2.48б) смонтирован хобот, несущий поддерживающую серьгу 8, в отверстие которой устанавливается второй конец оправки с фрезами для обеспечения жесткости системы. Шпиндельная головка 9 вертикального станка (рис. 2.48в) может поворачиваться в вертикальной плоскости, что обеспечивает обработку наклонных плоскостей.

*Бесконсольные* вертикальные и горизонтальные станки отличаются тем, что салазки, несущие стол, перемещаются по горизонтальным направляющим станины, а шпиндельная бабка перемещается в вертикальном направлении по направляющим стойки. На рисунке 2.49 приведен общий вид бесконсольного фрезерного станка.

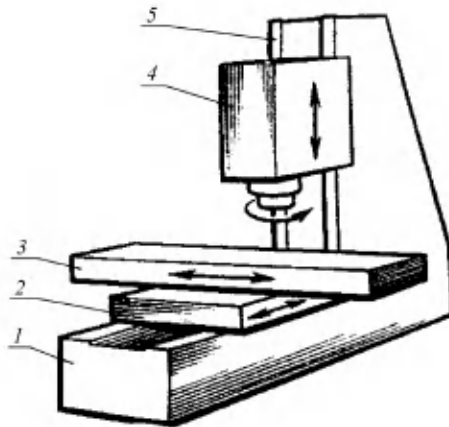


Рис. 2.49

*Бесконсольный фрезерный станок:*

1 — станина; 2 — продольный стол; 3 — поперечный стол; 4 — шпиндельная головка; 5 — стойка.

Для обработки крупногабаритных деталей применяют *продольно-фрезерные станки* (одностоечные и двухстоечные). Общий вид двухстоечного продольно-фрезерного станка приведен на рисунке 2.50.

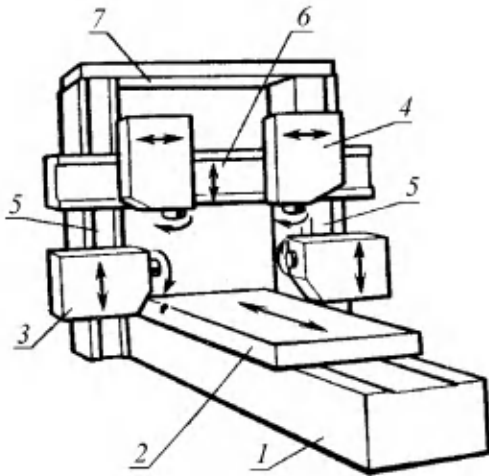


Рис. 2.50

*Компоновка продольно-фрезерного станка:*

1 — станина; 2 — стол; 3 — вертикальная шпиндельная головка; 4 — горизонтальная шпиндельная головка; 5 — стойка; 6 — поперечина (траверса); 7 — перемычка.

Стол станка 2 перемещается по горизонтальным направляющим станины 1, а шпиндельные головки 4 — по направляющим стоек 5 и поперечины 6.

В машиностроении более 70% изделий изготавливаются в условиях мелкосерийного и серийного производства. Эффективным средством автоматизации мелкосерийного и серийного производства является программное управление металлорежущими станками.

Работа на станках с ЧПУ в ряде случаев может существенно отличаться от работы на универсальных фрезерных станках и требует специальных профессиональных знаний и навыков.

Ниже приведена общая характеристика станков с программным управлением отечественного и зарубежного производства.

При разработке новых моделей оборудования в большей степени применяется принцип концентрации операций для осуществления комплексной автоматизации производственного процесса. Наблюдается тенденция уменьшения количества специальной оснастки, сложность и высокая стоимость которой часто увеличивает производственный цикл изделия, а также существенно повышает себестоимость единицы

продукции. Большие технологические возможности современных машинно-обрабатывающих центров и высокая сложность технологического оборудования, способного длительный период времени работать в автоматическом режиме, влечет упрощение технологической оснастки, а в ряде случаев и полный отказ от ее использования.

На рисунке 2.51 представлен обрабатывающий центр 500VB фирмы Стерлитамак-М.Т.Е. Данный станок предназначен для фрезерования проточной части малых и средних по величине лопаток компрессора, фрезерования бандажных полок, замков лопаток компрессора и др. Станок имеет 5 одновременно управляемых координат: перемещение по оси  $X$  — вдоль центральной оси лопатки; по оси  $Y$  — перпендикулярно направляющим пазам стола; по оси  $Z$  — вдоль оси перемещения инструмента; вращение  $A$  вокруг оси  $X$  — поворот лопатки вокруг центральной оси на  $360^\circ$  (при таком повороте возможна реализация спиралевидной траектории); вращение  $B$  вокруг оси  $Y$  — поворот инструментальной головки на  $\pm 30^\circ$  для возможности обработки радиусов сопряжения. Технологическая оснастка закрепляется на столе станка и состоит из заднего поддерживающего (выдвижная пиноль) и переднего вращающегося (ось  $A$ ) центра.



Рис. 2.51

Обрабатывающий центр 500VB фирмы Стерлитамак-М.Т.Е.

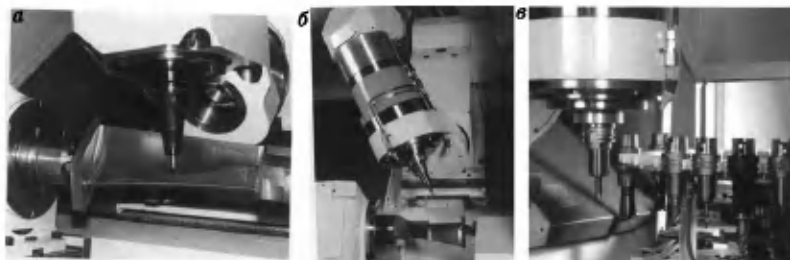
На рисунке 2.52 представлен обрабатывающий центр НХ-151 фирмы Starragheckert. Станок применяется для фрезерования таких же деталей, что и 500VB, но в то же время обладает существенными технологическими преимуществами. Более высокая мощность главного привода и большее максимальное число оборотов шпинделя позволяют достигать высокой производительности обработки.



**Рис. 2.52**

*Обрабатывающий центр НХ-151*

При сходной кинематике движения рабочих органов станка и таком же количестве управляемых координат в машинно-обрабатывающем центре НХ-151 инструментальная головка перемещается по направляющим (ось Z), расположенным под углом  $45^\circ$  к вертикальной плоскости (рис. 2.53).

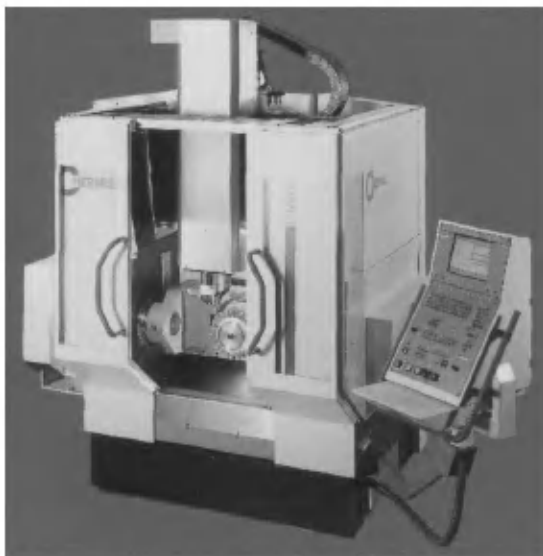


**Рис. 2.53**

*Рабочая зона машинно-обрабатывающего центра НХ-151*

Таким образом достигается высокая жесткость станка, так как наиболее жесткими являются треугольные конструкции. Также станок обладает большей емкостью инструментального магазина. Несмотря на описанные преимущества машинно-обрабатывающего центра НХ-151, его стоимость превышает стоимость станка модели 500VB в 4–5 раз. Поэтому оборудование фирмы Стерлитамак-М.Т.Б. хотя и является менее технологичным и производительным, но относительно невысокая стоимость позволяет широко применять его как на отечественных, так и зарубежных предприятиях.

На рисунке 2.54 представлен пятиосевой обрабатывающий центр С600U, оснащенный столом-качалкой. Аналогичную конструкцию имеют станки фирмы Hermle С30U/С40U, С600U/С800U. Машинно-обрабатывающие центры фирмы Hermle различаются в основном размером рабочей зоны, мощностью главного привода и наибольшим весом обрабатываемой заготовки. Возможно также четырехосевое исполнение станка. В этом случае отсутствует поворот вокруг оси С, вместо поворотного стола устанавливается палета. Рабочая зона станка представлена на рисунке 2.55.



**Рис. 2.54**

*Обрабатывающий центр Hermle С600U*

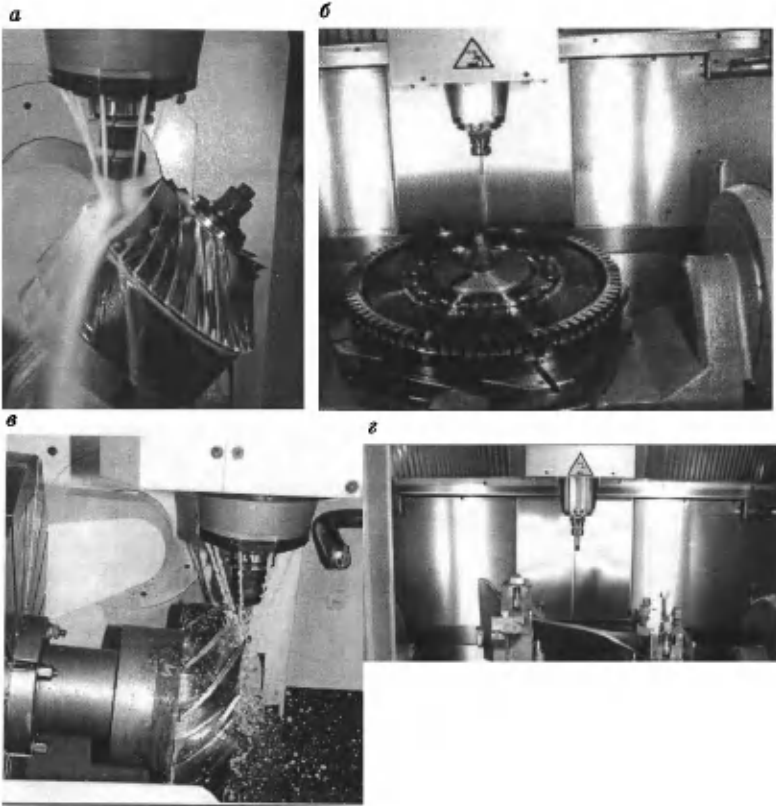


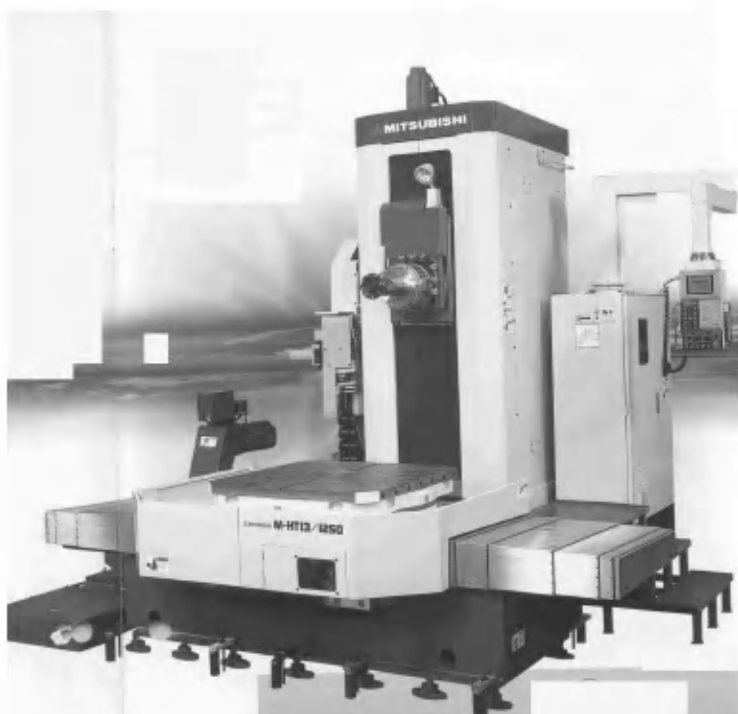
Рис. 2.55

*Рабочая зона машинно-обрабатывающих центров*

Представленный на рисунке 2.56 горизонтально-фрезерный машинно-обрабатывающий центр серии М-НГ фирмы Mitsubishi используется для обработки крупногабаритных тяжеловесных деталей общей массой до 6000 кг. Вследствие того, что рабочая зона не оборудована кабинетными ограждениями, с точки зрения техники безопасности нецелесообразна высокоскоростная обработка и подача СОЖ под большим давлением. Открытая рабочая зона в данном случае необходима для установки деталей непосредственно с крана-балки без использования дополнительных загрузочных устройств, что существенно снижает стоимость оборудования.

Особо следует отметить машинно-обрабатывающий центр фирмы Starragheckert CWK-400D (рис. 2.57). Данный

горизонтально-фрезерный обрабатывающий центр обладает большими технологическими возможностями.



**Рис. 2.56**

*Горизонтально-фрезерный машинно-обрабатывающий центр серии М-НТ фирмы Mitsubishi*

Сменная палета с гидравлическим поворотным устройством сокращает вспомогательное время, т. к. установка и закрепление детали на загрузочной палете может осуществляться во время обработки, причем время смены палет составляет 8–9 секунд. Инструментальный магазин может быть цепным — вместимость 60 инструментов, и башенным — вместимость инструментов до 240. Время смены инструмента составляет 3,5–4 секунды. Все базовые узлы имеют хорошие демпфирующие свойства и малое тепловое расширение. Благодаря этому, а также высокой мощности привода и частоте вращения инструмента обеспечивается обработка без вибраций с высокой производительностью. При исполнении станка с повышенной базовой точностью

достигается IT5/IT6 качество точности, что позволяет в ряде случаев получать особо точные конструкционные элементы без использования шлифования.

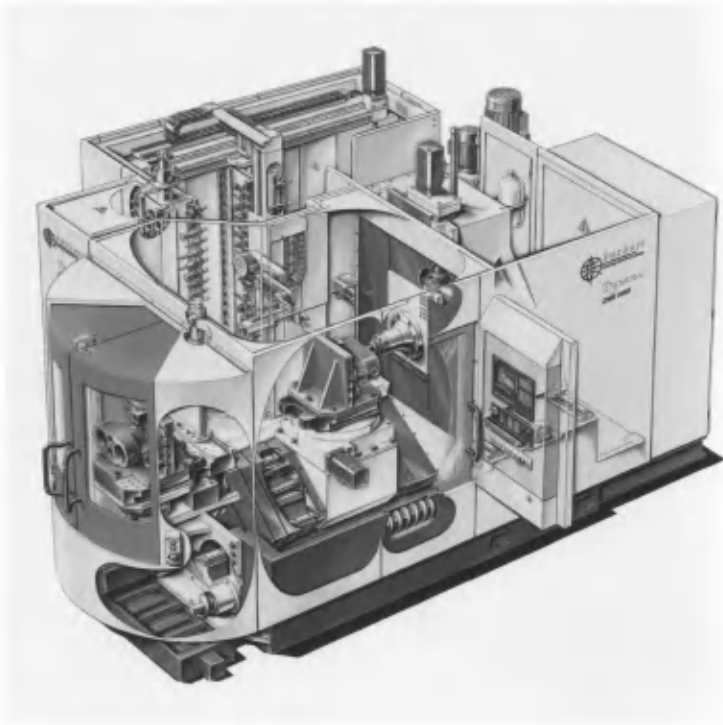


Рис. 2.57

*Машинно-обрабатывающий центр CWK-400D*

Портальный продольно-фрезерно-расточной обрабатывающий центр (рис. 2.58) предназначен для обработки крупногабаритных сварных металлоконструкций энергоустановок (рам, шумоглушителей, газоотводов и др.). Главным преимуществом данного технологического оборудования является прежде всего возможность обработки деталей практически любого размера.

Универсальная пятикоординатная головка позволяет фрезеровать сложные пространственные поверхности или растачивать расположенные под углом отверстия.

Для обработки осевых или оседиагональных колес, сложных корпусных деталей с труднодоступными элементами, косыми отверстиями, внутренними полостями

используется обрабатывающий центр ZT1000/E130 фирмы Starragheckert (рис. 2.59).



Рис. 2.58

*Портальный продольно-фрезерно-расточной обрабатывающий центр*

Обрабатывающий центр также имеет два рабочих стола, один из которых во время обработки расположен вне станка. Установка и закрепление одних крупногабаритных деталей осуществляется, соответственно, во время процесса обработки других деталей, что, как уже отмечалось ранее, существенно повышает долю машинного времени (непосредственно сам процесс резания металла) от общего времени изготовления изделия. Большой инструментальный магазин, возможность работать на высоких режимах резания, универсальная пятикоординатная фрезерная головка и значительные габариты обрабатываемых деталей обеспечивают данный обрабатывающий центр большими технологическими возможностями. Применение самых современных методов проектирования и конструирования гарантирует высокую точность обработки и стабильность процесса резания.

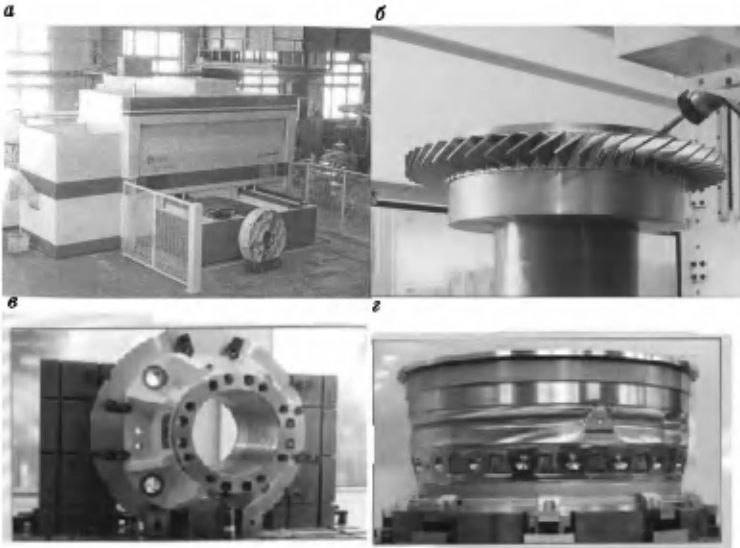


Рис. 2.59

*Обрабатывающий центр ZT1000/E130 и примеры обрабатываемых деталей*

### 2.5.3. Сверлильные и расточные станки

На сверлильных и расточных станках производится обработка отверстий.

**Сверлильные станки** предназначены для сверления глухих и сквозных отверстий, рассверливания, зенкерования и нарезания резьбы метчиками.

Широкое распространение получили настольно-сверлильные, вертикально-сверлильные, радиально-сверлильные станки и станки для глубокого сверления.

*Настольные станки* применяются для обработки малогабаритных деталей в кондукторах, при этом кондуктор удерживается в руках; совмещение оси сверла с осью отверстия и подача сверла обеспечиваются вручную. Смена оборотов шпинделя производится в большинстве моделей за счет изменения положения приводного ремня на многоступенчатом шкиве. Для повышения производительности обработки используются многшпиндельные настольные станки с числом шпинделей до четырех. В шпинделях закрепляются различные инструменты, что позволяет на одном рабочем месте выполнить несколько переходов. Настольные сверлильные станки выпускаются для сверления

отверстий наибольшего условного диаметра 3, 6, 12 и 16 мм, вертикально-сверильные и радиально-сверильные — для диаметров 18, 25, 35, 50 и 75 мм.

Наиболее распространенными являются *вертикально-сверильные станки*. Общий вид станка приведен на рисунке 2.60. Шпиндельная бабка 4 перемещается по направляющим колонны 3 при настройке станка. Рабочая подача при сверлении обеспечивается за счет выдвижения шпинделя 7 от привода подач или вручную. Стол станка 9 также может перемещаться вручную в вертикальном направлении. Такие станки применяются в основных производственных цехах в условиях мелкосерийного и единичного производства, в ремонтно-механических и инструментальных цехах.

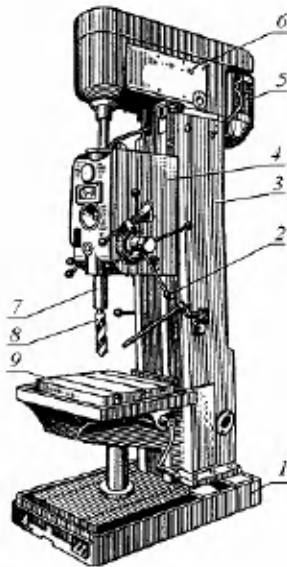


Рис. 2.60

Общий вид вертикально-сверильного станка 2H118:

- 1 — плита; 2 — рукоятка управления подачами; 3 — колонна; 4 — шпиндельная бабка; 5 — электродвигатель; 6 — траверса; 7 — шпиндель; 8 — инструмент; 9 — стол.

*Радиально-сверильные станки* применяются для обработки крупногабаритных и тяжелых деталей, которые трудно перемещать для совмещения оси инструмента с

осью обрабатываемых отверстий. При работе на этих станках деталь остается неподвижной, а шпиндель со сверлом перемещается относительно детали и устанавливается в требуемое положение. Общий вид радиально-сверлильного станка приведен на рисунке 2.61.

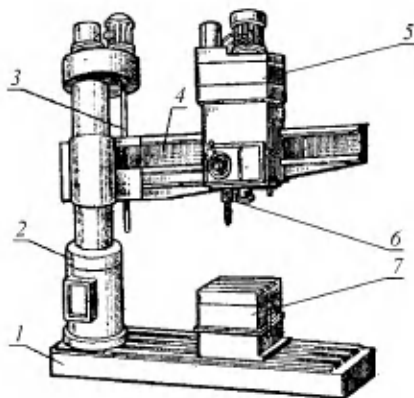


Рис. 2.61

Общий вид радиально-сверлильного станка:

1 — фундаментная плита; 2 — тумба с неподвижной колонной; 3 — винт подъема траверсы; 4 — траверса; 5 — шпиндельная головка; 6 — шпиндель; 7 — стол.

Обрабатываемые заготовки устанавливаются на стол 7 или непосредственно на фундаментную плиту. Шпиндель со шпиндельной головкой 5 перемещается по траверсе 4 и вместе с ней может поворачиваться вокруг неподвижной колонны 2. Эти два движения обеспечивают установку сверл по координатам. Перед сверлением отверстия гильза и шпиндельная головка фиксируются в заданном положении.

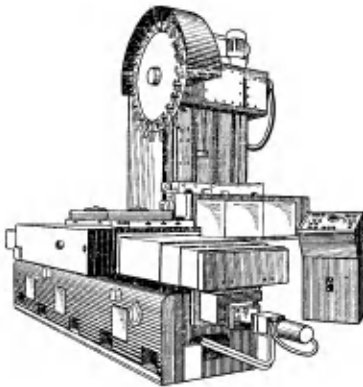
Кроме сверлильных станков для обработки отверстий в призматических деталях широко применяются горизонтально-расточные и координатно-расточные станки.

На *горизонтально-расточных станках* производится черновое и чистовое растачивание отверстий, обтачивание наружных цилиндрических поверхностей и торцов отверстий, сверление, зенкерование и развертывание отверстий, фрезерование плоскостей и другие операции. Большое разнообразие видов обработки позволяет в ряде случаев проводить полную обработку без переустановки их на другие станки, что особенно важно при обработке крупных деталей.

*Координатно-расточные станки* применяются для обработки отверстий, когда требуется высокая точность их взаимного расположения. В условиях нормальной эксплуатации координатно-расточной станок обеспечивает точность межцентровых расстояний до 0,004 мм в прямолинейных координатах и до 5 угловых секунд в полярных координатах. Такая точность обеспечивается за счет контроля перемещения стола или салазок относительно шпинделя специальным оптическим устройством.

Широкое применение для обработки призматических деталей получили многоцелевые станки или *машинные обрабатывающие центры*, которые обладают широкими технологическими возможностями. Такой станок может заменить фрезерный, расточной и сверлильный станки. Это обеспечивается наличием инструментального магазина с устройством автоматической смены инструмента в шпинделе и системы числового программного управления работой станка. Еще одной важной особенностью таких станков является наличие поворотного стола для периодического или непрерывного поворота, что позволяет обрабатывать заготовку с нескольких сторон без переустановки. Станки могут иметь дополнительные накопители и устройства для автоматической смены заготовок, предварительно закрепленных на приспособлениях-спутниках. Общий вид многоцелевого станка приведен на рисунке 2.62.

На таких станках обработка деталей ведется в автоматическом режиме, оператор производит только смену заготовок на приспособлениях-спутниках.



**Рис. 2.62**

*Общий вид многоцелевого станка*

### 2.5.4. Шлифовальные станки

Шлифовальные станки применяются для чистовой и финишной обработки деталей шлифовальными кругами. В зависимости от назначения шлифовальные станки делятся на круглошлифовальные центровые и бесцентровые, внутришлифовальные и плоскошлифовальные. Применяются также специальные станки для глубинного шлифования. Кроме того, для отделочной обработки применяются шлифовально-притирочные, шлифовально-отделочные и полировальные станки. К конструкции шлифовальных станков предъявляются повышенные требования по жесткости, виброустойчивости, износостойкости и температурным деформациям. Главным движением у всех шлифовальных станков является вращение шлифовального круга.

**Круглошлифовальные станки** предназначены для шлифования наружных цилиндрических и конических поверхностей, а также торцевых поверхностей деталей типа «тела вращения». Отдельные модели станков позволяют выполнять и внутреннее шлифование отверстий. Для этого они имеют специальный шпиндель. Общий вид круглошлифовального станка приведен на рисунке 2.63.

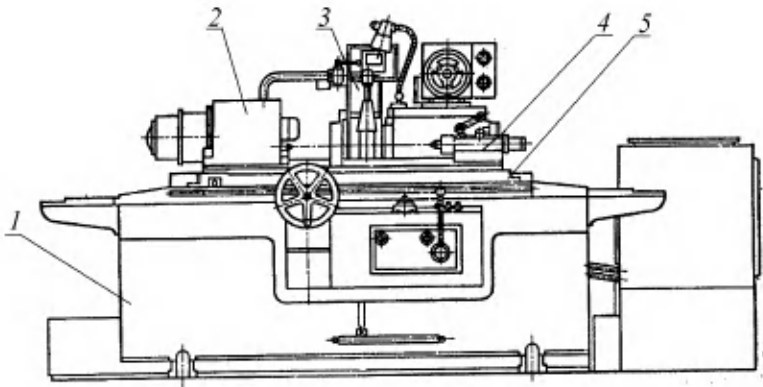


Рис. 2.63

*Круглошлифовальный станок:*

- 1 — станина; 2 — передняя бабка; 3 — шлифовальная бабка; 4 — задняя бабка;  
5 — рабочий стол.

Обрабатываемые детали устанавливаются в центрах передней 2 и задней бабки 4 или закрепляются в патроне, находящемся на передней бабке. Задняя бабка перемещается относительно передней в зависимости от изменения

длины обрабатываемых деталей. Шлифовальная бабка 3 размещена на поперечных направляющих. Вращение детали осуществляется приводом, расположенным в передней бабке. Рабочий стол 5, на котором установлены передняя и задняя бабки, производит возвратно-поступательное движение (продольную подачу), а перемещение шлифовальной бабки по поперечным направляющим обеспечивает поперечную подачу. При обработке конических поверхностей рабочий стол поворачивают вокруг вертикальной оси на угол, соответствующий конусности детали (обычно до  $10^\circ$ ). На станке можно производить как врезное, так и продольное шлифование в полуавтоматическом цикле до жесткого упора или с применением прибора активного контроля, который позволяет в процессе обработки непрерывно измерять обрабатываемую деталь. Круглошлифовальные станки выпускаются с ручным управлением и с числовым программным управлением. Станки с ЧПУ эффективны при обработке многоступенчатых деталей в условиях серийного и мелкосерийного производства.

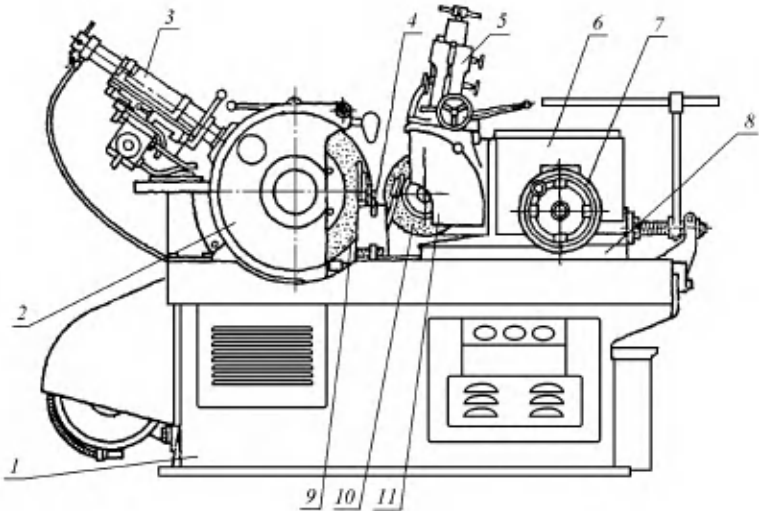
**Бесцентровые шлифовальные станки** (рис. 2.64) применяются при обработке наружных и внутренних поверхностей деталей, не имеющих центровых отверстий, в условиях крупносерийного и массового производства.

На этих станках обрабатываемая заготовка устанавливается на опору 4 между шлифующим 9 и ведущим кругом 10. Шлифующий круг вращается с большей скоростью, а ведущий круг — с меньшей скоростью. Так как коэффициент трения между ведущим кругом и заготовкой больше из-за малой скорости вращения круга, чем между заготовкой и шлифующим кругом, то ведущий круг вращает заготовку со скоростью круговой подачи, а шлифующий круг снимает припуск. Движение продольной подачи достигается за счет поворота оси ведущего круга. Правка кругов производится периодически специальными устройствами. Кожух 11 обеспечивает защиту рабочего при разрушении круга.

**Внутришлифовальные станки** по виду круговой подачи выпускаются обычными и планетарными. Для обработки отверстий в деталях наибольшее распространение получили обычные станки, на которых деталям, закрепленным в патроне, сообщается вращательное движение (рис. 2.65).

На станине 1 монтируются основные узлы станка: стол 7 со шлифовальной бабкой 5 и мост 2 с бабкой 3. Мост перемещается по поперечным направляющим скольжения и обеспечивает подачу врезания, стол — по продольным

направляющим качения, обеспечивая продольную подачу. С помощью специального торцешлифовального приспособления 4 можно обработать торец заготовки. Приспособление имеет индивидуальный привод шпинделя и может поворачиваться в шариковых втулках с помощью гидроцилиндра. Торцешлифовальный шпиндель имеет осевое перемещение, обеспечивающее врезание. В станке предусмотрена правка шлифовальных кругов, а также компенсация износа основного шлифовального круга.



**Рис. 2.64**

*Общий вид бесцентрового шлифовального станка:*

1 — станина; 2 — неподвижная бабка; 3, 5 — устройства правки кругов; 4 — опора (нож) для обрабатываемой заготовки; 6 — подвижная бабка; 7 — маховичок для перемещения подвижной бабки; 8 — плита с направляющими; 9 — шлифовальный круг; 10 — ведущий круг; 11 — кожух.

Планетарные станки применяются, в основном, в инструментальных производствах.

**Плоскошлифовальные станки** в зависимости от конструкции можно разделить на несколько основных групп.

С горизонтальным шпинделем и прямоугольным крестовым столом. Такие станки предназначены для шлифования периферией круга горизонтальных и торцевых поверхностей заготовок в мелкосерийном и серийном производстве.

С прямоугольным столом и вертикальным шпинделем. Станки имеют повышенную жесткость, оснащены шлифо-

вальными кругами больших размеров и электродвигателями большой мощности, обеспечивают более высокую производительность и достаточно высокую точность обработки. Применяются в серийном и крупносерийном производстве.

С круглым столом и горизонтальным шпинделем. Станки выпускаются с ручным управлением и автоматизированные. Отличительной особенностью станков является наклонный стол, что позволяет шлифовать плоские выпуклые, вогнутые и конусные поверхности.

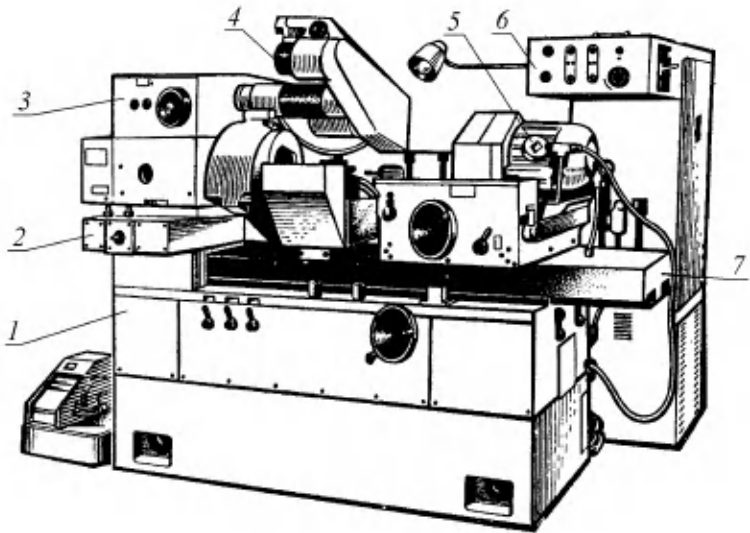


Рис. 2.65

*Внутришлифовальный станок:*

- 1 — станина; 2 — мост; 3 — бабка; 4 — торцешлифовальное приспособление;  
5 — шлифовальная бабка; 6 — пульт управления; 7 — стол.

С вертикальным шпинделем и круглым столом непрерывного действия. На этих станках обработка заготовок производится торцом круга и может быть организована работа в непрерывном автоматическом режиме. Станки применяются в крупносерийном и массовом производстве.

Схемы работы плоскошлифовальных станков приведены на рисунке 2.66.

Общий вид плоскошлифовального станка с горизонтальным шпинделем и прямоугольным столом приведен на рисунке 2.67. В станке имеются три относительных

движения шлифовальной бабки с кругом 3 и стола с заготовкой 4: горизонтальное возвратно-поступательное движение стола по направляющим станины 1 (продольная подача), вертикальное по направляющим колонны 2 (подача врезания) и поперечное по направляющим колонны (поперечная подача).

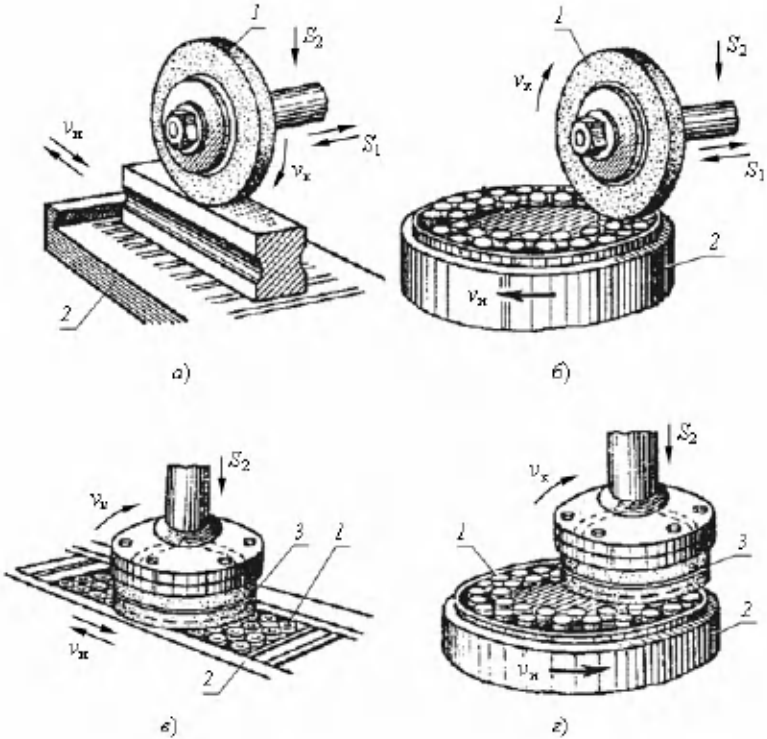


Рис. 2.66

Схемы работы плоскошлифовальных станков:

*a* — обработка периферий круга деталей на крестовом столе; *б* — обработка периферий круга деталей на вращающемся столе; *в* — обработка торцом круга деталей на крестовом столе; *г* — обработка торцом круга деталей на вращающемся столе;

1 — шлифовальный круг, обрабатывающий периферией; 2 — стол;

3 — шлифовальный круг, обрабатывающий торцом.

Возвратно-поступательное перемещение стола осуществляется от двух гидроцилиндров. Поперечная и вертикальная подачи могут быть ручными или автоматическими.

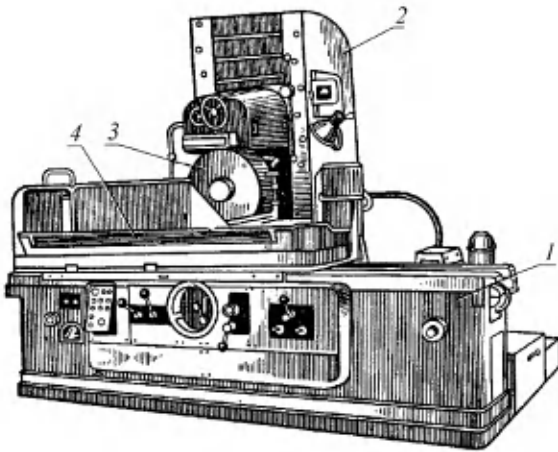


Рис. 2.67

Общий вид плоскошлифовального станка:

1 — станина; 2 — колонна; 3 — шлифовальный круг; 4 — рабочий стол.

В последние годы при обработке деталей все шире применяется *глубинное шлифование*, которое обеспечивает получение высокой точности при значительном повышении производительности обработки. Глубинное шлифование по сравнению с традиционным имеет ряд особенностей, которые выдвигают специфические требования к станкам для глубинного шлифования, в том числе: увеличение жесткости и длины направляющих для перемещения стола, повышение жесткости стойки для шпиндельной бабки и уменьшение вылета шпинделя шлифовального круга, повышение жесткости и долговечности шпиндельного узла, регулирование частоты вращения шпинделя, наличие системы поддержания постоянной скорости круга по мере его изнашивания, наличие системы автоматической балансировки круга во время работы.

На рисунке 2.68 приведена компоновка станка для глубинного шлифования. Станок представляет собой полуавтомат с прямоугольным столом, горизонтальным шпинделем и четырехкоординатным устройством ЧПУ. Конструкция шпинделя на опорах качения обеспечивает высокую жесткость шлифовальной бабки независимо от положения шлифовального круга над столом и исключает влияние веса перемещающихся узлов на точность обработки.

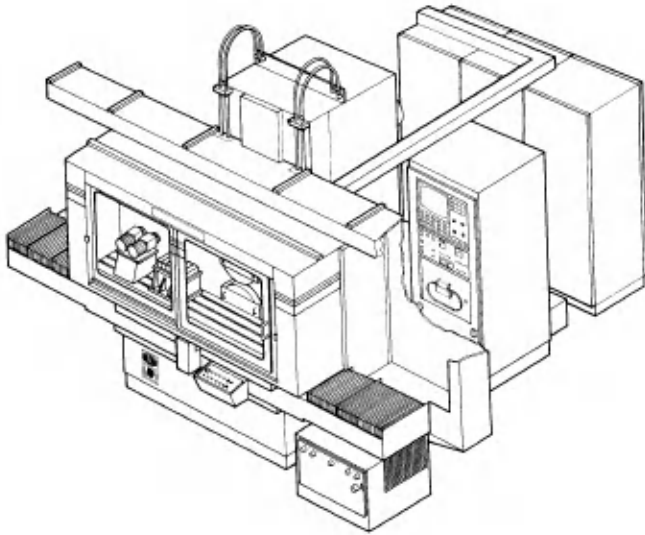


Рис. 2.68

*Специальный станок для двустороннего глубинного шлифования елочных замков турбинных лопаток*

### 2.5.5. Зубообрабатывающие станки

Наличие большого количества деталей с зубчатым зацеплением приводит к широкому применению зубообрабатывающих станков.

Наиболее производительными являются *зубофрезерные станки*, обработка на которых производится червячными фрезами. Эти станки имеют типовую структуру и компоновку. На рисунке 2.69 приведен общий вид зубофрезерного станка. Станок предназначен для фрезерования цилиндрических прямозубых и косозубых колес, а также червячных колес в условиях серийного и крупносерийного производства. На станине 1 расположены салазки 2 стола 3. Стол может перемещаться в радиальном направлении. Слева на станине размещена стойка 4, на вертикальных направляющих которой установлен суппорт 5 с фрезерной головкой 6. Благодаря наличию поворотного круга, фрезу вместе с фрезерной головкой можно поворачивать на заданный угол. Справа на столе расположена стойка 8, по вертикальным направляющим которой перемещается кронштейн 7, поддерживающий верхний конец оправки с заготовкой.

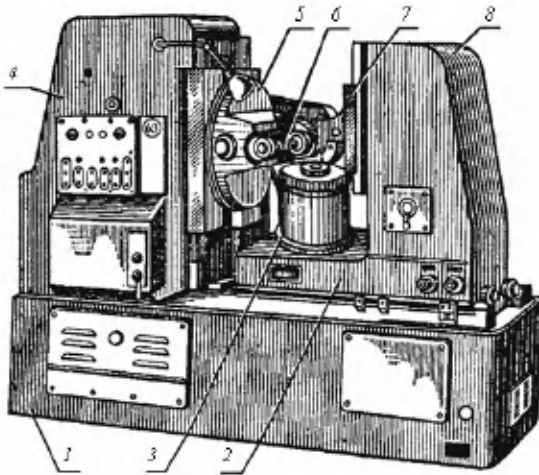


Рис. 2.69

*Зубофрезерный станок мод. 5М324А*

Внутренние зубчатые зацепления, а также малые венцы блочных колес нарезаются на *зубодолбежных станках*. Схема зубодолбежного станка мод. 5В150 приведена на рисунке 2.70. На станке можно нарезать прямозубые и косозубые колеса.

Нарезаемое колесо 3 крепится на горизонтальной планшайбе стола 2 при помощи специального приспособления. Стол имеет подачи: ускоренную, от отдельного привода, для ориентировочной установки в исходное положение; медленную ручную для точной установки в исходное положение и врезания долбяка 4 в заготовку по направляющим 7; механическую (радиальная подача) для врезания долбяка в заготовку на заданную глубину обеспечивается механизмом врезания 8. Станок работает по замкнутому автоматическому циклу. После пуска станка начинаются одновременные движения долбяка, обката и механической подачи. При достижении долбяком заданной глубины процесс врезания автоматически прекращается, после чего планшайба стола делает один полный оборот. Косозубые шестерни нарезаются при помощи специального приспособления, которое монтируется на суппорте станка. Все узлы монтируются к станине 1. Управление и наладка станка производится с помощью пульта управления 9. Электрошкаф 6 служит для размещения электрооборудования.

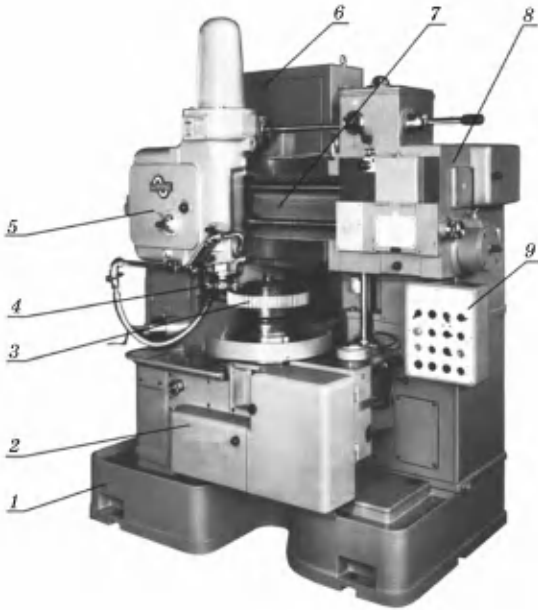


Рис. 2.70

*Зубодолбежный станок мод. 5B150:*

1 — станина; 2 — стол откидной; 3 — обрабатываемое зубчатое колесо; 4 — долбик; 5 — инструментальная каретка со штосселем; 6 — электрошкаф; 7 — направляющие; 8 — механизм врезания; 9 — пульт управления.

Нарезание конических колес производится на *зубо-строгальных станках* (прямозубые) и на специальных *зуборезных полуавтоматах* (с круговым зубом). Станки работают по методу обката. Общий вид зубострогального станка приведен на рисунке 2.71.

Обрабатывающие резцы устанавливаются в каретки 4, совершающие попеременное возвратно-поступательное перемещение. Каретки находятся в направляющих планшайбы 3, которая поворачивается с помощью люльки 2, обеспечивая движение обката инструмента относительно заготовки, установленной в шпинделе бабки 6, расположенной на столе 5. Все узлы станка смонтированы на станине 1. Внутри станины и стойки размещены приводы и органы настройки формообразующих движений. Станок работает в полуавтоматическом режиме. Обработка каждого зуба производится поочередно. После полной обработки детали станок автоматически останавливается.

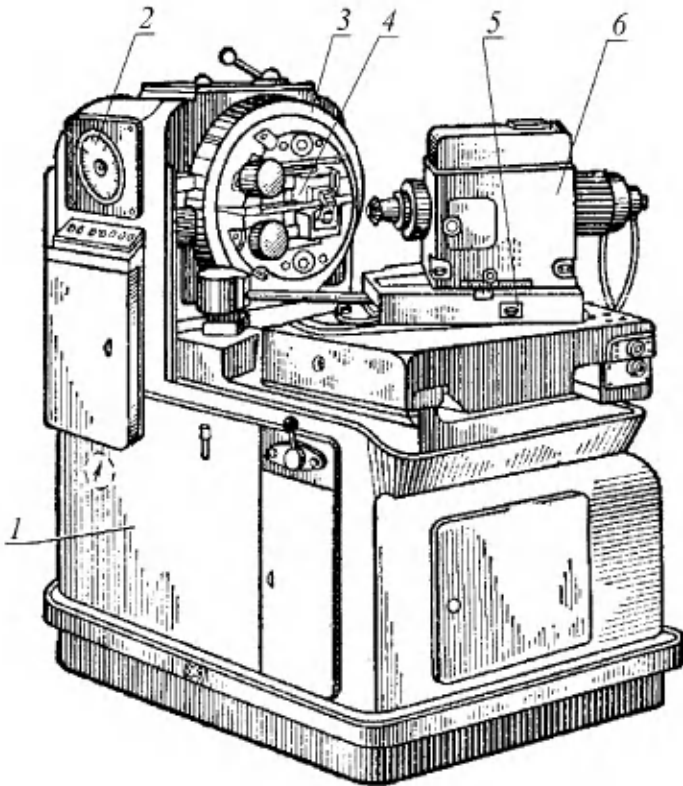


Рис. 2.71

*Зубострогальный полуавтомат модели 5Т23В:*

1 — станина; 2 — люлька; 3 — планшайба; 4 — каретки; 5 — стол; 6 — бабка.

Чистовая обработка поверхностей зубьев производится на *шевинговальных* или *зубошлифовальных* станках. Схема работы *зубошевинговального станка* приведена на рисунке 2.72. Шейер 1 вращается от электродвигателя и принудительно вращает обрабатываемую заготовку 2, установленную в центрах правой 3 и левой 4 бабки, размещенных на верхнем столе 5. Верхний стол шарнирно связан с нижним столом 6, получающим возвратно-поступательное движение. Стол в конце каждого двойного хода совершает вертикальную подачу. Таким образом, в станке происходят следующие движения: вращение шейера и колеса, возвратно-поступательное перемещение колеса и перемещение колеса в радиальном направлении к шейеру.

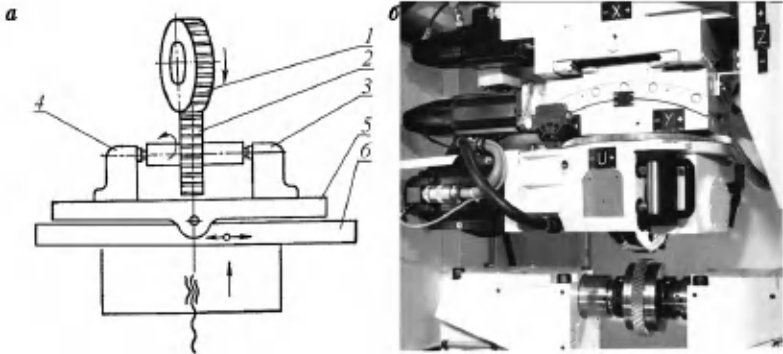


Рис. 2.72

*Схема работы зубошевнговального станка:*

*a* — схема работы; *b* — общий вид станка;

1 — шевер; 2 — обрабатываемая заготовка; 3 — правая бабка;

4 — левая бабка; 5 — стол верхний; 6 — стол нижний.

Для обработки колес высокой точности и закаленных колес применяются *зубошлифовальные станки*. Принципы работы зубошлифовальных станков подробно рассмотрены в разделе 8.4.2.

### 2.5.6. Протяжные станки

Протяжные станки по характеру работы делятся на станки внутреннего и наружного протягивания, а по расположению инструмента — на горизонтальные и вертикальные.

**Горизонтальные станки.** Общий вид горизонтального станка для внутреннего протягивания приведен на рисунке 2.73.

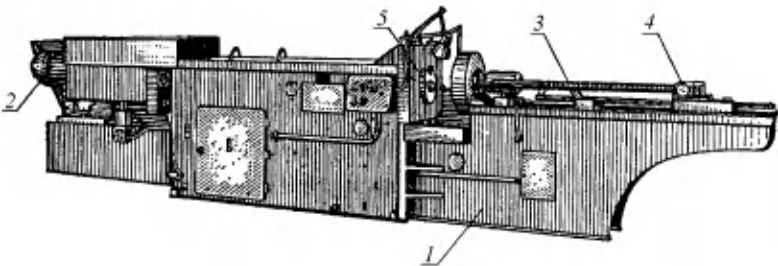


Рис. 2.73

*Горизонтально-протяжной станок мод. 7Б55*

В полой части сварной станины 1 коробчатой формы смонтированы основные агрегаты гидравлического привода, являющегося основным для этого вида станков. Слева расположен силовой цилиндр 2. Шток поршня связан с рабочими салазками, которые, перемещаясь в направляющих вдоль оси станка, служат дополнительной опорой. На конце штока имеется втулка с патроном для закрепления левого конца протяжки 3, правый конец которой зажат во вспомогательном патроне 4. Приспособление для установки детали и сама деталь упираются в неподвижный корпус 5 станины. Станок может работать с полным и простым циклом. При полном цикле прямого хода осуществляется подвод протяжки, замедленный рабочий ход, настроенный рабочий ход для обрабатываемых зубьев протяжки, замедленный рабочий ход для калибрующих зубьев и стоп. При обратном ходе осуществляется замедленный ход и отвод протяжки. Простой цикл отличается от полного отсутствием подвода и отвода протяжки.

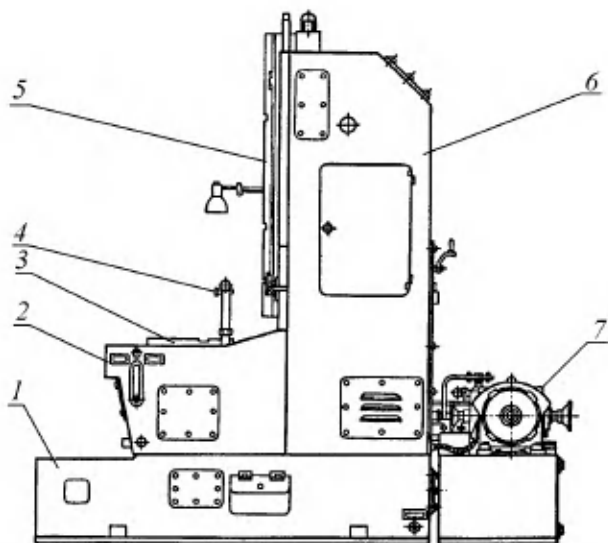
**Вертикально-протяжные станки** применяются для наружного протягивания сложных корпусных элементов деталей (например, пазы дисков турбин и компрессоров) и для внутреннего протягивания.

На рисунке 2.74 приведен общий вид вертикального протяжного станка для внутреннего протягивания.

На основании 1 установлена тумба 2, на которой смонтирован стол 3. На столе в приспособлениях устанавливаются и закрепляются детали. Протяжки при помощи инструментальных плит закрепляются в каретке 5, перемещающейся в вертикальных направляющих станины 6. При перемещении протяжки вниз осуществляется рабочий ход, при ходе вверх — холостой ход. Все рабочие движения обеспечиваются приводом 7. Станок имеет два стола и две каретки, работа которых согласована: если с одной совершается рабочий ход, то с другой — холостой.

Вертикальные протяжные станки для наружного протягивания отличаются от станков для внутреннего протягивания тем, что стол имеет поперечное перемещение, связанное с различной формой и размерами деталей, подвергаемых обработке.

На базе вертикальных станков для наружного протягивания выпускаются *многопозиционные* станки и станки для непрерывного протягивания, имеющие многопозиционный индексруемый стол.

**Рис. 2.74**

*Вертикальный протяжной станок:*

1 — станина; 2 — тумба; 3 — стол; 4 — приспособление с обрабатываемыми заготовками; 5 — каретка; 6 — станина; 7 — привод.

### ОБРАБОТКА НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

Детали с наружными поверхностями вращения подразделяются на несколько классов в зависимости от конструкторско-технологического подобия, которое определяется совокупностью признаков. За основу обычно принимаются следующие основные признаки: геометрическая форма, параметрический (учитывает отношение длины детали к диаметру), конструктивный, функциональный.

Учитывая один из основных признаков классификации — геометрическую форму деталей, в данной главе рассмотрена обработка трех классов деталей, имеющих разнообразную форму и наружные поверхности тел вращения:

- 1) тела вращения типа валов, дисков, штоков и др.;
- 2) тела вращения с профилем типа лопаток компрессора с цапфами;
- 3) тела вращения и невращения типа тройников, угольников, крестовин (детали арматуры), имеющие элементы с наружными поверхностями вращения.

Обработку наружных поверхностей вращения деталей из конструкционных и легированных сталей целесообразно выполнять в зависимости от соотношения длины детали по оси вращения к наибольшему наружному диаметру: при  $L/D \geq 2$  (валы, штоки, гильзы); при  $2 \geq L/D > 0,5$  (пальцы, втулки); при  $L/D \leq 0,5$  (диски, кольца, фланцы).

Классификация основных методов обработки наружных поверхностей деталей типа тел вращения приведена на рисунке 3.1.



Рис. 3.1

*Классификация основных методов обработки наружных поверхностей тел вращения:*

1 — точение; 2 — фрезерование; 3 — протягивание; 4 — шлифование; 5 — отделочные методы; 6 — упрочняющие методы.

Обработку наружных поверхностей тел вращения ответственных деталей обычно подразделяют на этапы: черновой, получистовой, чистовой и окончательный. Этапы обработки выбираются в зависимости от служебного назначения детали, технических и технологических требований, характеристик термической обработки, точности, качества поверхностного слоя.

### 3.1. ОБРАБОТКА НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ТОЧЕНИЕМ

Точение широко применяется при обработке наружных поверхностей тел вращения и подразделяется на черновое, получистовое, чистовое и тонкое.

**Черновое точение** обеспечивает снятие дефектных слоев и основного припуска на обработку (примерно 70%). Черновое точение обеспечивает получение точности 14–12 квалитета и шероховатости поверхности  $Ra = 50\text{--}6,3$  мкм.

**Получистовое точение** обеспечивает съём 20–25% припуска и получение формы близкой к детали. Точность обработки 13–11 квалитет, шероховатость поверхности  $Ra = 25\text{--}1,6$  мкм.

**Чистовое точение** обеспечивает получение окончательной формы и размеров детали. Точность 10–8 квалитет, шероховатость поверхности  $Ra = 6,3\text{--}0,4$  мкм.

**Тонкое точение** выполняется при снятии очень тонких стружек и обеспечивает точность 8–6 квалитета и шероховатость поверхности  $Ra = 1,6\text{--}0,2$  мкм. Тонкое точение находит применение при окончательной обработке тел вращения, в том числе и сложной формы.

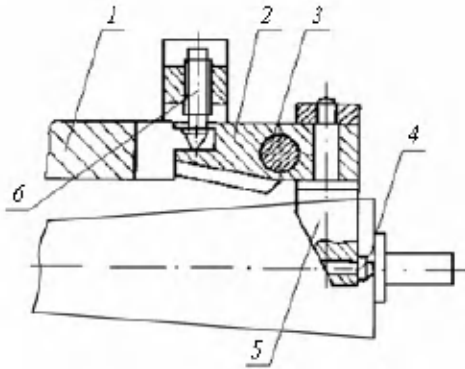
Токарная обработка наружных поверхностей вращения деталей типа валов в зависимости от типа производства выполняется на токарных, токарно-револьверных, токарно-многолезцовых с копировальными устройствами, токарных полуавтоматах с ЧПУ и других токарных станках.

Для обработки сложных поверхностей тел вращения применяются фасонные призматические и круглые резцы, обеспечивающие высокопроизводительную обработку сложнофасонных деталей.

Токарная обработка наружных поверхностей вращения, например, цапф лопаток компрессора, имеющих участки переменной жесткости в различных плоскостях, представляет большую сложность и трудоемкость для получения правильной геометрической формы цапфы.

Для обработки *цапф лопаток* применяются специальные приспособления. На рисунках 3.2 и 3.3 представлено

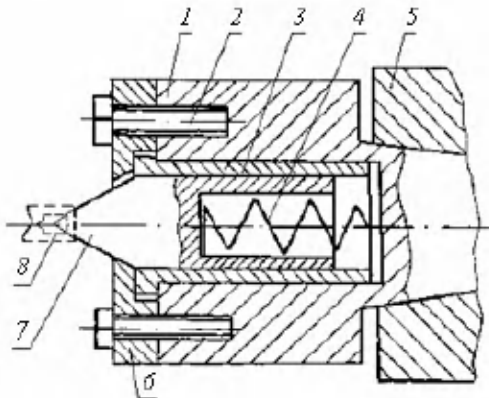
приспособление для обработки наружных поверхностей цапф лопаток как на токарном, так и на круглошлифовальном станках, состоящее из устройства для установки и растяжения лопатки (рис. 3.2) и подпружиненного центра (рис. 3.3), устанавливаемого в пинולי задней бабки станка.



**Рис. 3.2**

*Устройство для установки и растяжения лопатки при обработке цапфы:*

1 — кронштейн; 2 — рычаг; 3 — ось; 4 — упор; 5 — вилка; 6 — винт.



**Рис. 3.3**

*Подпружиненный центр:*

1 — корпус; 2 — винт; 3 — втулка; 4 — пружина; 5 — пиноль задней бабки; 6 — крышка; 7 — центр; 8 — цапфа лопатки.

Устройство (рис. 3.2) состоит из кронштейна 1, жестко закрепленного на корпусе трехкулачкового патрона (на чертеже не показан), установленного на шпинделе станка, рычага 2, вращающегося на оси 3, двух упоров 4, запрессованных в вилку 5, которая может вращаться вокруг оси, и винта 6, осуществляющего растяжение лопатки.

Перед обработкой лопатку зажимают одним концом в патроне, а другим упирают в центр 7 (рис. 3.3), установленный в пиноль 5 задней бабки, и сжимают пружину 4, регулируя осевую силу закрепления лопатки, действующую со стороны цапфы 8. Затем вращением винта 6 (рис. 3.2) подводят упоры 4 до соприкосновения с лопаткой. При этом обеспечивается симметричное расположение упоров 4. Устройство обеспечивает как равенство сил, действующих со стороны спинки и корыта лопатки, так и расстояний от точек их приложения до оси лопатки, т. е. обеспечивается равенство моментов сил, действующих со стороны спинки и корыта при одинаковой жесткости пера лопатки относительно плоскости, в которой действуют силы растяжения.

Закрепление выполняют зажатием одной цапфы в патроне и выдвиганием пиноли задней бабки с подпружиненным центром на 10–15 мм, что при жесткости пружины 20 Н/мм обеспечивает силу 200–300 Н, после чего осуществляют растяжение детали. Обработка лопаток с применением рассмотренного приспособления обеспечивает цилиндричность цапф в пределах 0,005–0,01 мм.

Токарная обработка наружных поверхностей тел вращения *у деталей с пересекающимися осями* типа угольников, тройников, крестовин (детали арматуры) выполняется на токарных и токарно-револьверных станках за несколько установов, чаще всего с использованием баз, получаемых штамповкой. Для обработки применяются токарные патроны с установочными базирующими элементами, позволяющими ориентировать заготовку.

Полная обработка таких деталей на токарном станке может быть выполнена за несколько установов, что снижает производительность обработки, которая может быть повышена за счет применения многосторонней обработки на многоцелевых фрезерно-сверлильно-расточных станках с поворотным столом или за счет применения на токарных станках специального поворотного патрона (рис. 3.4), обеспечивающего фиксированный поворот заготовки на 90°.

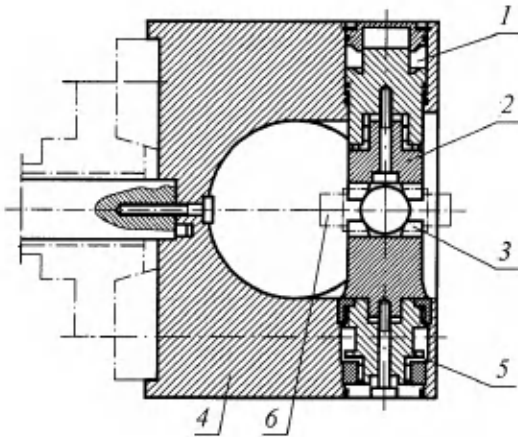


Рис. 3.4

## Поворотный патрон

В корпусе патрона 4 размещены механизмы поворота и зажима заготовки. Обрабатываемая заготовка, например крестовина арматуры двигателя 6, базируется по сменному элементу 3, установленному в цапфу 5, которая смонтирована на опорах качения и снабжена четырехгранником для поворота. Зажим детали (крестовины) осуществляется от встроенного гидроцилиндра 1, в поршне которого установлен элемент зажима 2, свободно вращающийся на опорах качения. Поворотные патроны такой конструкции обычно работают от гидросистемы станка или отдельного автономного гидропривода, снабженного необходимой панелью управления. Рабочая жидкость от гидропривода под давлением 4,5 МПа поступает во вращающийся патрон через распределитель, установленный на заднем конце шпинделя. Внутренняя вращающаяся часть распределителя соединена с гидроцилиндрами поворота и зажима детали трубопроводами, размещенными в центральном отверстии шпинделя. При этом поворот осуществляется без остановки вращения шпинделя. Имея малые размеры рабочих цилиндров такие поворотные патроны обладают достаточно высоким быстродействием: зажим детали производится за 0,5–1 с, а ее поворот на  $90^\circ$  — за 1–2 с.

Многосторонняя обработка наружных поверхностей вращения на деталях арматуры позволяет использовать токарные станки с ЧПУ в гибких производственных системах.

### 3.2. ФРЕЗЕРОВАНИЕ НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ Тел ВРАЩЕНИЯ

При обработке наружных поверхностей вращения применяется метод ротационного фрезерования (рис. 3.5). В этом случае заготовке сообщается круговая подача. Фрезы, установленные на два шпинделя, вращаются в разные стороны. При вращении заготовки фрезы обрабатывают поверхности вращения.

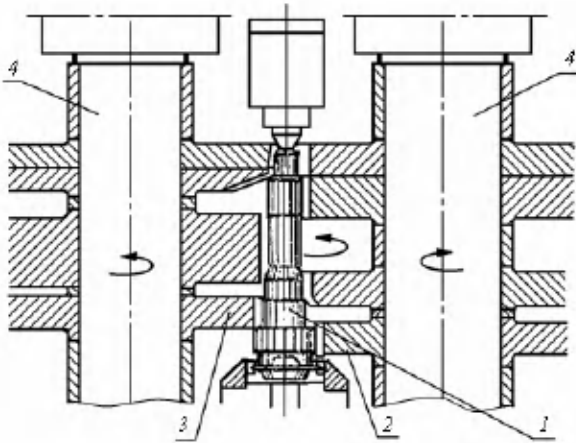


Рис. 3.5

Ротационное фрезерование:

1 — обрабатываемая заготовка; 2, 3 — фрезы; 4 — шпиндели.

Точность обработки при контурном ротационном фрезеровании наружных поверхностей вращения соответствует 10–9 качеству, а шероховатость обработанных поверхностей  $Ra = 8\text{--}5$  мкм.

### 3.3. ПРОТЯГИВАНИЕ НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ Тел ВРАЩЕНИЯ

Протягивание наружных поверхностей тел вращения применяется взамен фрезерования, шлифования и других методов обработки. Для протягивания используются специальные высокопроизводительные станки. Используются плоские и дисковые протяжки. В обоих случаях заготовке сообщают круговую подачу. Плоская протяжка перемещается прямолинейно, а дисковая протяжка совершает вращательное движение вокруг своей оси, при этом каждый

зуб протяжки работает как тангенциальный резец. Ширина протяжки соответствует ширине обрабатываемой поверхности. На рисунке 3.6а, б показаны схемы наружного протягивания поверхностей вращения плоской (а) и дисковой (б) протяжками.

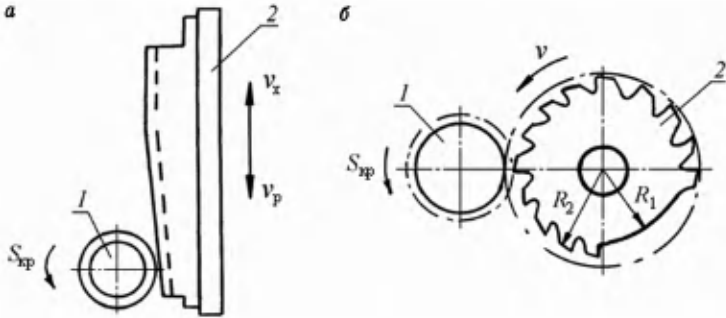


Рис. 3.6

Схема наружного протягивания поверхностей вращения плоской (а) и дисковой (б) протяжками:

1 — обрабатываемая заготовка; 2 — протяжка.

Наружное протягивание обеспечивает точность 8–7 квалитетов и шероховатость поверхностей  $Ra = 6,3–0,2$  мкм.

### 3.4. ШЛИФОВАНИЕ НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ Тел ВРАЩЕНИЯ

#### 3.4.1. Обработка шлифовальными кругами

При обработке наружных поверхностей тел вращения наиболее распространенным видом является круглое наружное шлифование, выполняемое на круглошлифовальных станках. Для установки, зажима и обработки заготовок на станке используют центровые отверстия для деталей типа валов и цилиндрические поверхности (оправки) для деталей типа полых валов.

Виды наружного круглого и бесцентрового шлифования наружных поверхностей тел вращения приведены на рисунке 3.7.

Основные схемы круглого и бесцентрового наружного шлифования показаны на рисунке 3.8.

При шлифовании *методом продольной подачи* (рис. 3.8а) заготовка вращается равномерно и совершает возвратно-поступательное движение. В конце хода

заготовки шлифовальный круг перемещается на величину подачи  $S_{\text{п}}$  и при следующем ходе снимается слой металла определенной глубины. Процесс шлифования продолжается до достижения необходимого размера заготовки.



Рис. 3.7

Виды наружного круглого и бесцентрового шлифования

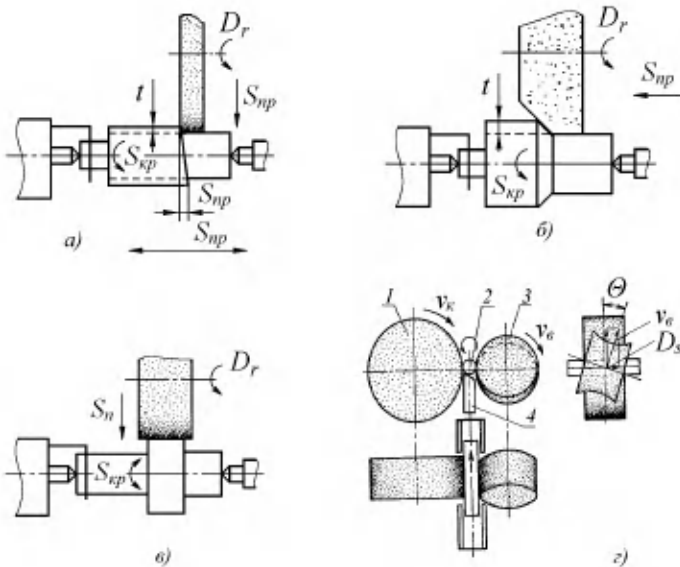


Рис. 3.8

Схемы круглого и бесцентрового наружного шлифования:

*a* — методом продольной подачи; *б* — глубинного; *в* — врезного; *г* — бесцентрового с продольной подачей.

**Глубинное шлифование** (рис. 3.8б) выполняется за один проход круга, имеющего конический режущий участок, удаляющий основную часть срезаемого слоя. Цилиндрический участок круга является зачищающим элементом, обеспечивающим формирование цилиндрической поверхности, требуемой шероховатости и точности обработки.

**Врезное шлифование** (рис. 3.8в) применяется при обработке заготовок типа валов с прямолинейной, криволинейной, фасонной и другими поверхностями. При врезном шлифовании ширина шлифуемого элемента детали обычно перекрывается шириной шлифовального круга. При многокруговой обработке круги перемещаются с постоянной подачей до получения необходимого размера.

**Бесцентровое шлифование с продольной подачей** (рис. 3.8г) является производительным методом обработки. Заготовка обрабатывается в незакрепленном состоянии. Бесцентровое шлифование с поперечной подачей позволяет выполнять обработку деталей типа тел вращения, например валов, как с отверстиями, так и без них. Процесс шлифования может быть автоматизирован. При бесцентровом шлифовании заготовка 2 располагается между рабочим 1 и ведущим 3 кругами, а снизу поддерживается ножом 4. Центр заготовки должен быть несколько выше линии, соединяющей центры обоих кругов (на 10–15 мм), во избежание огранки. Для обеспечения продольного перемещения заготовки ось ведущего круга установлена под небольшим углом ( $1-7^\circ$ ) к оси рабочего круга.

Шлифовальный круг имеет окружную скорость  $v_k = 30-35$  м/с, а ведущий —  $v_v = 10-40$  м/мин. При бесцентровом шлифовании с продольной подачей за несколько рабочих ходов можно обеспечить точность по 6-му качеству и шероховатость обработанной поверхности  $Ra \leq 0,2$  мкм.

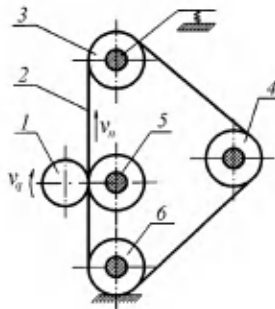
Врезное бесцентровое шлифование обычно применяется для обработки цилиндрических деталей с уступом, а также деталей, имеющих наружную поверхность вращения в форме конуса. При этом методе шлифования оси кругов параллельны или ведущий круг устанавливается под малым углом ( $0,2-0,5^\circ$ ). Шлифовальный круг заправляется в соответствии с профилем детали. Шлифование ведется с поперечной подачей до тех пор, пока не будет получен необходимый размер.

При шлифовании деталей с уступами бабка перемещается по направляющим станины с подачей  $S_{\Pi}$  до установленного положения.

### 3.4.2. Ленточное шлифование

Для обработки наружных поверхностей вращения, например валов, применяется ленточное шлифование. В зависимости от требований, формы, точности и размеров обрабатываемой поверхности применяется несколько схем ленточного шлифования, в том числе с контактной опорой, без контактной опоры, с односторонней и двусторонней обработкой.

Схема обработки наружной поверхности тела вращения бесконечной лентой показана на рисунке 3.9.



**Рис. 3.9**

*Схема обработки бесконечной лентой наружной поверхности вращения:*

1 — обрабатываемая заготовка; 2 — лента; 3 — натяжной ролик; 4 — опорный ролик; 5 — контактный ролик; 6 — приводной ролик.

При ленточном шлифовании в качестве режущего инструмента применяются водостойкие (при использовании СОТС) и неводостойкие абразивные ленты.

Для обработки жаростойких, жаропрочных, титановых и других труднообрабатываемых сплавов и сталей целесообразно применение алмазных лент. Использование абразивных и алмазных лент при шлифовании обеспечивает рассеивание теплоты, уменьшает вероятность появления шлифовочных прижогов и формирование в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений.

## 3.5. ОТДЕЛОЧНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

Для достижения более высокой точности и качества поверхностного слоя применяют отделочные методы обработки.

**Притирка** наружных поверхностей тел вращения является окончательным методом обработки, обеспечивающим малые отклонения размеров. Притиркой достигается 5–3 квалитеты точности и шероховатость обработанной поверхности  $Ra = 0,16\text{--}0,1$  мкм.

Схема притирки наружной поверхности вращения приведена на рисунке 3.10. В качестве инструмента применяется притир, охватывающий обрабатываемую поверхность. На поверхность притира, изготовляемого из мягких материалов (медь, чугун, бронза), наносится притирочная паста, состоящая из абразивного или алмазного порошка, химически активного вещества и других компонентов.

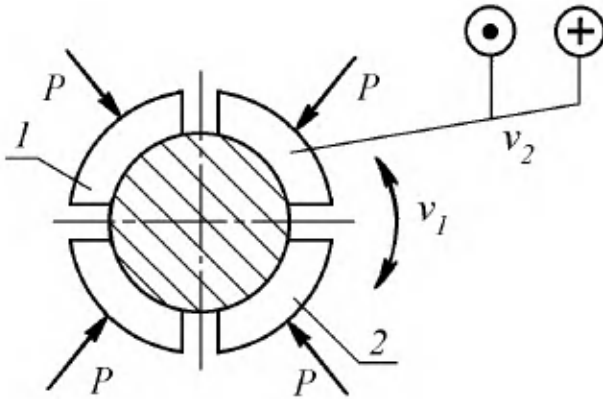


Рис. 3.10

Схема притирки наружной поверхности тела вращения:

1 — притиры; 2 — обрабатываемая заготовка.

В процессе обработки заготовки получает вращательное движение со скоростью  $v_1 = 10\text{--}20$  м/мин, а бруски получают возвратно-поступательное перемещение вдоль оси заготовки со скоростью  $v_2$ .

Притирка наружных поверхностей вращения используется для обеспечения цилиндричности ответственных деталей, например, цапф шестерен насосов. Для притирки применяются специализированные станки, обеспечивающие точность размеров и формы детали до 1 мкм.

Притирка может также осуществляться с использованием твердосплавных дисков. Доводочные диски изготавливаются из твердых сплавов ВК6М, ВК8М, ВК10. Схема притирки на притирочном станке с использованием твердосплавных дисков показана на рисунке 3.11.

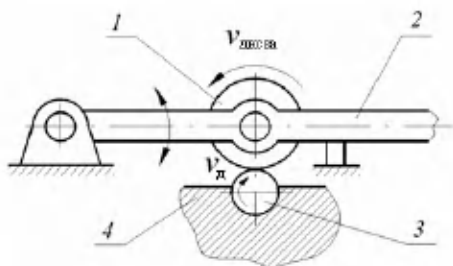


Рис. 3.11

*Схема притирки цилиндрической поверхности твердосплавным диском*

Твердосплавный диск 1 закрепляется в шпинделе качающегося рычага 2. Заготовка 3 получает вращательное движение со скоростью  $v_d = 10\text{--}50$  м/мин и перемещается в осевом направлении. Опорой для заготовки служит люнет 4. Притирка наружных поверхностей вращения с помощью твердосплавных дисков обеспечивает отклонение от цилиндричности обработанной поверхности  $0,5\text{--}2$  мкм и шероховатость  $Ra = 0,04\text{--}0,02$  мкм при обработке стальных деталей. Притирка цилиндрических поверхностей вращения твердосплавными роликами может выполняться на специальных или токарных станках классов В и С, у которых шпиндель смонтирован на подшипниках скольжения.

**Полирование** применяется для уменьшения шероховатости поверхности. Обработка выполняется на высоких скоростях вращения заготовки (до 40 м/с). Окончательное полирование выполняется при малых давлениях сил резания ( $0,03\text{--}0,2$  МПа). В качестве материала рабочих инструментов используют войлок, фетр, ткань и другие материалы, на которые наносят полировальные пасты из электрокорунда, карбида кремния зеленого. Для полирования применяются также полировальные круги на поропластовой, пенополиуретановой и других связках. При окончательном полировании обеспечивается шероховатость обработанной поверхности  $Ra = 0,1\text{--}0,012$  мкм.

**Суперфиниширование** — процесс, применяемый для сверхтонкой обработки наружных цилиндрических и конических поверхностей вращения. Обычно при суперфинишировании обработка выполняется за две стадии. Сначала удаляются неровности от предыдущей обработки, а затем неровности, образовавшиеся на первой стадии обработки. На рисунке 3.12 показана схема наружного суперфиниширования

в центрах. Обработка производится мелкозернистыми абразивными или алмазными брусками, количество которых может быть от одного до четырех. Давление инструмента (бруска) на поверхность заготовки составляет 0,1–0,3 МПа для стальных деталей. При обработке движение бруска и детали состоит из трех движений: коротких колебательных движений бруска со скоростью 400–3000 дв. ход/мин, вращения детали со скоростью 10–80 м/мин и возвратно-поступательного движения головки с бруском вдоль обрабатываемой детали со скоростью 2 м/мин.

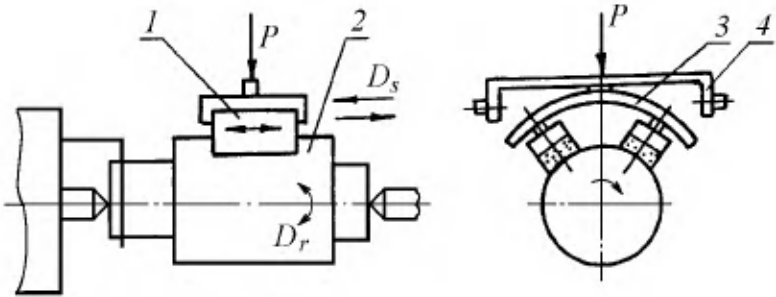


Рис. 3.12

*Схема суперфиниширования наружной цилиндрической поверхности в центрах:*

1 — брусок; 2 — обрабатываемая заготовка; 3 — пружина суперфинишной головки;  
4 — державка головки.

Суперфиниширование обеспечивает точность обработки 5–3 квалитета, шероховатость поверхности  $Ra = 0,1–0,012$  мкм.

### 3.6. УПРОЧНЯЮЩИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

Отделочная обработка методами пластического деформирования сопровождается упрочнением поверхностного слоя, что способствует повышенной работоспособности и надежности деталей и изделий.

К наиболее распространенным упрочняющим методам обработки наружных поверхностей тел вращения относятся: алмазное выглаживание, обкатывание роликами и шариками, центробежная шариковая обработка (рис. 3.13). Эти методы обеспечивают повышение твердости и прочности поверхностного слоя, формирование благоприятных остаточных напряжений, уменьшение параметров шероховатости.

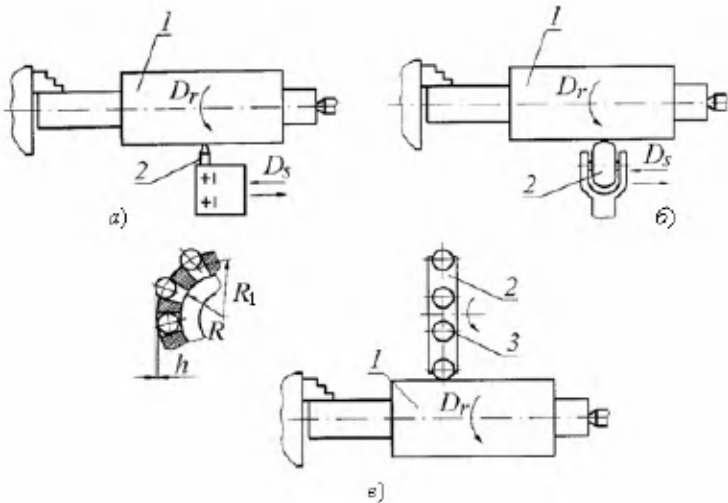


Рис. 3.13

Схемы отделочной обработки методами пластического деформирования наружных поверхностей вращения:

а — алмазное выглаживание; б — обкатывание роликом; в — центробежное шариковое упрочнение.

При **алмазном выглаживании** обработка проводится в условиях трения скольжения. Рабочим инструментом служат державки с наконечниками из натуральных или искусственных алмазов, имеющих форму в виде конуса или полусферы.

Алмазное выглаживание (рис. 3.13а) обычно выполняется на токарных станках. Державка 2 с алмазным наконечником устанавливается в резцедержатель. Движение заготовки 1 и инструмента аналогичны движениям заготовки и инструмента при обтачивании. Сила поджима алмазного наконечника к обрабатываемой заготовке составляет 50–300 Н. Алмазное выглаживание обеспечивает точность 7–5 квалитетов, шероховатость поверхности  $R_a = 0,15\text{--}0,02$  мкм.

**Обкатывание роликом** (рис. 3.13б) применяется при обработке наружных поверхностей и является широко доступным и распространенным методом. Обкатные ролики изготавливаются из сталей ШХ-15, У10А, У12А, Х12М, ХВГ. Ролики имеют твердость HRC 58–65. Качество обработанных поверхностей при обкатывании упрочняющим роликом 2 зависит от режимов деформирования: силы

обкатывания, подачи, скорости, числа рабочих ходов и применяемой СОТС. Перед обкатыванием заготовку 1 обрабатывают точением, шлифованием и другими способами. Обкатывание выполняется на токарных станках и обеспечивает точность по 10–7 качеству и шероховатость  $R_a = 2,0-0,5$  мкм.

Обкатывание шариками аналогично обработке роликами. В качестве рабочего инструмента применяются закаленные шарики, устанавливаемые в специальные устройства и приспособления. Обкатывание шариками наружных поверхностей выполняется на токарных и револьверных станках и обеспечивает точность поверхности 10–7 качества и шероховатость поверхности  $R_a = 2,0-0,05$  мкм.

**Центробежное шариковое упрочнение** (рис. 3.13в) наружных поверхностей вращения аналогично радиальному обжатию. При этом используется центробежная сила шариков, свободно сидящих в радиальных отверстиях диска. Шарики 3 при быстром вращении упрочнителя-сепаратора 2 смещаются в радиальном направлении на величину  $h = (R_1 - R)$ , нанося многочисленные удары по заготовки 1 и пластически деформируя ее поверхность. Центробежное шариковое упрочнение выполняется на станках общего (токарные, шлифовальные) и специального назначения.

Центробежное упрочнение обеспечивает точность по 9–7 качеству и шероховатость поверхности  $R_a = 0,4-0,1$  мкм.

# ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ

## 4.1. ВИДЫ ОТВЕРСТИЙ И МЕТОДЫ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

Конструктивные элементы в форме отверстий имеются у деталей различной формы: тел вращения (диски, валы, зубчатые колеса, детали форсунок, кольцевые детали и др.); корпусных (корпуса турбин, насосов, коробок приводов и др.); сложнофасонных и плоских. Отверстия подразделяются на цилиндрические, конические, ступенчатые и фасонные. Они могут быть открытыми с двух или с одной стороны (глухие отверстия). В зависимости от глубины обработки отверстия могут быть неглубокими и глубокими (длина отверстия превышает его диаметр в десять и более раз).

Обработка отверстий производится механическими методами с использованием инструментов, а также физико-химическими методами. При лезвийной обработке отверстий наиболее широкое распространение получили сверление, зенкерование, развертывание, растачивание и протягивание. Чистовую и отделочную обработку отверстий осуществляют хонингованием, притиркой, доводкой и другими методами, выполняемыми с применением абразивных и алмазных инструментов, порошков и паст.

Применение в производстве изделий труднообрабатываемых жаропрочных, титановых, жаростойких, коррозионностойких и других сталей и сплавов в совокупности с широким диапазоном диаметров отверстий ( $D = 0,1-100$  мм и глубиной до 100 диаметров) и необходимостью формирования широкой гаммы разнообразных эксплуатационных свойств поверхностей отверстий заставляет совершенствовать технологию производства с использованием прогрессивных физико-химических методов обработки.

Эффективным методом обработки отверстий является поверхностное пластическое деформирование (ППД), направленное на повышение твердости, износостойкости, формирование благоприятных остаточных напряжений, уменьшение шероховатости. Из этих методов чаще всего используют обкатывание, раскатывание (шариковыми и роликовыми раскатниками), выглаживание, прошивание и дорнование. При изготовлении деталей из листовых материалов получение отверстий может выполняться пробив-

кой и калибровкой в штампах. Отверстия малого диаметра (до 1 мм) или некруглого профиля получают электроэрозионной, электронно-лучевой или лазерной обработкой.

## 4.2. ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ СВЕРЛЕНИЕМ, ЗЕНКЕРОВАНИЕМ, РАЗВЕРТЫВАНИЕМ

Распространенными процессами обработки сквозных и глухих отверстий являются: сверление, зенкерование и развертывание. Эти процессы выполняются при сочетании двух формообразующих движений: главного движения резания в виде быстрого вращения инструмента или заготовки вокруг оси обрабатываемого отверстия и движения подачи в виде перемещения инструмента или заготовки вдоль оси отверстия. Схемы и элементы сечения среза при сверлении, зенкеровании и развертывании отверстий приведены на рисунке 4.1.

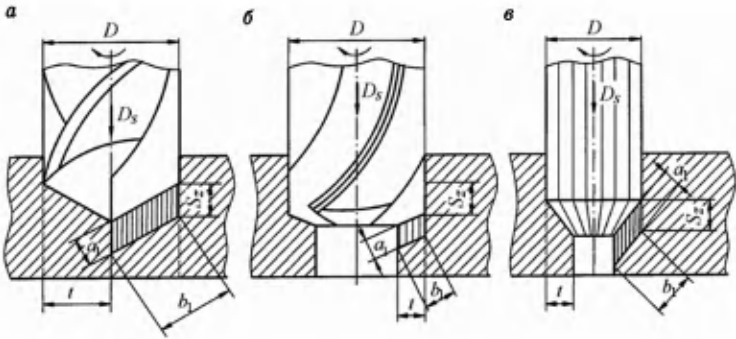


Рис. 4.1

*Схемы и элементы сечения среза при сверлении, зенкеровании и развертывании отверстий:*

$a_1$  — толщина среза;  $b_1$  — ширина среза;  $S_z$  — подача на зуб;  $t$  — глубина резания;  $D$  — диаметр отверстия;  $D_s$  — направление подачи.

**Сверление** отверстий (рис. 4.1а) применяется при черновой обработке в сплошном материале и при рассверливании отверстий. Процесс резания при сверлении происходит в более тяжелых условиях по сравнению с точением. Это вызвано неодинаковой деформацией срезаемого слоя вдоль режущих кромок из-за переменного переднего угла  $\gamma$  и скорости резания, принимающей нулевое значение у поперечной режущей кромки. Увеличение глубины сверления затрудняет удаление стружки, подачу СОТС и обеспечение достаточной жесткости сверла (особенно малого диаметра).

Скорость резания, допускаемую режущими свойствами сверл, определяют по формуле

$$v = \frac{C_v D^{x_1}}{T^m S_0^{y_1}} \cdot K_v, \text{ м/мин,}$$

где  $C_v$  — коэффициент, зависящий от предела прочности обрабатываемого материала;  $T$  — период стойкости сверла, мин;  $S_0$  — подача на оборот сверла, мм/об;  $K_v = K_m \cdot K_0 \cdot K_{и} \cdot K_1$  — коэффициенты, учитывающие свойства обрабатываемого материала, СОТС, износ сверла, глубину сверления;  $x_1$ ,  $y_1$  и  $m$  — эмпирические показатели степени, определяемые экспериментально.

Параметры для определения скорости резания по формуле при сверлении отверстий в труднообрабатываемых конструкционных материалах приведены в таблице 4.1. Для других материалов они могут быть найдены в справочниках по нормативам режимов резания.

Таблица 4.1

**Параметры для определения скорости резания при сверлении**

Обрабатываемый материал	$\sigma_b$ , МПа	$C_v$	$D$	$S_0$	$T$	Материал сверла
			Показатели			
			$x_1$	$y_1$	$m$	
Титановые сплавы	450–1000	4,2–2,1	0,7	0,6	0,5	быстрорежущая сталь
Титановые сплавы	450–1000	4,2–2,1	0,65	0,65	0,55	твердый сплав
Деформируемые и литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе	750–1300	0,64–0,20	0,75	0,85	0,25	твердый сплав

При увеличении диаметра обрабатываемого отверстия  $D$ , а следовательно, и инструмента, повышается жесткость сверла, улучшается отвод стружки и тепла, что позволяет увеличить скорость резания. При сверлении сквозных отверстий в конце обработки (во избежание поломки сверла) необходимо подачу снижать на 30–50%. Допустимая подача  $S_0$  зависит от диаметра сверла и с увеличением

диаметра она возрастает. Для диаметров 1–30 мм  $S_0 = 0,01–0,2$  мм/об. Отверстия диаметром больше 35 мм сверлят за два и более проходов. Сверление отверстий диаметром свыше 60 мм выполняют рассверливанием или с использованием кольцевых сверл.

Обработка отверстий в жаропрочных, титановых и других труднообрабатываемых сплавах и сталях вызывает трудности, связанные с высокими значениями сил резания и недостаточной жесткостью инструмента. Увеличения жесткости сверл для обработки труднообрабатываемых материалов достигают уменьшением длины рабочей части, увеличением толщины сердцевины сверла до  $0,4D$ , выбором рациональной формы стружечных канавок, увеличением модуля упругости материала сверла за счет использования цельных твердосплавных сверл ( $D = 2–10$  мм) марок ВК6, ВК8, ВК10М. При использовании сверл из быстрорежущих сталей Р6М5К5, Р9М4К8 и др. длина рабочей части не должна превышать  $(6–8)D$ , сердцевина сверл диаметром 6–10 мм должна быть меньше  $0,3D$ .

При обработке отверстий малых размеров ( $D \leq 3$  мм) в качестве СОТС применяют жидкости на масляной основе, а при обработке отверстий больших диаметров — на водной основе.

Сверление и рассверливание отверстий обеспечивает точность 13–9-го квалитетов, шероховатость  $Ra = 25–0,8$  мкм. Основное машинное время при сверлении определяется по формуле:

$$T_{\text{маш}} = \frac{L}{n \cdot S_0}, \text{ мин,}$$

где  $L = l + l_1 + l_2$  — длина прохода сверла в направлении подачи, мм;  $l$  — глубина сверления, мм;  $l_1$  — величина врезания, мм;  $l_2$  — величина перебега, мм (обычно  $l_1 + l_2 \approx 0,3D$ );  $S_0$  — подача, мм/об;  $n$  — частота вращения, об/мин или  $\text{мин}^{-1}$ .

**Зенкерование** (рис. 4.1б) применяется при обработке отверстий в заготовках, предварительно обработанных сверлением или полученных литьем, штамповкой и другими методами. Зенкерование (однократное) отверстий в литых и штампованных заготовках обеспечивает точность 11–12-го квалитетов, шероховатость  $Ra = 6,3–25$  мкм. Чистовое зенкерование — точность 8–10-го квалитетов, шероховатость  $Ra = 0,4–6,3$  мкм.

**Развертывание** (рис. 4.1в) применяется после зенкерования, растачивания и других операций. Минимальная

погрешность при развертывании обеспечивается за два прохода (черновой и чистовой), точность соответствует 5–9 классам, а шероховатость  $Ra = 0,32-1,6$  мкм.

При обработке отверстий сверлением, зенкерованием и развертыванием за скорость главного движения принимают окружную скорость точки на максимальном диаметре обрабатываемой поверхности. Скорость резания рассчитывается по формуле, приведенной в главе 1.

Подача задается на оборот  $S_0$  (мм/об) или на зуб  $S_z$  (мм/зуб). Между этими подачами существует зависимость  $S_0 = S_z \cdot z$ , где  $z$  — число зубьев сверла, зенкера или развертки.

При обработке отверстий в сплошном материале глубина резания  $t$  определяется как половина диаметра отверстия, т. е.  $t = D/2$ , мм. При рассверливании, зенкерованием и развертывании глубина резания определяется как полуразность диаметров до и после обработки, т. е.  $t = (D - d)/2$ , мм. Практически применяемые значения глубин резания: при сверлении  $0,5D$ ; при зенкерованием —  $0,5-3$  мм; при развертывании —  $0,05-0,5$  мм.

#### 4.2.1. Назначение и основные типы сверл, зенкеров и разверток

По конструктивным признакам **сверла** подразделяются на спиральные, перовые, шнековые, кольцевые, комбинированные, центровочные и другие. По точности изготовления они делятся на сверла общего назначения и точного исполнения.

*Спиральные* сверла изготавливают из быстрорежущих сталей Р9К10, Р9М4К8Ф и др. Твердость рабочей части таких сверл 63–68 HRC. Применяют также сверла из твердого сплава ВК10М, ВК15М и др. При определенных условиях стойкость таких сверл в двадцать и более раз выше по сравнению с быстрорежущими сверлами. Спиральные сверла изготавливают с цилиндрическим или коническим хвостовиком. Для сверления отверстий в труднообрабатываемых материалах применяются сверла с внутренним подводом СОТС. Такие сверла имеют в каждом пере отверстия, соединяющиеся в хвостовике (рис. 4.2). Они закрепляются в специальных патронах, обеспечивающих подвод охлаждающей жидкости под давлением до 12 МПа непосредственно к режущим кромкам сверла.

*Перовые* сверла (рис. 4.3а, б) применяются для обработки отверстий малого диаметра (0,2–1 мм) и большого диаметра (более 80 мм). Они имеют простую конструкцию, представляющую собой заостренную пластину.

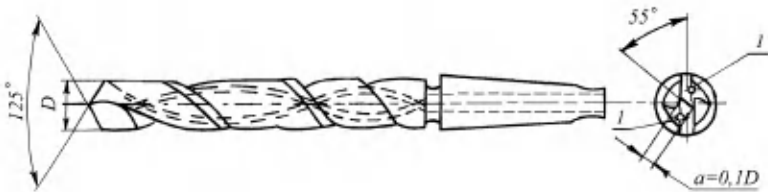


Рис. 4.2

Сверло с внутренней подачей охлаждающей жидкости:

1 — отверстия для подачи СОТС.

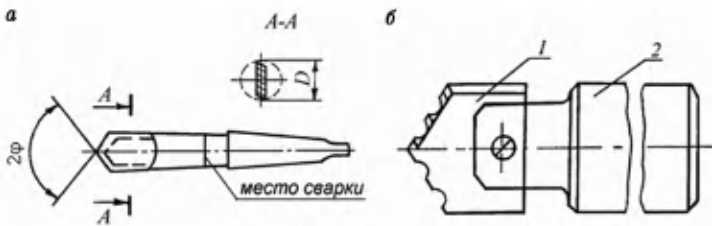


Рис. 4.3

Перовые сверла:

а — сварное; б — сборное; 1 — режущий элемент; 2 — державка.

**Шнековые сверла** (рис. 4.4) применяются для обработки отверстий в конструкционных сталях, легких сплавах и других материалах. Они имеют увеличенный угол наклона винтовых канавок  $\omega = 50-65^\circ$ . Основное преимущество — не требуется периодический вывод сверла при сверлении отверстий длиной более 10 диаметров.

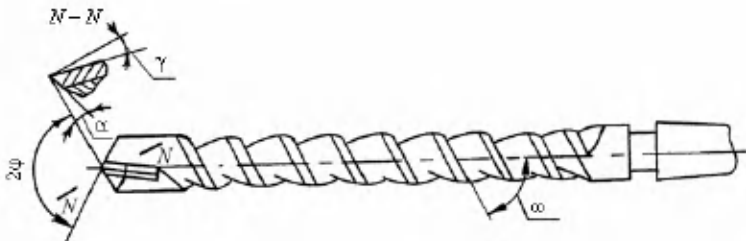
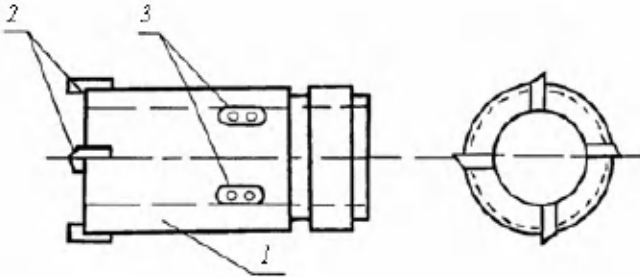


Рис. 4.4

Шнековое сверло

*Кольцевые сверла* (рис. 4.5) применяются для сверления сквозных отверстий большого диаметра (80–200 мм и более). Сверла снабжены пластинами (ножами) из быстрорежущей стали, твердого сплава или синтетического алмаза. Такими сверлами вырезается только кольцевая полость, а стержень, остающийся в центре, может быть использован в качестве заготовки для других деталей.

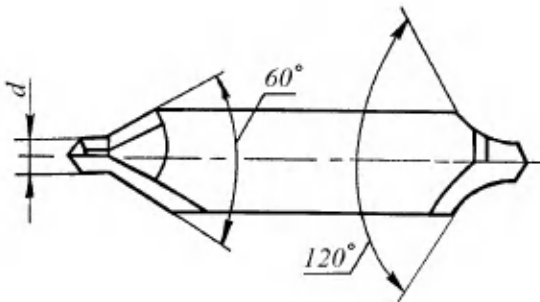


**Рис. 4.5**

*Кольцевое сверло:*

1 — корпус; 2 — режущие ножи; 3 — направляющие пластины.

*Центровочные сверла* (рис. 4.6) предназначены для обработки центровых отверстий в заготовках. Сверла имеют диаметр от 1 до 10 мм. Они бывают двух типов: без предохранительной фаски и с предохранительной фаской под углом  $120^\circ$ . В зависимости от обрабатываемого материала изготавливаются из быстрорежущих сталей или твердых сплавов.



**Рис. 4.6**

*Центровочное сверло*

**Зенкеры** в зависимости от назначения подразделяются на *зенковки*, *зенкеры*, *цековки* (рис. 4.7).

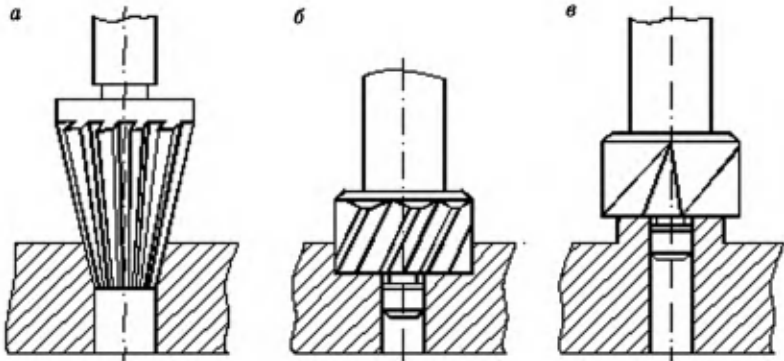


Рис. 4.7

Разновидности зенкеров:

- а* — зенковка для обработки фасок в отверстиях; *б* — зенкер с направлением;  
*в* — цековка для обработки плоских поверхностей.

По способу крепления зенкеры подразделяются на *хвостовые* (диаметр 12–35 мм) и *насадные* (диаметр 25–100 мм).

Рабочая часть зенкера выполняется из быстрорежущей стали или твердого сплава. В отличие от сверл зенкер имеет большее число зубьев и увеличенный размер сердцевины, благодаря чему повышается его жесткость и обеспечивается лучшее направление в оси отверстия. Диаметр и прямолинейность отверстия, обработанного зенкером, снимающим меньший по сравнению со сверлением припуск и направляемый по трем и более ленточкам зубьев, имеют более высокую точность. Зенкер прочнее сверла, поэтому подачи при зенкеровании отверстий могут быть больше, чем при сверлении.

**Развертки** в зависимости от формы обрабатываемых отверстий подразделяются на *цилиндрические* и *конические*, а по способу крепления — на *машинные* и *ручные*. Они бывают цельные и сборные со вставными или раздвижными зубьями и имеют большее число зубьев, чем зенкеры. Развертки для обработки отверстий диаметром до 10 мм изготовляют обычно с цилиндрическим хвостовиком, а свыше 10 мм с коническим хвостовиком. Развертки диаметром свыше 30 мм изготовляют насадными с ножами из быстрорежущей стали или твердого сплава.

Геометрические параметры рабочей (режущей) части сверл, зенкеров и разверток формируют главные режущие кромки, а направляющая часть оснащена ленточками, которые при резании снижают шероховатость стенок отверстия.

При обработке жаропрочных сплавов сверлами из быстрорежущей стали принимают передний угол  $\gamma = 0-5^\circ$ , задний угол  $\alpha = 10-16^\circ$ ; сверлами из твердого сплава —  $\gamma = 0$ ,  $\alpha = 10-12^\circ$ . При обработке отверстий в титановых сплавах быстрорежущими сверлами  $\gamma = 3-5^\circ$ ,  $\alpha = 12-16^\circ$ ; твердосплавными —  $\gamma = 0-3^\circ$ ,  $\alpha = 10-15^\circ$ . Угол при вершине сверла  $2\phi$  играет роль главного угла в плане. Он равен  $125-150^\circ$  при обработке жаропрочных и титановых сплавов, коррозионно-стойких сталей, сплавов алюминия и твердых чугунов. Наименьшее значение угла  $2\phi = 80-110^\circ$  принимается при обработке твердых бронз, чугунов средней твердости и пластмасс. У стандартных сверл угол  $2\phi = 116-118^\circ$ .

Для уменьшения трения ленточек сверла о стенки отверстия диаметр сверла уменьшают по направлению к хвостовику (обратная конусность) на  $0,03-0,12$  мм на  $100$  мм длины.

Для улучшения режущих свойств сверл применяют подточку поперечной кромки, которая уменьшает ее длину и увеличивает значение углов  $\phi$  вблизи оси сверла. Большое распространение имеет двойная заточка (рис. 4.8), при которой на периферийном участке главной режущей кромки затачивается дополнительная режущая кромка длиной  $0,2$  мм с углом при вершине  $2\phi_1 = 70-75^\circ$ . Такая заточка позволяет увеличить стойкость сверла, улучшает условия теплоотвода и разделяет стружку на два потока. Такое же действие оказывает наличие стружкоразделительных канавок на главных режущих кромках сверла на длине  $1,5-4$  мм, имеющих задние углы  $\alpha_1 = 6-8^\circ$  и фаски шириной  $0,1-0,3$  мм.

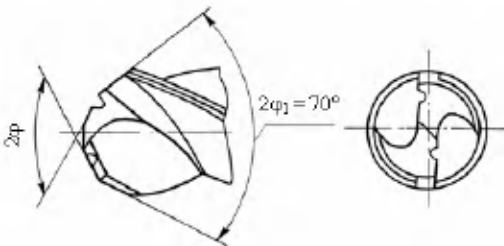


Рис. 4.8

*Спиральное сверло с подточкой для обработки труднообрабатываемых материалов*

Зенкер имеет режущую часть и калибрующий участок (рис. 4.9). Главный угол в плане  $\phi$  принимают равным  $45-60^\circ$ . Для более плавного врезания на режущей части зенкера выполняют двойную заточку с  $\phi_0 = 30^\circ$  и длиной переходной кромки  $l_0 = 0,3-1,0$  мм.

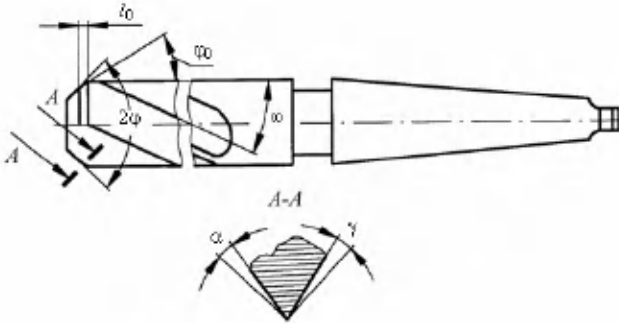


Рис. 4.9

Основные параметры зенкера

Угол наклона режущей кромки  $\lambda$  при обработке сквозных отверстий принимают равным  $(-5^\circ)-(-10^\circ)$ , при обработке глухих отверстий  $\lambda = 0$ . Для зенкеров с твердым сплавом  $\lambda = 15-25^\circ$ . Для зенкерования отверстий из конструкционных материалов передний угол принимают  $15-25^\circ$  для цельных зенкеров и  $12^\circ$  для сборных. Все зубья зенкера имеют ленточку  $f = 0,1-0,05$  мм. На калибрующем участке выполняют обратную конусность  $0,04-0,10$  мм на каждые 100 мм длины. Основные геометрические параметры режущей части зенкеров для обработки отверстий в жаропрочных и титановых сплавах приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Геометрические параметры режущей части зенкеров

Материал режущей части зенкера	Обрабатываемый материал							
	жаропрочные сплавы				титановые сплавы			
	геометрия режущей части							
	$\gamma^\circ$	$\alpha^\circ$	$2\phi^\circ$	$\omega^\circ$	$\gamma^\circ$	$\alpha^\circ$	$2\phi^\circ$	$\omega^\circ$
Быстро-режущая сталь	0-5	8-10	45-60	15-20	0-5	10-12	45-60	15-20
Твердый сплав	0-3	10-12	45-60	15-20	0-3	10-12	45-60	15-20

Развертки на рабочей части имеют четыре участка: направляющий конус, облегчающий введение развертки в отверстие; заборный конус, выполняющий основную работу резания; калибрующий участок, обеспечивающий заданные точность и шероховатость; обратный конус, уменьшающий разбивку отверстия (рис. 4.10).

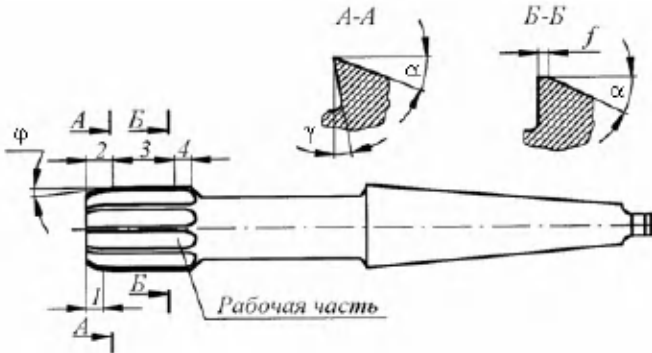


Рис. 4.10

*Основные параметры развертки*

Передние и задние углы, измеряемые в главной секущей плоскости, выбирают в зависимости от обрабатываемого материала заготовки из таблицы 4.3. Для разверток из инструментальной стали  $\gamma = 1-10^\circ$ , из твердого сплава  $\gamma = 0-15^\circ$ . Задний угол  $\alpha$  принимают равным  $6-12^\circ$ . Главный угол в плане  $\phi$  заборного конуса машинных разверток для обработки стали принимают равным  $12-15^\circ$ .

Для обработки глухих отверстий применяют машинные и ручные развертки без направляющего конуса с углом  $\phi = 45-60^\circ$ . Для повышения качества обработанных отверстий используют неравномерное расположение зубьев (разбивка) при среднем значении углового шага зубьев  $\omega = 45^\circ$ . Неравномерное расположение зубьев уменьшает вибрации и снижает шероховатость обработанной поверхности. На зубьях калибрующей части выполняют ленточки шириной  $0,05-0,3$  мм. Обратная конусность составляет около  $0,01$  мм для ручных разверток и около  $0,07$  мм для машинных.

Таблица 4.3

## Геометрические параметры режущей части разверток

Материал режущей части развертки	Обрабатываемый материал							
	жаропрочные сплавы				титановые сплавы			
	геометрия режущей части							
	$\gamma^\circ$	$\alpha^\circ$	$2\varphi^\circ$	$\omega^\circ$	$\gamma^\circ$	$\alpha^\circ$	$2\varphi^\circ$	$\omega^\circ$
Быстрорежущая сталь	0–5	8–10	45	0	0	10–15	45	0
Твердый сплав	0–5	6–8	45	0	0	10–15	45	0

## 4.2.2. Обработка отверстий комбинированным инструментом

Комбинированные инструменты применяются для совмещенной обработки отверстий (рис. 4.11). Они обеспечивают обработку нескольких поверхностей или обработку одного отверстия несколькими методами. К таким инструментам относятся ступенчатые сверла, зенкеры, развертки, расточные блоки и др. Применение комбинированных инструментов сокращает машинное время и обеспечивает точность обрабатываемых отверстий.

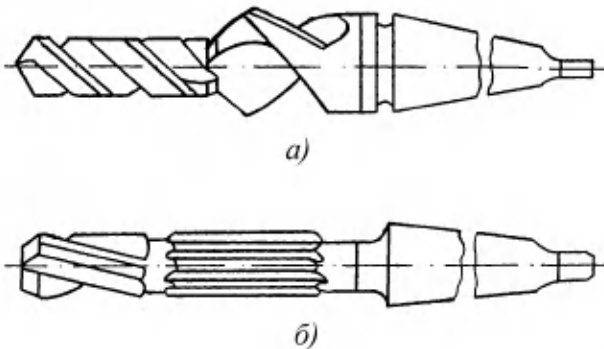


Рис. 4.11

Комбинированные инструменты:

*a* — сверло-зенковка; *b* — зенкер-развертка.

В зависимости от конструкции детали используется параллельная или последовательная схема обработки. При работе по параллельной схеме все режущие зубья одновременно участвуют в работе резания. При последовательной

схеме режущие лезвия участвуют в работе последовательно. У комбинированных инструментов особое внимание уделяется заточке и сборке. Необходимо, чтобы режущие кромки перекрывали друг друга в местах стыка, в противном случае возможно защемление стружки и некачественная обработка поверхности. Эффективному отводу стружки способствуют стружкоразделительные и стружкозавивающие канавки на режущих лезвиях. Применение более сложного и дорогостоящего комбинированного инструмента должно быть экономически обосновано, поэтому целесообразно его использовать в крупносерийном и массовом производствах.

### 4.3. РАСТАЧИВАНИЕ ОТВЕРСТИЙ

Обработка отверстий растачиванием выполняется на станках токарной группы при вращении детали и на станках расточной группы при вращении инструмента. В зависимости от назначения обрабатываемых отверстий растачивание подразделяется на черновое, чистовое и тонкое.

Растачивание на станках токарной группы является менее производительным, но вместе с тем универсальным методом, обеспечивающим получение сквозных и глухих отверстий с малой погрешностью обработки и шероховатостью.

Типичными для токарных станков операциями являются растачивание ступенчатых отверстий с использованием стандартных или специальных расточных резцов. Наиболее простой и распространенной схемой растачивания является обработка резцом, консольно закрепленным в суппорте. Обработка по этой схеме обеспечивает прямолинейность оси отверстия, совпадающего с осью шпинделя станка.

Для обработки отверстий применяются резцы из быстрорежущей стали, твердого сплава и сверхтвердых материалов (алмаза, эльбора, гексанида и др.).

С целью уменьшения отжатия резца при недостаточной жесткости станка применяют резцы с углом в плане  $\phi$ , доходящим до  $90^\circ$ . Сквозные и глухие отверстия глубиной более 150 мм растачивают резцами, установленными в державку. Повышение жесткости может быть обеспечено за счет использования резцов с державками квадратного сечения, закрепляемыми в борштанге (длинной державке). Отверстия для резца делают наклонными или перпендикулярными к оси борштанги. Жесткость резцов может быть

достигнута также и за счет использования державок резцов из стали У7 и углов в плане  $\phi$ , равных 45, 60 и 90°, а также применения кондукторных втулок (рис. 4.12).

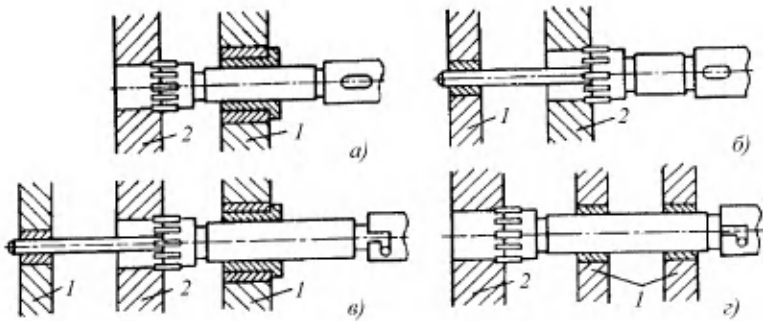


Рис. 4.12

*Схемы направления инструментальных оправок с помощью кондукторных втулок:*

*а* — переднее направление; *б* — заднее; *в* — переднее и заднее;

*г* — двойное переднее; 1 — кондуктор; 2 — обрабатываемая заготовка.

В серийном производстве отверстия диаметром более 40 мм обрабатываются пластинчатыми резцами, расточными блоками и головками. Блок представляет собой корпус со вставными резцами, положение которых можно регулировать.

Растачивание отверстий диаметром 45–200 мм выполняется расточными головками одностороннего резания (рис. 4.13). Более надежное ориентирование расточной головки в обрабатываемом отверстии обеспечивается за счет наличия твердосплавных направляющих на ее корпусе.

Для обработки отверстий диаметрами 35–200 мм с увеличенными допусками на расположение осей применяются плавающие блоки, которые под действием силы резания сами устанавливаются в обрабатываемом отверстии (рис. 4.14). Отверстия в корпусных деталях обрабатывают **на станках расточной группы**. Эта группа включает в себя горизонтально-расточные, координатно-расточные и алмазно-расточные станки. На горизонтально-расточных станках выполняют черновую и чистовую обработку отверстий. Обработку высокоточных отверстий выполняют на координатно-расточных станках. Они обеспечивают высокую точность взаимного расположения обрабатываемых отверстий и их формы.

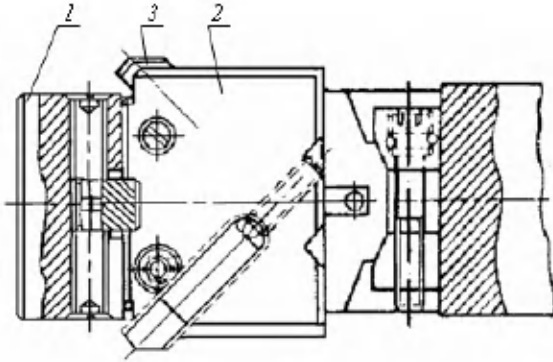


Рис. 4.13

*Расточная резцовая головка:*

1 — направляющая; 2 — корпус; 3 — резец.

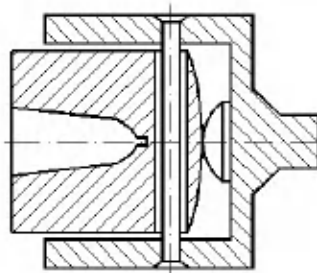


Рис. 4.14

*Плавающий блок для установки расточного инструмента*

В крупносерийном и массовом производствах для обработки отверстий применяют многошпиндельные агрегатно-расточные станки. Они позволяют выполнять операции растачивания, сверления, зенкерования и развертывания. Для обработки отверстий на этих станках используются многолезвийные, комбинированные и сборные инструменты, устанавливаемые на требуемый размер. Высокую точность по диаметру и форме с малой шероховатостью отверстий обеспечивает обработка на алмазно-расточных станках. Она выполняется на высоких скоростях резания (до 1000 м/мин и более) с подачами 0,01–0,15 мм/об и глубиной резания 0,05–0,3 мм. Обработка на этих станках обеспечивает допуск 5–15 мкм на диаметре 100 мм, отклонение от круглости и конусности в пределах 3–10 мкм.

В серийном производстве растачивание отверстий может выполняться с применением кондукторов и приспособлений со сменными и постоянными втулками. Межосевые расстояния между отверстиями обеспечиваются с точностью 0,015–0,03 мм. При обработке отверстий растачиванием достигается точность и шероховатость:

- 1) при черновом растачивании 13–11 квалитет,  $R_a = 25\text{--}1,6$  мкм;
- 2) при чистовом растачивании 10–8 квалитет,  $R_a = 6,3\text{--}0,4$  мкм;
- 3) при тонком растачивании 7–5 квалитет,  $R_a = 3,2\text{--}0,2$  мкм.

#### 4.4. ПРОТЯГИВАНИЕ ОТВЕРСТИЙ

Обработка отверстий протягиванием является высокопроизводительным методом. Она применяется при обработке деталей из различных сталей и сплавов твердостью HRC до 50 единиц, в том числе коррозионно-стойких сталей, жаропрочных и титановых сплавов, цветных металлов и других материалов.

Отличие протягивания от других видов механической обработки отверстий заключается в том, что при протягивании отсутствует специальное движение подачи, а срезание припуска осуществляется за счет конструкции протяжки, у которой каждый последующий режущий зуб имеет превышение (перепад) на величину, равную 0,01–0,4 мм.

При протягивании отверстий применяют профильную, генераторную и прогрессивную схемы резания (рис. 4.15).

*Профильная схема* резания (рис. 4.15а) характеризуется срезанием припуска зубьями, форма поперечного сечения которых та же, что и форма окончательно обработанного отверстия. У круглых протяжек это круглые зубья, у квадратных – квадратные и т. д. При профильной схеме резания в окончательном формировании поверхности участвуют только последние режущие зубья протяжки. Подача на зуб  $S_z$  равна толщине срезаемого слоя.

Применять профильные протяжки для обработки поверхностей сложной формы нетехнологично, так как каждый зуб должен повторять эту форму. Кроме того, при сложной форме отверстия невозможно получить требуемый передний угол на всех участках режущей кромки, что увеличивает шероховатость обработанной поверхности.

При *генераторной схеме* резания (рис. 4.15б) первый зуб протяжки имеет круглую форму, все последующие зубья имеют форму дуг окружности. Окончательная форма и

размеры отверстия получаются при резании последними зубьями.

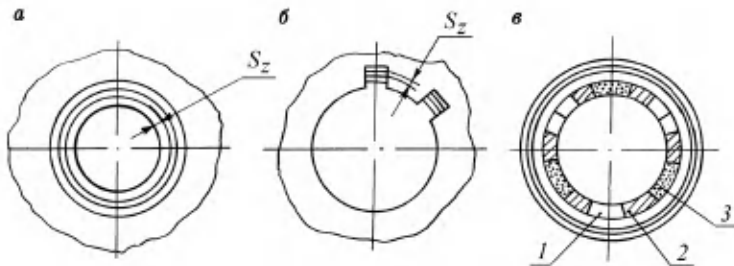


Рис. 4.15

Схемы резания при протягивании отверстий:

*a* — профильная; *b* — генераторная; *в* — прогрессивная; 1, 2, 3 — слои, снимаемые первым, вторым и третьим зубьями.

Преимуществом протяжек, работающих по этой схеме, является технологичность их изготовления. Исходная круглая форма таких протяжек позволяет: затачивать на дуговых участках ее режущих зубьев положительные передние углы; получать максимально возможную площадь поперечного сечения протяжки, увеличивая ее прочность; уменьшать длину протяжки благодаря постоянному сечению стружек, срезаемых режущими зубьями. Чаще всего генераторную схему применяют при обработке фасонных поверхностей.

Недостатком генераторной схемы резания является то, что профиль отверстия получается менее точным, чем при работе протяжками, работающими по профильной схеме. Для повышения точности обрабатываемых отверстий последние зубья протяжки выполняют по профильной схеме резания.

При *прогрессивной* схеме резания (рис. 4.15*в*) срезание припуска до получения заданного контура отверстия осуществляется секциями зубьев. Все зубья одной секции имеют одинаковый диаметр и каждый из них обрабатывает только определенный участок профиля. Стойкость протяжек в этом случае в среднем в 2 раза выше, чем у протяжек, работающих по генераторной схеме резания.

При протягивании отверстий существует два варианта протягивания: свободное и координатное. При *свободном* протягивании обеспечивается размер профиля и малая шероховатость отверстия, при *координатном* выдерживается

еще и размер профиля относительно базовых поверхностей заготовки.

Установку заготовок на протяжных станках осуществляют на жесткой и шаровой опоре, если торец заготовки не перпендикулярен оси отверстия.

Для прошивания и калибрования отверстий применяются протяжки-прошивки, работающие на сжатие и продольный изгиб. При этом методе обработки сила прикладывается к задней части прошивки, поэтому их длина составляет 200–300 мм. После прошивания и сглаживания шероховатости обработанной поверхности отверстия обеспечивается повышение эксплуатационных свойств.

Для изготовления протяжек применяются быстрорежущие стали Р6М5, Р9К5, Р12Ф3, Р6М5К5, Р9М4К8 и др. При обработке труднообрабатываемых материалов для режущих зубьев протяжек и прошивок используют твердые сплавы ВК8, ВК10, ВК6М, ВК10М и др. Применяются также быстрорежущие стали Р18Ф2К8М, Р18Ф3К8М, Р18Ф4К8М для изготовления протяжек, обеспечивающих работу со скоростями до 30 м/мин.

Для экономии дорогостоящего инструментального материала разработаны конструкции сборных протяжек, в том числе с приклеенными зубьями.

Геометрию режущих зубьев протяжек для протягивания отверстий выбирают в зависимости от прочности обрабатываемого материала. Передний угол  $\gamma$  выбирается равным 12–15° для протягивания сталей в нормализованном состоянии,  $\gamma = 0–5^\circ$  для закаленных сталей,  $\gamma = 10–12^\circ$  для жаропрочных сплавов на никелевой основе,  $\gamma = 9–10^\circ$  для титановых сплавов. Задние углы принимают:  $\alpha = 2–3^\circ$  при обработке отверстий 6-го квалитета точности и  $\alpha = 3–4^\circ$  при обработке отверстий меньшей точности. Припуск под протягивание составляет 0,5–1,5 мм на диаметр отверстий.

Допустимая скорость резания  $v$  при протягивании в зависимости от стойкости и подъема на зуб определяется по формуле

$$v = \frac{C_v}{T^m \cdot a^{y_v}} \cdot K_n, \text{ м/мин,}$$

где  $T$  — стойкость протяжки, мин;  $a$  — подъем на зуб ( $a = 0,02–0,10$  мм/зуб);  $C_v$ ,  $m$ ,  $y_v$  — величины, зависящие от сочетания обрабатываемого и инструментального материалов;  $K_n$  — коэффициент, учитывающий свойства инструментального материала.

Скорости резания при протягивании деталей из жаропрочных сплавов приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4

## Допустимые скорости резания при протягивании жаропрочных сплавов

Марка сплава	Жаропрочность, °С	Коэффициент относительной обрабатываемости	Допустимая скорость резания, м/мин
ХН77ТЮР	700	1	13,2
ХН70ВМТЮ	750	0,5	6,7
ЖС6К	1000	0,2	2,7
ВЖ36-11	1000	0,25	3,3

Протягивание *жаропрочных сплавов* осуществляется с малыми толщинами срезов при больших удельных давлениях. В таких условиях обработки трение становится существенным фактором, определяющим характер износа протяжки. Основным средством снижения сил трения, повышения стойкости протяжек и качества обработанной поверхности является применение эффективных СОТС, которые должны обладать большой смазывающей способностью, маслянистостью для образования разделительной пленки, а также высокой смачиваемостью при больших давлениях в месте контакта протяжки и заготовки. Такими свойствами обладают СОТС на масляной и водной основах, в которые введены добавки поверхностно-активных веществ.

При протягивании *титановых сплавов* шероховатость поверхности более стабильна, чем при протягивании жаропрочных сплавов при одних и тех же режимах обработки, а силы резания примерно равны.

Протягивание отверстий обеспечивает широкий диапазон точности: черновое протягивание 11–10 квалитеты, шероховатость  $R_a = 12,5-0,8$  мкм; чистовое протягивание 9–6 квалитеты, шероховатость  $R_a = 6,3-0,2$  мкм.

Машинное время при протягивании определяется по формуле

$$T_{\text{маш}} = \frac{L_p \cdot i \cdot K_x}{1000 \cdot v}, \text{ мин.}$$

где  $L_p$  — длина рабочего хода протяжки, мм;  $i$  — количество протяжек в комплекте;  $K_x$  — коэффициент, учитывающий обратный ход протяжки ( $K_x = 1,2-1,5$ );  $v$  — скорость резания, м/мин.

## 4.5. ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Высокие требования к качеству поверхности, форме и размерам обрабатываемых отверстий могут быть обеспечены шлифованием, хонингованием, доводкой и другими методами с применением абразивного и алмазного инструментов, свободного абразива, порошков и паст.

### 4.5.1. Шлифование отверстий

При изготовлении деталей для обработки отверстий применяется **внутреннее шлифование**. Для внутреннего шлифования отверстий используются следующие схемы обработки: шлифование с продольной подачей (рис. 4.16а); врезное с поперечной подачей (рис. 4.16б); шлифование с планетарным движением круга (рис. 4.16в); бесцентровое шлифование (рис. 4.17).

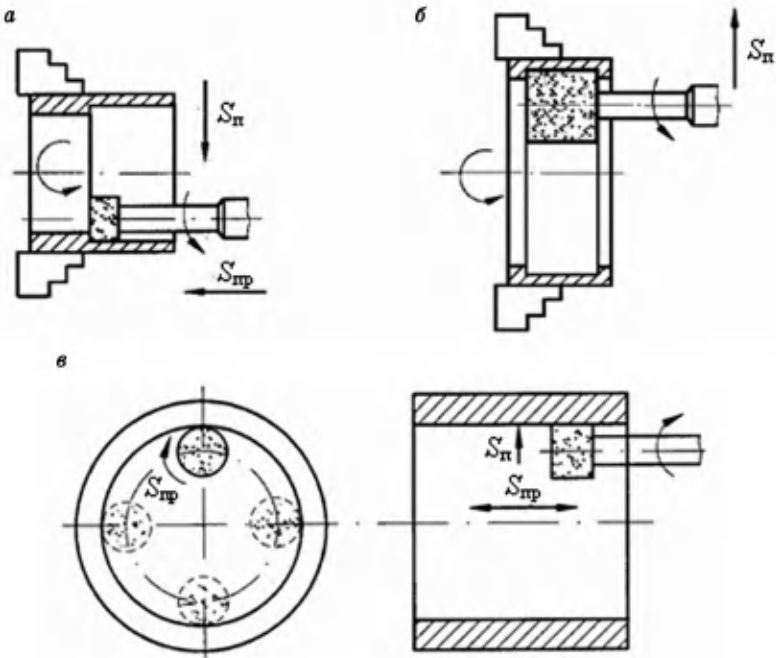


Рис. 4.16

Схемы обработки отверстий на внутришлифовальных станках

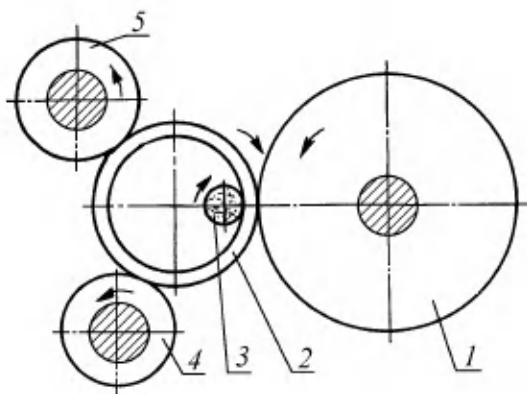


Рис. 4.17

Схема бесцентрового внутреннего шлифования отверстий

При планетарном движении шпиндель с кругом кроме главного совершает еще вращательное движение относительно оси обрабатываемого отверстия. Планетарный метод применяется для шлифования отверстий в корпусных деталях.

К достоинствам внутреннего шлифования наряду с высокой точностью процесса следует отнести и возможность исправления положения оси отверстия, вызванного уводом инструмента на предшествующих операциях, а также большого диапазона диаметров обрабатываемых отверстий.

Недостатками внутреннего шлифования являются малая жесткость шпинделя, особенно при шлифовании глубоких отверстий, увеличенный износ абразивного круга из-за большой дуги контакта круга и обрабатываемой заготовки и затруднения подачи СОТС.

Внутреннее шлифование имеет свои технологические особенности. При шлифовании отверстий наружный диаметр круга всегда должен быть меньше диаметра шлифуемого отверстия (0,8–0,9 диаметра отверстия). Высоту круга  $H_k$  выбирают в зависимости от длины обрабатываемой поверхности. Припуски на шлифование зависят от диаметра отверстия и его длины и рекомендуются 0,07–0,25 мм для диаметров отверстий до 30 мм и 0,18–0,75 мм для диаметров до 250 мм.

Внутреннее шлифование с продольной подачей обеспечивает точность 7–5 квалитетов, шероховатость  $Ra = 0,32–0,1$  мкм. Повышение производительности может быть получено при увеличении скорости круга и подачи продольной  $S_{пр}$  и поперечной  $S_{поп}$ .

При шлифовании отверстий методом поперечной подачи обеспечивается точность 7-го квалитета, шероховатость  $Ra = 0,63-0,16$  мкм. Поперечная подача  $S_{\text{поп}}$  принимается при черновом шлифовании  $0,05-0,075$  мм/дв.х., при чистовом шлифовании  $0,003-0,015$  мм/дв.х. При врезном шлифовании отверстий вся поверхность обрабатывается сразу, поперечная подача осуществляется непрерывно, пока не будет снят весь припуск. При шлифовании глухих отверстий требуется более частая правка круга.

В таблице 4.5 приведены режимы внутреннего шлифования отверстий с продольной подачей в жаропрочных и титановых сплавах с  $\sigma_b > 1000$  МПа.

Таблица 4.5

**Режимы резания при внутреннем шлифовании жаропрочных и титановых сплавов**

Диаметр обрабатываемого отверстия, мм	Обрабатываемый материал	Скорость круга $v_k$ , м/с	Скорость вращения заготовки $v_d$ , м/мин	Продольная подача $S_{\text{пр}}$ , мм/обор.дет	Подача на глубину $S_{\text{пг}}$ , мм/ход
20-100	Жаропрочный сплав	25-30	15-90	0,15-0,35	0,003-0,01
	Титановый сплав	30-35	8-20	0,1-0,3	0,002-0,01

При шлифовании нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов целесообразно применять абразивные круги из электрокорунда белого (24А, 25А) и монокорунда (44А, 45А). Шлифование титановых сплавов выполняется кругами из карбида кремния зеленого (63С, 64С). Зернистость и твердость выбирается в зависимости от требуемой точности, шероховатости, физико-механических свойств обрабатываемых материалов.

При шлифовании в качестве СОТС широко применяется сульфозрезол, водные растворы эмульсола, Аквола-2 и другие составы.

Машинное время  $T_{\text{маш}}$  при внутреннем шлифовании с продольной подачей круга определяется по формуле

$$T_{\text{маш}} = \frac{a}{n_{\text{дв.х}} \cdot S_{\text{пг}}} \cdot K, \text{ мин,}$$

где  $a$  — припуск на сторону, мм;  $S_{\Pi}$  — поперечная подача за один двойной ход стола (глубина резания), мм;  $K$  — коэффициент, учитывающий точность шлифования;  $n_{\text{дв.х}}$  — число двойных ходов стола в минуту;

$$n_{\text{дв.х}} = \frac{v_{\text{пр.х}} \cdot 1000}{2L},$$

где  $L = l_0 + (0,2 - 0,4)B_{\text{к}}$  — длина хода стола, мм;  $l_0$  — длина отверстия, мм;  $B_{\text{к}}$  — ширина круга, мм;  $v_{\text{пр.х}}$  — скорость продольного хода стола;

$$v_{\text{пр.х}} = \frac{S_{\text{пр}} \cdot n_{\text{д}}}{1000}, \text{ м/мин},$$

где  $S_{\text{пр}}$  — продольная подача за один оборот детали, мм;  $n_{\text{д}}$  — частота вращения детали,  $\text{мин}^{-1}$ .

*Бесцентровое* внутреннее шлифование (рис. 4.17) выполняется с установкой заготовки по наружной, предварительно обработанной поверхности. Заготовка 2 направляется и поддерживается тремя роликами. Ролик 1 (большого диаметра) является ведущим, он вращает заготовку и в то же время удерживает ее от возможного вращения с большей скоростью под действием шлифовального круга 3. Верхний нажимной ролик 5 прижимает заготовку к ведущему ролику 1 и нижнему поддерживающему ролику 4. Заготовка, зажата между тремя роликами, вращается с той же скоростью, что и ведущий ролик 1. При смене заготовки ролик 5 отходит и освобождает заготовку для ее снятия.

Бесцентровое внутреннее шлифование отверстий выполняется по схемам с продольной и поперечной подачей. Методом бесцентрового шлифования обрабатывают отверстия диаметром от 10 до 250 мм. Режимы бесцентрового шлифования на проход отверстий из жаропрочных и титановых сплавов с  $\sigma_{\text{в}} > 1000$  МПа приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6

**Режимы бесцентрового внутреннего шлифования жаропрочных и титановых сплавов**

Материал заготовки	Диаметр отверстия, мм	Скорость круга $v_{\text{к}}$ , м/с	Скорость вращения заготовки $v_{\text{д}}$ , м/мин	Подача на глубину $S_{\text{г}}$ , мм/ход	Подача минутная $S_{\text{м}}$ , м/мин
Жаропрочный сплав	10–50	25–30	15–20	0,02–0,05	1,5–2
Титановый сплав	10–50	30–35	10–12	0,02–0,05	1,0–1,3

Бесцентровое шлифование отверстий обеспечивает точность обработки 7–5-го квалитетов, шероховатость  $Ra = 3,2 - 0,2$  мкм, concentricity и параллельность оси отверстия и наружной поверхности до 3 мкм.

#### 4.5.2. Отделочные методы абразивной обработки

В технологических процессах изготовления деталей применяются отделочные методы обработки отверстий с использованием абразивных и алмазных инструментов, порошков, паст и свободного абразива. К таким методам относятся: хонингование, суперфиниширование, притирка, доводка и другие.

**Хонингование** — метод отделочной обработки отверстий, предварительно обработанных расточкой, развертыванием и шлифованием. Хонингование осуществляется с помощью хонинговальных головок (хонов) со вставными абразивными или алмазными брусками. Схема хонингования приведена на рисунке 4.18.

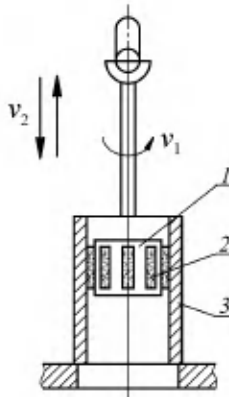


Рис. 4.18

Схема хонингования:

1 — хон; 2 — абразивные бруски; 3 — обрабатываемая заготовка.

Хонингование выполняется на специальных вертикально-хонинговальных и горизонтально-хонинговальных станках. Хонинговальная головка совершает одновременно вращательное ( $v_1 = 30-60$  м/мин) и возвратно-поступательное ( $v_2 = 10-15$  м/мин) движения при постоянном давлении абразивных (или алмазных) брусков на обрабатываемую поверхность (давление бруска составляет 0,4–1 МПа). Бруски в процессе обработки раздвигаются (радиальная

подача) механическими, гидравлическими или другими устройствами.

Перед хонингованием отверстие должно иметь точность обработки не ниже 7–8-го квалитетов и шероховатость  $Ra = 3,2-6,3$  мкм. В процессе каждого хода хонингования снимается слой металла толщиной 0,3–0,5 мкм при общем припуске до 0,08 мм для стали и 0,2 мм для чугуна. Диапазон диаметров хонингуемых отверстий — от 3 до 1000 мм.

Хонингованием обрабатываются отверстия в цилиндрах, корпусных и других деталях. При хонинговании возможно получение сетчатого микропрофиля, необходимого для удержания на поверхности смазочного материала.

В процессе хонингования обязательно применение СОТС, выполняющих смазывающее, охлаждающее и вымывающее действия. При обработке конструкционных сталей применяется смесь керосина и масла. Применение таких СОТС создает высокую взрыво- и пожароопасность и низкие санитарно-гигиенические условия труда. В последнее время керосино-масляные смеси заменяются СОТС на водной основе. Например, внедрение в качестве СОТС 1,5% водного раствора Аквол-2, содержащего эмульгаторы и ингибиторы коррозии, при хонинговании цилиндров из легированной стали 30ХГСА (твердость НРС = 35–40) позволило снизить уровень остаточных напряжений, улучшить условия труда и устранить пожароопасность.

Хонингование отверстий обеспечивает точность 4–2-го квалитетов и шероховатость  $Ra = 0,16-0,08$  мкм. В процессе хонингования исправляется форма отверстия (овальность, бочкообразность, конусность) и другие погрешности, появляющиеся на предыдущих операциях.

Для хонингования применяются хонинговальные бруски из электрокорунда, карбида кремния и синтетических алмазов. При хонинговании отверстий в деталях из стали брусками из синтетических алмазов повышается производительность в два раза и стойкость брусков в 30 и более раз по сравнению с обработкой абразивными брусками.

Машинное время при хонинговании определяется по формуле

$$T_{\text{маш}} = \frac{a}{S_{\text{п}}} \cdot n, \text{ мин},$$

где  $a$  — припуск на сторону, мм;  $S_{\text{п}}$  — подача (радиальная) на двойной ход головки, мм;  $n$  — число двойных ходов головки, мин<sup>-1</sup>;

$$n = \frac{v_{\text{вп}} \cdot 1000}{2l_{\text{х}}},$$

где  $v_{\text{вп}}$  — скорость возвратно-поступательного движения, м/мин;  $l_{\text{х}}$  — ход хонинговальной головки, мм;

$$l_{\text{х}} = l + 2l_{\text{ц}} - l_{\text{бр}},$$

где  $l$  — длина обрабатываемого отверстия, мм;  $l_{\text{ц}}$  — перебег головки, мм;  $l_{\text{бр}}$  — длина бруска, мм.

**Суперфиниширование** — процесс отделочной обработки цилиндрических, конических, плоских и фасонных поверхностей. Этим методом обрабатываются внутренние и наружные поверхности абразивными, алмазными и эльборовыми брусками. Схемы суперфиниширования цилиндрических и конических отверстий показаны на рисунке 4.19.

При суперфинишировании отверстий заготовка 1 совершает вращательное движение, а бруски 3 — возвратно-поступательное вдоль образующей обрабатываемой поверхности. Кроме того, происходит вибрационное (осциллирующее) движение  $A$  брусков с частотой колебания до 50 Гц и амплитудой  $L = 2-5$  мм. На державку 2 с брусками действует давление  $P = 50-300$  МПа.

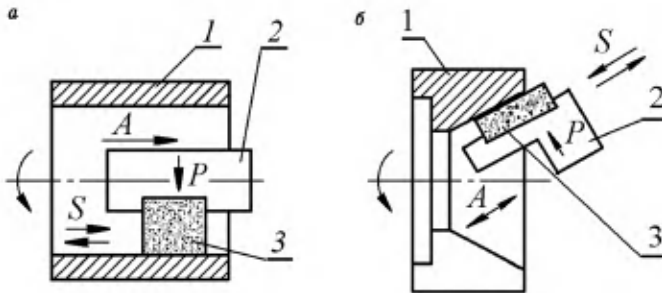


Рис. 4.19

Схемы суперфиниширования отверстий:

а — цилиндрического; б — конического.

Суперфиниширование выполняется на специальных станках. Применение специальных приспособлений и устройств позволяет выполнять операцию суперфиниширования на токарных и шлифовальных станках. В качестве СОТС могут применяться керосин и веретенное масло (10%).

Режимы обработки назначаются в зависимости от обрабатываемого материала. При обработке заготовок из стали и

алюминиевых сплавов рекомендуются следующие режимы: окружная скорость заготовки  $v_3 = 30-45$  м/мин; скорость движения брусков вдоль образующей около 0,5 м/мин; давление на бруске  $P = 50-150$  МПа; частота колебания 45 Гц; амплитуда колебаний  $L = 3-5$  мм. Снимаемый припуск составляет около 10 мкм. Изменяя соотношение скоростей рабочих движений, можно регулировать направление микронеровностей для создания благоприятных условий работы ответственных деталей. При суперфинишировании отверстий в деталях из закаленных сталей в поверхностном слое формируются напряжения сжатия.

Шероховатость обработанных поверхностей составляет по параметру  $Ra = 0,02-0,16$  мкм. При суперфинишировании отверстий с припуском до 10 мкм погрешности геометрической формы не исправляются. Увеличение припуска до 0,03 мм обеспечивает возможности исправления геометрической формы.

**Доводка (притирка)** — процесс отделочной обработки разнообразных внутренних цилиндрических и фасонных поверхностей. Доводка применяется в целях выравнивания дефектов формы и размеров сопрягаемых поверхностей двух деталей с использованием мелкозернистых порошков, шлифпорошков и микропорошков, входящих в состав паст, твердых композиций и суспензий, наносимых на поверхность притира, имеющего форму, обратную форме обрабатываемой поверхности отверстия.

При относительном движении притира и детали происходит снятие тонких слоев металла при давлении на деталь до 0,05 МПа. При этом происходит механическое снятие выступающих микронеровностей при адсорбционном воздействии поверхностно-активных веществ, входящих в состав паст и облегчающих процесс образования срыва и разрушения оксидных пленок.

На предварительных операциях применяют притиры из мягких пористых материалов для обеспечения лучшего шаржирования (вдавливания) абразивных или алмазных зерен, содержащихся в доводочной пасте, твердой смазке или суспензии. На окончательных операциях используют твердые притиры. Притиры для доводки изготавливают из чугунов, сталей, латуни, меди и других материалов, более мягких, чем обрабатываемый материал детали.

Для получения низкой шероховатости деталей из жаропрочных сталей при доводке и притирке применяют пасты из синтетических алмазов и карбида титана в смеси с керосином, олеиновой и стеариновой кислотами.

Обработка отверстий диаметром до 30 мм выполняется в зависимости от вида доводки при следующих значениях окружной скорости  $v_{\text{окр}}$  и скорости поступательного перемещения  $v_{\text{пост}}$ : предварительная доводка — 25–50 м/мин, 6–15 м/мин, соответственно; окончательная — 10–20 м/мин, 5–8 м/мин.

Доводку отверстий осуществляют на вертикально-доводочных станках и станках-полуавтоматах высокой точности. Доводка отверстий на станках-полуавтоматах в корпусах распылителя форсунок обеспечивает круглость и прямолинейность поверхности 5 мкм, шероховатость  $R_a = 0,02\text{--}0,04$  мкм. В обычных условиях доводкой и притиркой обеспечивается точность 5–3-го квалитетов, шероховатость  $R_a = 1,6\text{--}0,1$  мкм.

**Полирование** является отделочной обработкой, обеспечивающей уменьшение шероховатости до  $R_a = 0,016$  мкм. Полирование в основном применяется как антикоррозионная и декоративная обработка для уменьшения трения и повышения усталостной прочности ответственных деталей двигателей и машин.

Полирование обычно выполняется за несколько переходов с применением паст и смазочных композиций, содержащих мелкие зерна абразива, алмаза и эльбора. В производстве авиационных двигателей при изготовлении деталей из жаропрочных сплавов и сталей в последнее время для полирования применяются порошки и пасты из карбида титана, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Они обеспечивают улучшение шероховатости, повышение производительности и срока службы в 1,5 раза по сравнению с деталями, обработанными абразивными и алмазными пастами. Съем материала при полировании составляет не более 0,01–0,03 мм, а на окончательных операциях до 0,005 мм.

В некоторых случаях применяется абразивно-жидкостное полирование, которое не образует микротрещин, прижогов, повышает износостойкость на 25–30% по сравнению с полированием механическими методами. Полирование обеспечивает повышение усталостной прочности до 15%.

Для обработки отверстий полирование не получило широкого распространения.

#### 4.6. ОБРАБОТКА ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ

При изготовлении ответственных деталей (роторы и валы турбин, цилиндры, плунжерные пары и др.) особые трудности представляет обработка глубоких отверстий.

Глубина отверстия характеризуется отношением  $l/d > 5$ , где  $l$  — длина отверстия, а  $d$  — его диаметр.

Точные глубокие отверстия обрабатываются за несколько операций, которые подразделяются на две группы: операции сверления и черногого растачивания (обеспечение требований по расположению оси отверстия и ее прямолинейности), и операции чистовые и отделочные — растачивание, шлифование, хонингование (обеспечение требуемой точности диаметральных размеров, формы и шероховатости).

Особенностями способов *глубокого сверления* и черногого растачивания являются:

- 1) принудительный и бесперебойный отвод стружки из отверстия потоком СОТС;
- 2) базирование рабочей части инструмента во время работы по поверхности обработанной части отверстия;
- 3) малая жесткость технологической системы.

Глубокое сверление в зависимости от схемы снятия припуска подразделяется на две разновидности: сплошное и кольцевое (рис. 4.20).

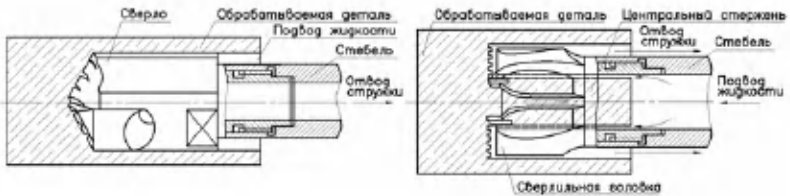


Рис. 4.20

Схемы образования отверстия при сплошном (а)  
и кольцевом (б) сверлении

Сплошное глубокое сверление (рис. 4.20а), например спиральным сверлом, отличается тем, что весь высверливаемый материал удаляется в виде стружки (глубина резания  $t = d/2$ ). При кольцевом глубоком сверлении (рис. 4.20б), например кольцевым сверлом (рис. 4.5), в стружку превращается часть высверливаемого материала, находящегося в высверливаемой кольцевой полости, а остальная часть удаляется в виде стержня (стержень может быть использован как заготовка). Глубина резания  $t$  в этом случае меньше, чем при сплошном сверлении и равна ширине кольцевой полости.

В зависимости от способа отвода стружки различают следующие разновидности глубокого сверления:

1) с внутренним отводом стружки — сверление, при котором применяется наружный подвод СОТС;

2) глубокое сверление с наружным отводом стружки, при котором используют внутренний подвод СОТС.

В зависимости от кинематической схемы различают три разновидности сверления:

1) заготовка вращается, а инструмент совершает поступательное движение;

2) заготовка вращается, а инструменту одновременно сообщается вращение (встречное) и поступательное движение подачи;

3) заготовка неподвижна, а инструменту одновременно сообщается вращение и поступательное движение подачи.

Глубокое сверление обычно выполняется с равномерной подачей инструмента, при которой толщина срезаемого слоя остается неизменной. При сверлении отверстий малых диаметров в труднообрабатываемых материалах образуется тонкая сливная стружка, которую трудно отводить из отверстия. В таких случаях применяют способы дробления стружки по длине за счет применения переменной по величине подачи, при которой толщина срезаемого слоя также будет переменной.

Разновидностью обработки глубоких отверстий является *глубокое растачивание*, которое в зависимости от назначения может быть:

1) черновым, при котором обеспечиваются требования по расположению оси отверстия и ее прямолинейности;

2) чистовым, при котором обеспечиваются требования точности диаметральных размеров и шероховатости;

3) комбинированным, обеспечивающим за один рабочий ход выполнение черного и чистового растачивания.

Операции черного растачивания применяются, если не удастся обеспечить требования по расположению оси отверстия и ее прямолинейности при сверлении. Операции чистового растачивания при обработке отверстий малого диаметра часто заменяют глубоким развертыванием. Черновое и чистовое растачивание глубоких отверстий выполняется инструментом, оснащенным твердым сплавом. В зависимости от схемы растачивания различают глубокое растачивание на сжатие (рис. 4.21а) и растяжение (рис. 4.21б).

По схеме (рис. 4.21) растачивание начинают с торца Б заготовки 5, расположенного ближе к подающей каретке 4. Осевая составляющая силы резания  $P_x$  создает в расточной оправке 3 напряжения сжатия. По схеме (рис. 4.21б)

расточивание начинают с торца А заготовки 5. Составляющая силы резания  $P_x$  вызывает в расточной оправке 3 напряжения растяжения. Для направления инструмента в начале растачивания обычно используется кондукторная втулка 2, которая устанавливается в направляющей стойке 1. В обоих случаях расточная головка базируется в кондукторной втулке своими направляющими элементами. Обе схемы применяются при черновом и чистовом растачивании.

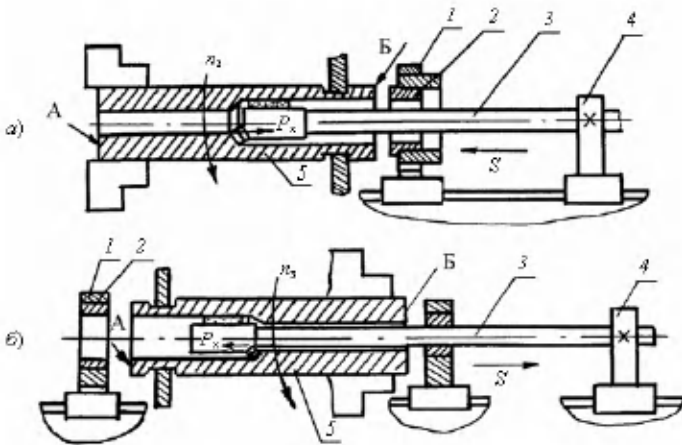


Рис. 4.21

Схемы глубокого растачивания:

а — на сжатие; б — на растяжение.

На операциях глубокого сверления и чернового растачивания образуются *дефекты*, проявляющиеся лишь при обработке глубоких отверстий. К ним относятся увод и непрямолинейность оси отверстия, огранка отверстия и волнистость профиля продольного сечения.

При обработке глубоких отверстий малых диаметров применяются *способы управления уводом и непрямолинейностью оси*:

- 1) наложение на инструмент вынужденных поперечных колебаний с частотой вращения заготовки;
- 2) наложение на заготовку вынужденных поперечных колебаний с частотой вращения заготовки;
- 3) тщательная балансировка заготовки с установкой люнетов, поддерживающих заготовку, и исключение поперечных колебаний заготовки с частотой ее вращения.

*Уменьшение огранки* может быть достигнуто повышением точности обработки заправочного отверстия (отверстие, полученное в заготовке непосредственно рабочей головкой) и снижением интенсивности поперечных автоколебаний системы головки-расточная оправка. В инструментах одностороннего резания диаметром до 30 мм рекомендуется увеличивать ширину упорной направляющей. При большом диаметре инструмента целесообразно применять две или три направляющие.

При сверлении с вращением заготовки и инструмента целесообразно применять режимы резания с большим отношением частоты вращения инструмента к частоте вращения заготовки.

Инструменты для глубокого сверления различаются способом отвода стружки и расположением режущих лезвий относительно оси и по окружности. Сверла для глубокого сверления обычно изготавливаются по 6–8-му квалитетам точности.

Для глубокого сверления применяют различные виды сверл.

*Спиральные сверла двухстороннего резания с внутренним отводом и наружным подводом охлаждающей жидкости* (рис. 4.22). Для исключения вредного влияния перемычки сверла применяют сверла с отверстием  $d_0$  в центре сверла.

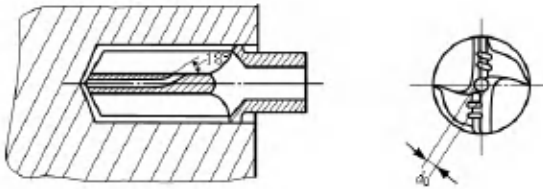


Рис. 4.22

*Схема работы сверла с внутренним и наружным подводом охлаждающей жидкости*

При работе этим сверлом образуется так называемый нулевой стержень, который выходит вместе со стружкой. Для устранения заедания нулевого стержня в центральном отверстии необходимо, чтобы этот стержень имел диаметр меньший, чем диаметр центрального отверстия. Это достигается смещением оси центрального отверстия относительно оси сверла на 0,2–0,3 мм. Для поломки и свободного удаления нулевого стержня вместе со стружкой в центральном отверстии делается уступ под углом 18–20°.

На режущих кромках сверла сделаны стружкоразделительные канавки для измельчения стружки.

Если при сверлении попадание СОЖ в зону резания и наружный стружкоотвод не гарантируются, то применяют спиральные сверла с отверстиями для подвода жидкости. Они позволяют получать отверстия диаметром 1–50 мм и глубиной  $(15-20)D$  без промежуточных выводов сверла и без снижения режима сверления. При этом стойкость сверл по сравнению с обычными спиральными сверлами больше в 3–10 раз (особенно при сверлении труднообрабатываемых материалов), а производительность выше в 1,5–2 раза.

Фирма Iscar (Израиль) изготавливает спиральные сверла с отверстиями для охлаждения диаметром 5–10 мм с длиной рабочей части 100–200 мм из ультрамелкозернистого твердого сплава с размером карбидной фазы 0,3–0,5 мкм с покрытием TiAlN (рис. 4.23).

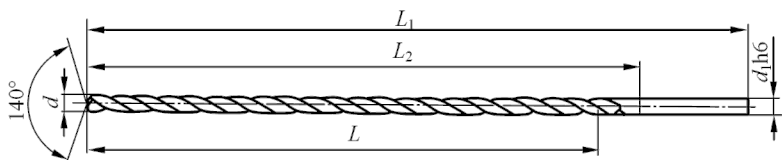


Рис. 4.23

*Твердосплавные сверла фирмы Iscar (Израиль) с отверстиями для охлаждения*

Сверление глубоких отверстий этими сверлами выполняются в следующей последовательности.

1. Коротким сверлом, диаметр которого на 0,03–0,05 мм больше диаметра длинного сверла, а угол при вершине  $2\varphi = 140^\circ$ , сверлят заправочное отверстие глубиной до двух диаметров.

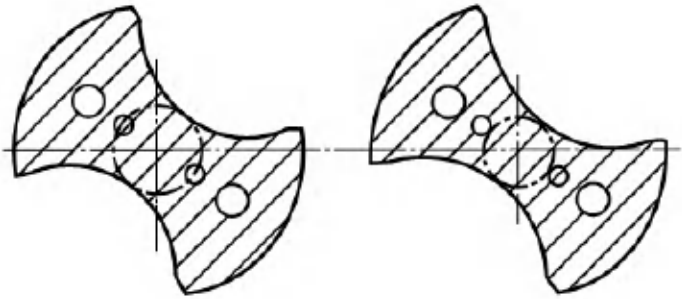
2. В заправочное отверстие заводят медленно вращающееся длинное сверло до момента контакта с дном отверстия.

3. Сверлят глубокое отверстие.

4. После окончания сверления инструмент выводят из отверстия, уменьшив частоту его вращения более чем на 50%.

Выпуск таких сверл освоила фирма Mitsubishi (Япония) (рис. 4.24). Эти сверла за счет новой геометрии режущих кромок и наличия четырех (а не двух, как обычно) отверстий для подвода СОЖ обеспечивают высокую производительность, точность и низкую шероховатость обрабатываемой поверхности при сверлении в алюминиевых

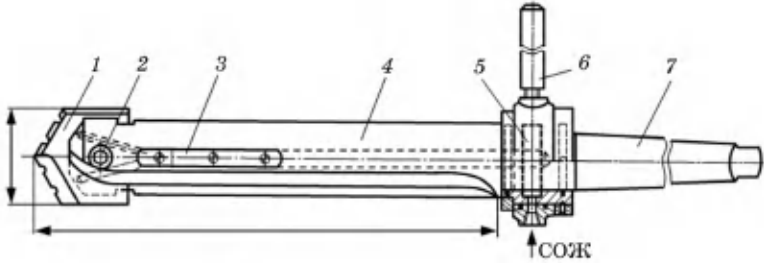
сплавах отверстий диаметром 3–20 мм и глубиной до  $30D$ , где  $D$  — диаметр отверстий.



**Рис. 4.24**

*Профили поперечных сечений твердосплавных спиральных сверл фирмы Mitsubishi (Япония)*

Шпиндельные (перовые) сверла для глубокого сверления применяются для обработки отверстий гидроцилиндров, отверстий в шпинделях станков и т. п. (рис. 4.25).



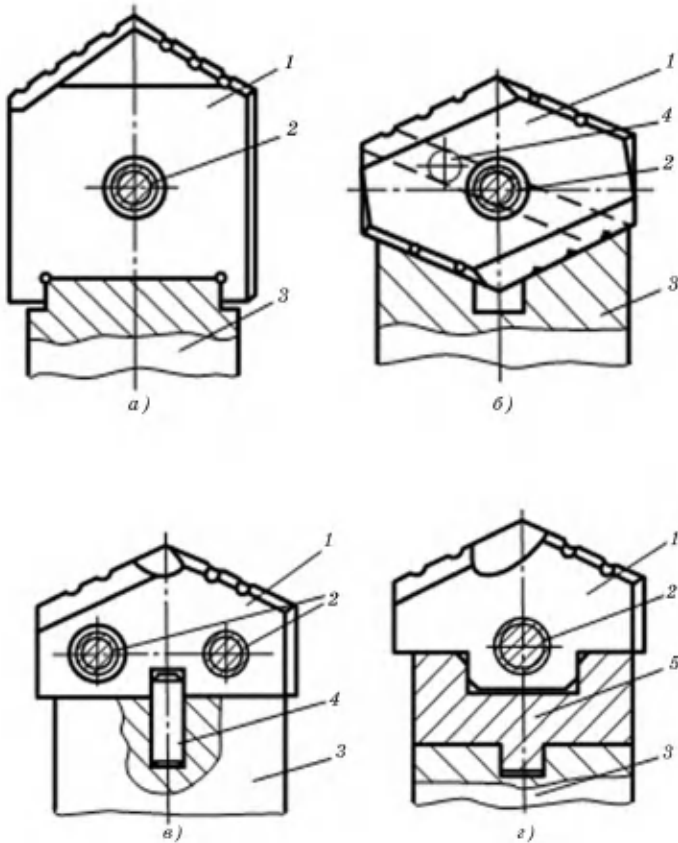
**Рис. 4.25**

*Сборное перовое сверло для сверления глубоких отверстий:*

- 1 — сменная режущая пластина; 2 — крепежный винт; 3 — направляющие пластины; 4 — оправка; 5 — патрон для подвода СОЖ; 6 — упорная планка; 7 — хвостовик.

Такое сверло состоит из сменной режущей пластины (СМП) 1, крепежного винта 2, направляющих пластин 3, оправки 4, патрона для подвода СОЖ 5, упорной планки 6 и хвостовика 7 (рис. 4.25). В качестве сменных режущих пластин перовых сверл диаметром 25–130 мм можно использовать пластины из быстрорежущей стали марок Р6М5 или Р6М5К5, выпускаемые по ГОСТ 25526-82.

Сменные режущие пластины перовых сверл изготавливают не только из быстрорежущих сталей, но и из твердых сплавов, в том числе с покрытиями. Формы пластин, а соответственно и способы их базирования в оправке сверла, могут быть различными (рис. 4.26).



**Рис. 4.26**

*Некоторые способы базирования сменных режущих пластин в оправках перовых сверл:*

*а* — ОАО «ВНИ инструмент» (Россия); *б* — фирма Sandvik Coromant (Швеция);  
*в* — фирма Hartner (Германия); *г* — фирма Rrupp Widia (Германия). 1 — сменная режущая пластина; 2 — крепежный винт; 3 — оправка; 4 — штифт; 5 — адаптер.

*Шнековые сверла* применяют для сверления отверстий в конструкционных сталях, сером чугуне и других хрупких металлах диаметром 5–14 мм и более и глубиной до (30–40) $D$ , с точностью диаметральных размеров IT 12, уклодом осей отверстий не более 0,5/100 мм и шероховатостью обработанных поверхностей  $Rz = 80$  мкм.

В отличие от стандартных спиральных сверл шнековые сверла имеют значительно больший угол наклона винтовых канавок:  $\omega = 50\text{--}65^\circ$  (рис. 4.27). Канавки в осевом сечении сверла имеют профиль, образованный двумя прямыми линиями, сопряженными дугой окружности. Передняя поверхность винтовой канавки перпендикулярна оси сверла, а ее задняя поверхность переходит непосредственно в калибрующую ленточку. Затачивают шнековые сверла по главным задним поверхностям плоскостным методом. Для получения стружкодробящего порожка сверло подтачивают и по передней поверхности.

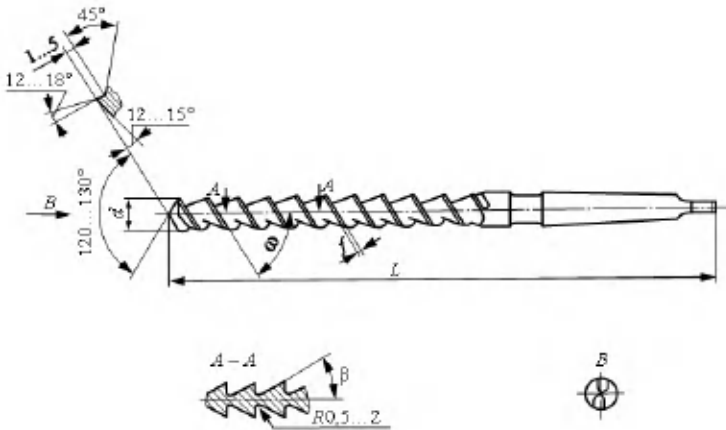


Рис. 4.27

*Шнековое сверло*

Для большей жесткости шнекового сверла диаметр его сердцевины увеличен по сравнению со стандартным спиральным сверлом до  $k = 0,3\text{--}0,35d$  и постояен на длине рабочей части инструмента. Обратная конусность сверла составляет 0,03–0,08 мм на 100 мм длины его рабочей части, материал которой — быстрорежущая сталь марок P6M5, P6M5K5 и др.

*Пушечные или лопаточные сверла* (рис. 4.28) применяются для рассверливания предварительно просверленных отверстий.

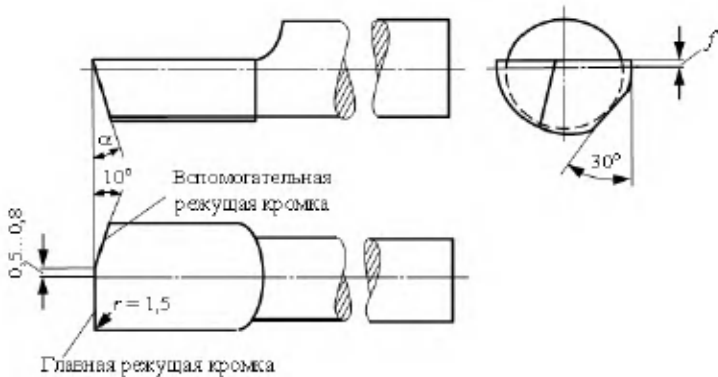


Рис. 4.28

## Пушечное сверло

Сверло представляет собой стержень, один конец которого срезан и образует переднюю поверхность в виде лопатки с  $\gamma = 0^\circ$ , а задняя поверхность заточена под углом  $\alpha = 10\text{--}20^\circ$ . Чтобы устранить опасность заедания сверла в отверстии, его передняя поверхность расположена выше центра сверла на  $f = 0,1\text{--}0,5$  мм.

Для лучшего направления сверло имеет цилиндрическую опорную поверхность, а с целью уменьшения трения сверла о стенки обрабатываемого отверстия на цилиндрической опорной поверхности его делается лыска, срезанная под углом  $20\text{--}30^\circ$  и обратный конус порядка  $0,03\text{--}0,05$  мм на 100 мм длины рабочей части сверла. Рабочая часть сверла может быть из твердого сплава.

*Сверла ружейные* применяются для сверления отверстий диаметром до 45 мм. Они значительно совершеннее пушечных и обеспечивают большую точность. В ряде случаев удается избежать последующего развертывания отверстий, которое было бы необходимо при работе более производительными сверлами, имеющими две режущие кромки.

На рисунке 4.29 представлено ружейное сверло. Оно состоит из рабочей части 1, которая приваривается к хвостовику 2. Угол  $\phi = 110\text{--}120^\circ$ .

Для облегчения резания и лучшего направления вершина сверла смещена относительно оси хвостовика на величину  $L$ . В результате этого на дне отверстия образуется конус, который способствует направлению и центрированию сверла.

Наконечники ружейных сверл бывают цельные твердосплавные, сборные из стали типа 30ХГСА (для  $d > 22$  мм),

оснащенные напайными режущими и направляющими твердосплавными пластинами, а также сменные твердосплавные (рис. 4.30).

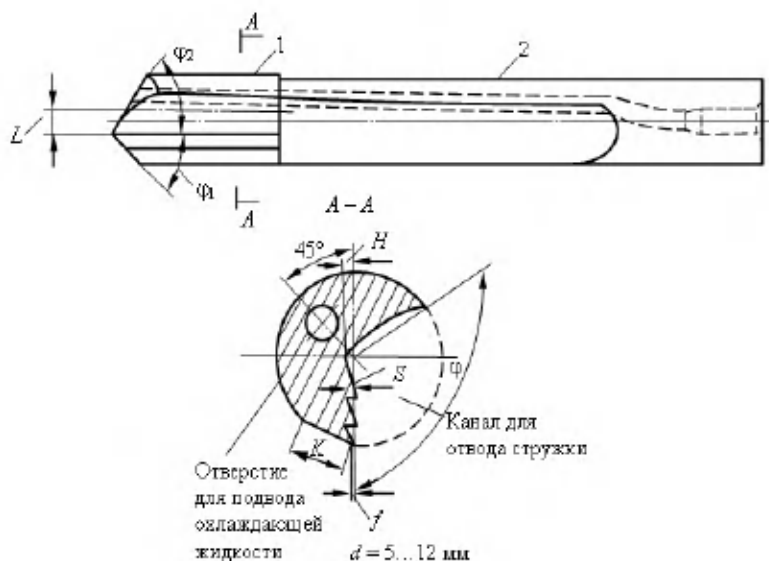


Рис. 4.29

Ружейное сверло

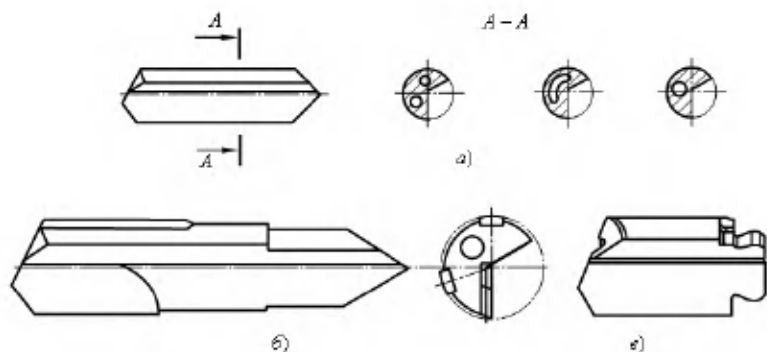


Рис. 4.30

Типы наконечников ружейных сверл:

а — цельный твердосплавный; б — сборный, оснащенный напайными твердосплавными пластинами; в — сменный твердосплавный фирмы Iscar (Израиль).

В настоящее время для экономии затрат на покупку и утилизацию СОЖ, в целях охраны здоровья персонала и окружающей среды используются СОТС аэрозоли. Так, например, по данным фирмы Gühring (Германия), при сверлении в алюминиевом сплаве марки AlSi9Cu3 ружейными сверлами отверстия диаметром 10 мм и глубиной 200 мм при использовании аэрозоли вместо масляной СОЖ удалось повысить стойкость инструмента в 4 раза, подачу — в 3 раза, а скорость резания — в 1,23 раза. Для этого потребовалось изменить расположение подводящих отверстий в наконечнике сверла, изготовленном из ультрамелкозернистого твердого сплава марки DK460UF, направив аэрозоль к направляющим элементам инструмента (рис. 4.31).

При сверлении глубоких отверстий диаметром от 50 мм и выше могут быть использованы *трубчатые (кольцевые)* сверла (рис. 4.32).

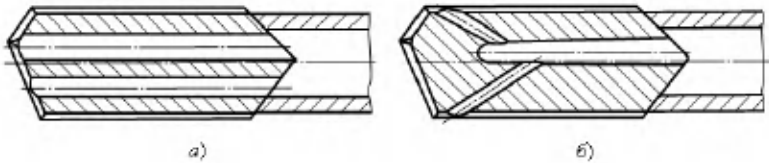


Рис. 4.31

Расположение каналов для подвода СОЖ в твердосплавном наконечнике ружейного сверла фирмы Gühring (Германия):

а — стандартного; б — специального.

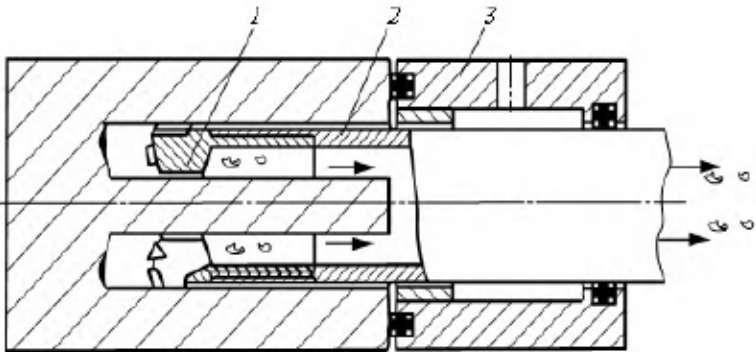


Рис. 4.32

Схема обработки глубоких отверстий кольцевым сверлом БТА:

1 — сверлильная головка; 2 — стембель; 3 — маслоприемник.

Кольцевые сверла применяют для сверления отверстий диаметром 50–500 мм и более, глубиной до  $150D$  с точностью диаметральных размеров IT 10 и шероховатостью обработанной поверхности Ra 3 мкм.

Кольцевые сверла состоят из сверлильной головки 1 и стебля 2, соединенных между собой прямоугольной четырехзаходной резьбой. В процессе сверления СОЖ в зону резания подается под давлением через маслоприемник 3 в кольцевой зазор между стеблем и обрабатываемым отверстием, а стружка отводится через отверстие в стебле.

При сверлении глухих отверстий остающиеся сердечники необходимо удалять, для чего применяют специальные отрезные головки. Например, в ОАО «Тяжстанкогидропресс» (г. Новосибирск) для отрезки сердечников, образующихся при сверлении отверстий диаметром до 216 мм, применяют отрезные головки следующей конструкции (рис. 4.33). Такая головка состоит из втулки 1, на правом конце которой нарезана прямоугольная резьба. На передней части втулки крепится корпус 2, в котором на шарнирах закреплен дуговой резцедержатель 3. Последний через серьгу 4 и шпонку 5 соединен со втулкой 1. В передней части корпуса находится кольцо 6, которое служит упором подачи резца. Отрезную головку крепят к стеблю, предварительно сняв кольцевую головку, и заводят в высверленную часть заготовки до конца. При дальнейшей подаче стебля кольцо 6 упирается в дно высверленной части и останавливается. При этом втулка 1 продолжает двигаться и сила подачи, передаваемая шпонкой 5 и серьгой 4, толкает дуговой резцедержатель вперед, поворачивая его на шарнирах. В результате отрезной резец врезается в сердечник и подрезает его.

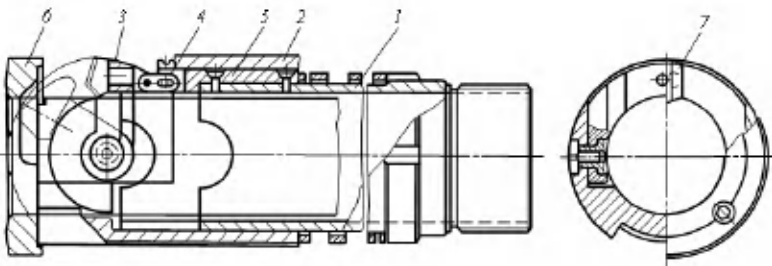


Рис. 4.33

Головка для отрезки сердечников

Для увеличения диаметра отверстия после сверления применяются расточные головки. Различают черновые, получистовые и чистовые расточные инструменты.

Черновые расточные инструменты снимают большие припуски ( $t_{\max} = 20$  мм) с точностью диаметральных размеров IT 10–11 и шероховатостью Rz в пределах 40–80 мкм.

Чистовые расточные инструменты снимают значительно меньшие припуски ( $t_{\max} = 1,6$  мм) с точностью диаметральных размеров IT 7–8 и шероховатостью Ra < 1 мкм.

Фирма Iscar (Израиль) выпускает гамму расточных головок, предназначенных для обработки глубоких отверстий диаметром 14,5–100 мм (рис. 4.34). Головки изготавливают напайными и сборными; с внутренним, наружным и эжекторным отводом стружки; с наружной четырехзаходной и внутренней однозаходной прямоугольной резьбой. Точность обработки напайными (перетачиваемыми) головками IT 7, сборными – IT 8, а шероховатость обработанных поверхностей соответственно Ra = 1 мкм и Ra = 2 мкм. При этом глубина резания  $t = 1–8$  мм.

Фирма Sandvik Coromant для растачивания отверстий диаметром 20–280 мм и более, глубиной до  $150D$  с точностью диаметральных размеров IT 9–10 и шероховатостью обработанных поверхностей Ra = 10 мкм выпускает три конструкции сборных расточных головок и таких же головок с эжекторным отводом стружки.

Расточные головки первой конструкции (рис. 4.35a) применяют для растачивания глубоких отверстий диаметром 20–43 мм с точностью диаметральных размеров IT 9 и шероховатостью обработанных поверхностей Ra = 1 мкм. В этих головках винтами закреплены регулируемая твердосплавная режущая пластина со стружкодробящим порожком и калибрующей ленточкой, две цельнотвердосплавные полукруглые направляющие пластины и одна виброгасящая опора цилиндрической формы.

Расточные головки второй конструкции (рис. 4.35б) применяют для растачивания глубоких отверстий диаметром 43–124 мм с точностью диаметральных размеров IT 9 (когда в державке установлена режущая пластина с калибрующей ленточкой) и IT 10 (когда установлена режущая пластина без калибрующей ленточки) и шероховатостью обработанных поверхностей Ra = 1 мкм. При этом режущие пластины с калибрующей ленточкой крепят в державках винтами, а без калибрующей ленточки — рычагом через отверстие в пластине. В первом случае максимальная глубина резания достигает 4,5 мм, а во втором — 6 мм.

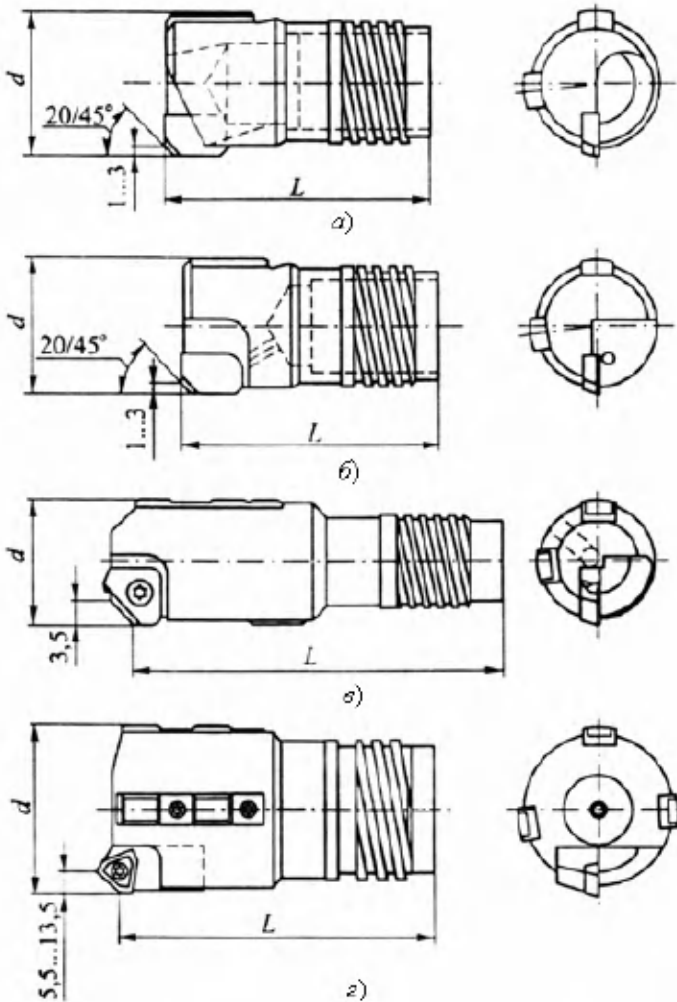


Рис. 4.34

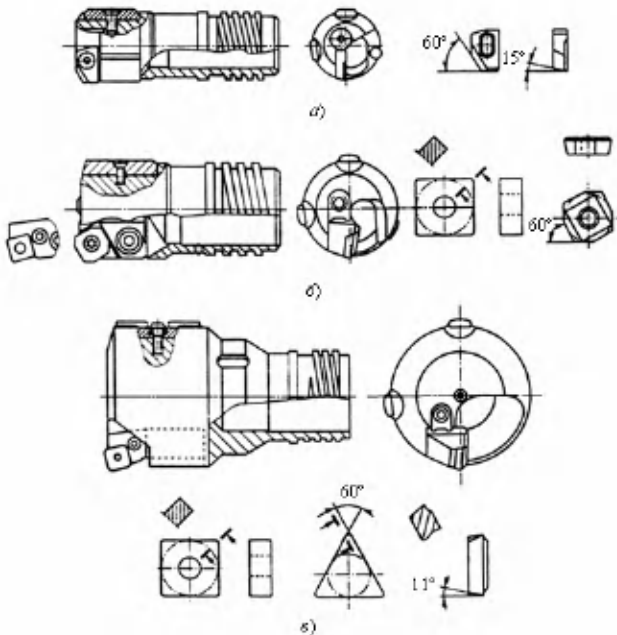
Расточные головки фирмы Iscar (Израиль):

*a, б* — напайная ( $d = 19-65$  мм); *в* — сборная ( $d = 25-40$  мм);

*г* — сборная ( $d = 40-100$  мм).

Расточные головки третьей конструкции (рис. 4.35*в*) применяют для чернового растачивания глубоких отверстий диаметром 65–280 мм и более, с точностью диаметральных размеров IT 10 и шероховатостью обработанных

поверхностей  $Ra = 3$  мкм. В этих головках используют трех- и четырехугольные сменные твердосплавные режущие пластины, а в качестве направляющих — две твердосплавные самоустанавливающиеся направляющие. Треугольные пластины крепят в державках прихватом сверху, а четырехугольные — рычагом через отверстие в пластине. Если стружкодробящие порошки на треугольных режущих пластинах не обеспечивают устойчивого стружкодробления, то применяют накладные стружколомы. В указанном диапазоне диаметров отверстий максимальная глубина резания пластинами треугольной формы равна 10 мм ( $d = 65-90$  мм) и 16 мм ( $d = 90-280$  мм), а четырехугольной формы — 12 мм ( $d = 65-90$  мм) и 17 мм ( $d = 90-280$  мм).



**Рис. 4.35**

*Сборные расточные головки фирмы Sandvik Coromant (Швеция) и твердосплавные сменные режущие пластины к ним:*

*$a - d = 20-43$  мм;  $b - d = 43-124$  мм;  $c - d = 65-280$  мм.*

Фирма Votek (Германия) выпускает расточные головки, применяемые для растачивания глубоких отверстий

диаметром 45–250 мм. В этих головках регулируемая твердосплавная пластина в форме параллелограмма имеет калибрующие ленточки и крепится винтом к державке (рис. 4.36). В качестве направляющих используются три твердосплавные и три пластмассовые пластины. Последние служат для гашения колебаний в процессе обработки.

Специальные расточные головки с подвижным резцом и подвижными и неподвижными направляющими применяют для обработки фасонных глубоких отверстий (рис. 4.37). При этом подвижность резца и направляющих обеспечивается гидроприводом, управляемым УЧПУ станка, на котором используют эти инструменты. В результате сочетания движения резца в радиальном  $S_p$  и продольном  $S_{пр}$  направлениях обеспечивается получение сложных траекторий его вершины.

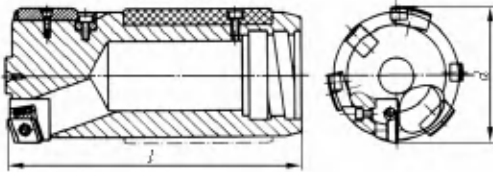


Рис. 4.36

Сборная расточная головка фирмы Votek (Германия)

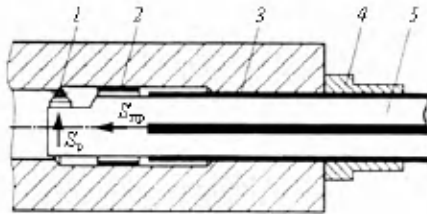


Рис. 4.37

Схема обработки глубокого профильного отверстия специальной расточной головкой:

- 1 — СМП; 2 — подвижные направляющие; 3 — неподвижные направляющие;  
4 — кондукторная втулка, 5 — стембель расточной головки.

Для обработки отверстий в заготовках из коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов применяется **сверление с вибрацией**. При вибрационном сверлении на обычное осевое движение подачи накладываемое дополнительное осциллирующее движение. Сверление с вибрациями заготовок из труднообрабатываемых материалов применяют при обработке отверстий диаметром 3–20 мм и

глубиной до 5–20 диаметров с использованием твердо-сплавных сверл.

Глубокое сверление с вибрациями выполняется на вибросверлильных установках и станках, оснащенных вибраторами. При обработке инструменту наряду с вращательным движением и движением подачи сообщаются колебания вдоль оси (с амплитудой 0,01–0,04 мм и частотой 100–200 Гц).

Режимы резания при вибросверлении отверстий в труднообрабатываемых сталях и сплавах с частотой колебаний (число колебаний инструмента на один оборот шпинделя)  $i = 4,25$  колеб./об приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7

## Режимы резания при вибросверлении отверстий

Обрабатываемый материал	Диаметр сверления $d$ , мм	Скорость резания $v$ , м/мин	Подача $S$ , мм/об	Амплитуда $2A^*$ , мм
Титановые сплавы ВТЗ, ВТ5, ВТ9, ВТ20, ВТ22, ОТ4 и др.	3	21	0,01	0,03
	5	30–35	0,02	0,05
	8	35	0,03	0,065
	10	35	0,035	0,085
	12	40	0,04	0,10
Жаропрочные сплавы ХН67ВМТЮ, ХН62МВКЮ, ХН70ВМТЮ, ХН77ТЮР и др.	3	15–18	0,01	0,03
	5	18	0,03	0,08
	8	20	0,04	0,12
	10	20–25	0,045	0,12
	12	20–25	0,05	0,12
Жаропрочные сплавы ЖС6К, ЖС6-КП и др.	3	12–15	0,01	0,03
	5	18	0,02	0,06
	8	18	0,04	0,12
	10	18–20	0,045	0,12
	12	18–20	0,05	0,12
Коррозионно-стойкие нержавеющие стали 13Х12Н2ВМ, 14Х17Н2 и др.	3	21	0,01	0,03
	5	30–35	0,02	0,06
	8	35	0,04	0,10
	10	35	0,04	0,10
	12	40	0,05	0,12
	15	40	0,05	0,12

Примечание:  $A^*$  — фактическая амплитуда колебаний инструмента.

При внедрении технологии вибрационного сверления необходимо учитывать следующие рекомендации:

1) скорость резания назначается близкой или несколько большей скорости резания при обычном сверлении;

2) подача устанавливается в 1,2–1,5 раза большей, чем при обычном сверлении;

3) амплитуду осевых колебаний для сверления отверстий глубиной 5–8 диаметров следует выбирать численно равной  $(1-2)S_0$ , для отверстий глубиной более 8 диаметров —  $(2-3)S_0$ .

#### 4.7. ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ В ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Широкое применение труднообрабатываемых материалов при изготовлении деталей вызвало необходимость применения физико-химических методов.

При электроискровой обработке форму обрабатываемого отверстия определяет электрод-инструмент, что позволяет обрабатывать сквозные и глухие отверстия любого поперечного сечения, используя проволочные, ленточные и другие электроды. Режимы электроискровой обработки при прошивке отверстий (частота  $f = 500-5000$  Гц) приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8

**Режимы электроискровой обработки отверстий**

Операция, диаметр отверстия, мм		Напряжение, В	Мощность, кВт	Производительность, мм <sup>3</sup> /мин	Шероховатость обработанной поверхности Ra, мкм
Прошивка	∅1	30–70	0,2–0,3	20	0,6–40
	∅5	80–200	0,5–0,8	150	0,6–40
	∅20	80–200	2–2,5	300	0,6–40

Для электроэрозионной обработки отверстий применяются универсальные, специализированные и специальные станки, например универсальные прошивочные станки, работающие по схемам прямого и обратного копирования, в том числе с ЧПУ (4Г721М, 4Д722АФЗ, 4П724ФЗМ и др.), специализированные станки для перфорации отверстий в лопатках ГТД, обработки форсунок, секций камер сгорания и др. Копировально-прошивочные и другие станки этой группы оснащаются системами программного и адаптивного управления.

Технологические режимы электрохимической обработки отверстий приведены в таблице 4.9.

Режимы **лазерной обработки** отверстий диаметром от 0,02 до 0,6 мм из стали и железоникелевых сплавов приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.9

## Технологические возможности электрохимической обработки

Операции электрохимической обработки	Скорость обработки, мм/мин	Шероховатость поверхности Ra, мкм
Прошивка отверстий диаметром 1–10 мм	2,5–8,0	2,5–0,63
Прошивка полостей сложной конфигурации	0,4–0,8	1,25–0,32 (дно) 20–10 (боковые стенки)

Таблица 4.10

## Режимы лазерной обработки отверстий

Диаметр отверстия, мм	Глубина отверстия, мм	Режимы обработки					
		плотность энергии излучения $q$ , Вт/см <sup>2</sup>	одноимпульсный		многоимпульсный		
			энергия излучения $W$ , Дж	длительность импульса $\tau$ , мс	энергия излучения $W$ , Дж	длительность импульса $\tau$ , мс	число импульсов
0,02–0,05 0,05–0,1	0,1–0,2	10 <sup>7</sup>	0,1–0,2	0,1–1,0	0,05	0,1	3–5
			0,2–0,5		0,1		3–5
0,03–0,05 0,1–0,2	0,3–0,6		0,2–0,5		0,05		5–10
0,1–0,2 0,5–0,6	1–2		0,7–1,5		0,1	5–10	
			2–4		0,5	0,1–	5–10
			10		1,0	1,0	10

Для лазерной обработки отверстий применяются установки типа «Квант» импульсного действия, установки с ЧПУ, например модели 4222Ф2 и др. Лазерная обработка обеспечивает точность 11–10-го квалитетов, шероховатость Ra = 2,5–0,32 мкм.

Преимущества лазерной обработки перед электронно-лучевой в том, что лазерная обработка выполняется в воздушной среде и не требует вакуумных камер, меньше габариты оборудования, не нужна защита обслуживающего персонала от рентгеновского излучения.

# ОБРАБОТКА ПЛОСКИХ И ЛИНЕЙЧАТЫХ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Многие детали содержат конструктивные элементы, имеющие форму плоской или линейчатой поверхности – пазы, уступы, проушины, скосы, торцовые и другие поверхности. Типичными представителями являются корпуса и крышки коробок приводов, агрегатов, насосов (плоскости разъема), диски турбины и компрессора, пазы для замков лопаток, лопатки турбины и компрессора, хвостовики различной формы, распылители, сопла и завихрители форсунок (торцовые поверхности), кронштейны и рычаги (проушины и уступы). При проектировании таких поверхностей стремятся, чтобы их размеры были минимальными. Относительное расположение обрабатываемых поверхностей должно быть взаимно параллельным или взаимно перпендикулярным, что позволяет применять более простую оснастку для их обработки. Узкие и длинные поверхности должны допускать обработку на проход в продольном направлении.

Обработка плоских и фасонных линейчатых поверхностей может выполняться долблением, фрезерованием, протягиванием, шлифованием, доводкой и др.

## 5.1. ОБРАБОТКА ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СТРОГАНИЕМ И ДОЛБЛЕНИЕМ

Строгание и долбление применяют в единичном (опытном) и мелкосерийном производствах. При обработке плоских поверхностей на строгальных и долбежных станках не требуется сложной оснастки и легко осуществляется переход от обработки одной детали к другой. Вместе с тем, наличие вспомогательных ходов и невысокие скорости резания делают эти процессы малопроизводительными, например, по сравнению с фрезерованием.

**Процесс строгания** наиболее целесообразно применять при обработке длинных и узких плоских поверхностей. Строгание выполняется на продольно-строгальных и поперечно-строгальных станках. Поперечно-строгальные станки применяются при обработке поверхностей небольших размеров, а продольно-строгальные станки главным образом — для обработки плоских поверхностей относительно больших размеров. На строгальных станках осуществляется обработка горизонтальных, вертикальных и наклонных поверхностей, пазов и других линейчатых поверхностей.

На рисунке 5.1 приведена схема процесса строгания плоской поверхности на поперечно-строгальном станке:  $t$  — глубина резания;  $S$  — подача, мм/дв. ход;  $b_1$  — ширина срезаемого слоя;  $a_1$  — толщина срезаемого слоя;  $l$  — длина строгания;  $v_{р.х}$  — скорость рабочего хода;  $v_{х.х}$  — скорость холостого хода.

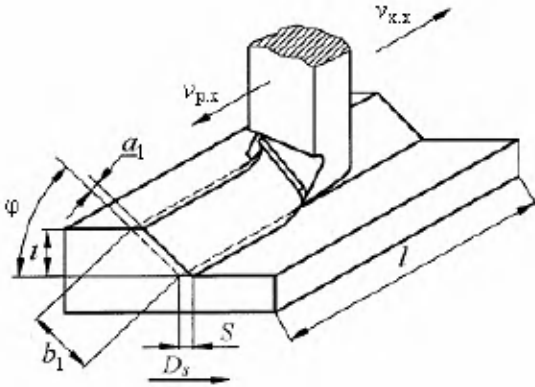


Рис. 5.1

*Схема процесса строгания плоской поверхности на поперечно-строгальном станке*

У поперечно-строгальных станков движение резания сообщается инструменту-резцу, движение подачи передается заготовке. У продольно-строгальных станков движение резания сообщается заготовке, а движение подачи — инструменту. Движение подачи осуществляется на двойной ход главного движения. При строгании срезание припуска происходит во время рабочего хода, а во время вспомогательного хода (обратного) заготовка или резец возвращаются в исходное положение. Для сокращения цикла обработки скорость вспомогательного хода больше скорости рабочего хода в 2–3 раза.

**Процесс долбления** осуществляется на долбежных станках при возвратно-поступательном движении резца в вертикальной плоскости. Движение резца вниз является рабочим, а вверх — холостым ходом. Подача при долблении, как и при строгании, является подачей на двойной ход инструмента (мм/дв. ход). Глубина резания измеряется в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности. Долблением обрабатывают линейчатые поверхности, например, шпоночные канавки в зубчатых ко-

лесах и втулках, многогранные отверстия, в том числе и глухие, наружные фасонные поверхности и другие.

На схеме долбления (рис. 5.2):  $L$  — длина хода резца;  $l$  — длина долбления;  $h$  — глубина шпоночной канавки;  $v_{p.x}$  и  $v_{x.x}$  — скорость рабочего и холостого хода резца;  $S$  — подача.

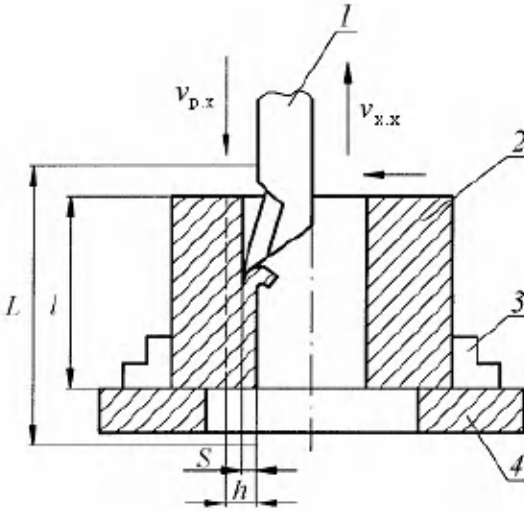


Рис. 5.2

Схема долбления плоской поверхности шпоночной канавки:

1 — резец; 2 — заготовка; 3 — приспособление; 4 — корпус приспособления.

В зависимости от требований к шероховатости обрабатываемой поверхности при строгании и долблении применяются черновая и чистовая обработка. Скорость резания ограничивается условиями обработки: обрабатываемым и инструментальным материалом, жесткостью системы (станок — приспособление — инструмент — заготовка) и другими технологическими условиями. Режимы резания при черновой и чистовой обработке плоских поверхностей заготовок из конструкционных легированных и жаропрочных сталей на строгальных и долбежных станках резцами с твердыми сплавами Т15К12В, Т7К12 и ВК8В приведены в таблице 5.1.

При строгании применяются изогнутые и режущие прямые резцы. При изгибе резца с прямым стержнем под действием силы резания вершина резца внедряется в обрабатываемую поверхность, что приводит к дефектам поверхности

и выкрашиванию режущей кромки. При изогнутом стержне (рис. 5.3) вершина его будет находиться в плоскости опоры (или за ней в одной из точек кривой радиуса  $R$ ) и внедрение будет отсутствовать.

Таблица 5.1

## Режимы резания при строгании и долблении

Материал обрабатываемой заготовки	Глубина резания, мм	Подача, мм/дв. ход	Скорость резания, м/мин
Конструкционные, легированные и жаропрочные стали с $\sigma_B$ , МПа:			
550	3–20	1,0–4,0	80–32
	1–4	0,2–1,4	190–50
650	3–20	1,0–4,0	62–25
	1–4	0,2–1,4	150–40
750	3–20	1,0–4,0	50–20
	1–4	0,2–1,4	120–30
850	3–20	1,0–4,0	42–18
	1–4	0,2–1,4	100–25

*Примечания.* 1. В числителе приведены режимы резания при черновой обработке, в знаменателе – при чистовой. 2. При обработке на поперечно-строгальных и долбежных станках с глубиной резания до 8 мм, табличные значения скоростей резания уменьшают соответственно на 20 и 30%.

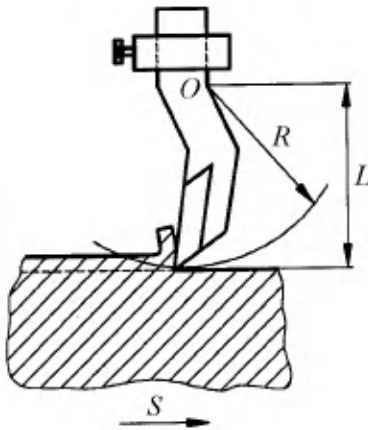


Рис. 5.3

Схема строгания изогнутым резцом

Резцы для строгальных и долбежных станков, применяемых для обработки труднообрабатываемых материалов, изготавливают из сталей Р9М4К8Ф, Р9К10 и твердых сплавов ВК6, ВК8, Т5К10, Т15К6, Т5К12В, Т7К12. Учитывая, что строгальные и долбежные резцы работают с ударами, передний угол  $\gamma$  у них делается на  $5-10^\circ$  меньше, чем у токарных резцов. Другие геометрические параметры строгальных и долбежных резцов (задний угол  $\alpha$ , главный угол в плане  $\phi$  и угол наклона главной режущей кромки  $\lambda$ ) выбирается как при токарной обработке. Для предохранения от разрушения и быстрого износа лезвия у строгальных резцов на передней поверхности предусматривается ленточка шириной, равной  $(0,8-1)S$ . Передний угол на ленточке  $\gamma_1 = 5^\circ$  для резцов из быстрорежущих сталей и  $\gamma_1 = -5-15^\circ$  для резцов с твердым сплавом.

Специфика работы строгальных станков (наличие возвратно-поступательного движения, большие перемещающиеся массы, большие инерционные силы при реверсировании движения, работа с ударами, разница в скоростях рабочего и холостого ходов) влияет на скорость резания. В общем случае скорость резания при строгании определяют по формуле

$$v = \frac{n \cdot L}{1000}(1 + m), \text{ м/мин},$$

где  $n$  — число двойных ходов резца или стола в мин;  $L = l + l_1 + y$  — длина хода резца, мм;  $l$  — длина обрабатываемой поверхности, мм;  $l_1$  — перебеги резца при холостом (обратном) ходе, мм;  $y$  — перебеги при рабочем ходе, мм;  $m$  — отношение скорости рабочего хода  $v_{p.x}$  к скорости холостого хода  $v_{x.x}$ .

При одинаковых скоростях рабочего и холостого ходов скорость рабочего хода определяется выражением:

$$v_{p.x} = v_{x.x} = \frac{2L \cdot n}{1000}, \text{ м/мин}.$$

Строгание и долбление обеспечивают точность 13–9-го квалитетов, шероховатость обработанной поверхности  $Ra = 12,5-0,8$  мкм.

Машинное время при строгании определяется по формуле

$$T_{\text{маш}} = \frac{B + y_1 + y_2}{n \cdot S}, \text{ мин},$$

где  $B$  — ширина обрабатываемой поверхности заготовки, мм;  $y_1 = t \text{ctg} \phi$  — путь врезания резца в направлении

подачи, мм;  $y_2$  — перебег резца в направлении подачи, мм;  $n$  — число двойных ходов стола, мин;  $S$  — подача на один двойной ход стола, мм.

Машинное время при долблении шпоночной канавки определяется по формуле

$$T_{\text{маш}} = \frac{B}{S \cdot n}, \text{ мин,}$$

где  $B$  — глубина канавки, мм.

## 5.2. ОБРАБОТКА ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ

При обработке деталей, имеющих плоские и фасонные линейчатые поверхности, широко применяется фрезерование, которое лишь в условиях крупносерийного производства при обработке деталей из труднообрабатываемых материалов уступает протягиванию.

Основным способом обработки плоских поверхностей является фрезерование цилиндрическими и торцевыми фрезами, а другие способы являются комбинациями цилиндрического и торцевого фрезерования.

**Цилиндрическое фрезерование** разделяют на встречное и попутное. При встречном фрезеровании толщина стружки увеличивается от нуля до максимального значения и в результате скольжения режущей кромки зуба фрезы по обрабатываемой поверхности образуется деформированный слой. При попутном фрезеровании толщина стружки постепенно уменьшается, что благоприятно сказывается на качестве обработанной поверхности.

Режимы резания при фрезеровании характеризуются:

1) скоростью резания

$$v = \frac{\pi D \cdot n}{1000}, \text{ м/мин,}$$

где  $D$  — диаметр фрезы, мм; подачей на зуб  $S_Z$ , мм/зуб; подачей на оборот  $S_0 = S_Z \cdot Z$  мм/об; минутной подачей  $S_M = S_0 \cdot n = S_Z \cdot Z \cdot n$ , мм/мин; глубиной резания  $t$ , мм;

2) шириной фрезерования  $B$ , мм.

Фрезерование плоских поверхностей осуществляется на горизонтально-фрезерных, вертикально-фрезерных, продольно-фрезерных, карусельно-фрезерных, барабанно-фрезерных, специальных, многоцелевых и других станках, в том числе с ЧПУ. Некоторые схемы фрезерования плоских поверхностей приведены на рисунке 5.4.

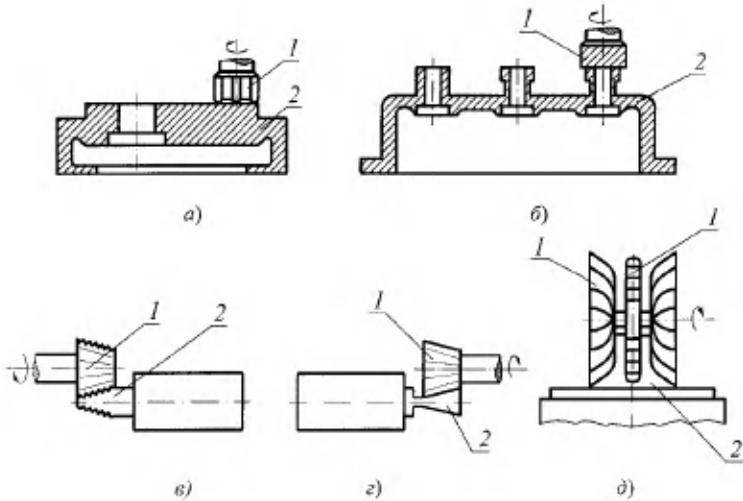


Рис. 5.4

Схемы фрезерования плоских и продольных поверхностей:

- a, б* — корпуса коробки привода; *в* — клина хвостовика лопатки турбины;  
*г* — хвостовика типа «ласточкин хвост» лопатки компрессора; *д* — шарнирного хвостовика лопатки ротора компрессора; *1* — фреза; *2* — заготовка.

Обработку плоских поверхностей корпусных деталей (рис. 5.4*a, б*) коробчатого типа (коробки и крышки приводов, агрегатов, редукторов), изготовляемых из легких магниевых и алюминиевых сплавов, целесообразно выполнять фрезерованием на скоростных режимах с использованием *торцевых* или *летучих* фрез, оснащенных режущими элементами (резцами) с твердым сплавом или вставками из сверхтвердых материалов: алмазов, композитов и других инструментальных материалов. Применение летучих фрез (диаметр 60–300 мм), состоящих из корпуса и закрепленных в нем резцов (2–3 резца), обеспечивает фрезерование (в зависимости от обрабатываемого материала) со скоростями резания  $v = 40\text{--}3000$  м/мин, с подачей на зуб  $S_z = 0,005\text{--}0,05$  мм и глубиной резания  $t = 0,05\text{--}0,5$  мм. Припуск на обработку распределяется между резцами равномерно. Припуск на чистовую обработку не должен превышать 0,1 мм.

Геометрические параметры режущей части инструмента: передний угол  $\gamma = 5\text{--}8^\circ$ , задний угол  $\alpha = 8\text{--}12^\circ$ , главный угол в плане  $\varphi = 40\text{--}50^\circ$ , вспомогательный угол  $\varphi_1 = 10\text{--}15^\circ$ .

В серийном производстве обработка плоскостей корпусных деталей может выполняться на карусельно-фрезерных и барабанно-фрезерных станках. Барабанно-фрезерный станок имеет стол-барабан с горизонтальной осью вращения. Обработка плоских поверхностей детали производится одновременно с двух сторон торцевыми фрезами. Верхние фрезы выполняют предварительную обработку, а две другие фрезы, установленные в нижних фрезерных головках, выполняют окончательную обработку.

Фрезерование применяется при обработке плоских поверхностей лопаток турбины и компрессора. Например, обработка клина хвостовика лопаток турбины и хвостовика типа «ласточкин хвост» лопатки компрессора (рис. 5.4в, г) выполняется фрезерованием на горизонтально-фрезерных станках. Обрабатываемая лопатка устанавливается в кассете или зажимном приспособлении. После обработки одной стороны хвостовика кассета с лопаткой переустанавливается. Двухсторонняя обработка елочного хвостовика выполняется на специализированных двухшпиндельных станках.

Для одновременной обработки нескольких плоских поверхностей целесообразно применять фрезерование набором (комплект) фрез. По такой схеме фрезерования можно производить обработку шарнирного хвостовика лопаток ротора компрессора (рис. 5.4д).

Фрезерование плоских и фасонных линейчатых поверхностей обеспечивает: при черновой обработке точность 13–11-го квалитетов, шероховатость поверхности  $R_a = 12,5\text{--}3,2$  мкм. Соответственно, при получистовой обработке точность 12–11-го квалитетов,  $R_a = 3,2\text{--}1,6$  мкм и при чистовой обработке точность 10–8-го квалитетов,  $R_a = 1,0\text{--}0,8$  мкм. При тонком фрезеровании обеспечивается точность 8–6-го квалитетов,  $R_a = 1,6\text{--}0,2$  мкм.

Машинное время при фрезеровании (за один проход) определяют по формуле

$$T_{\text{маш}} = \frac{L}{S_{\text{м}}} = \frac{l + l_1 + l_2}{S_Z \cdot Z \cdot n}, \text{ мин.}$$

где  $L$  — общая длина прохода фрезы в направлении подачи, мм;  $l$  — длина обработанной поверхности, мм;  $l_1$  — перебеги фрезы (1–5 мм);  $l_2$  — путь врезания фрезы, мм;  $S_{\text{м}}$  — минутная подача, мм/мин;  $S_Z$  — подача на зуб фрезы, мм/зуб;  $Z$  — число зубьев фрезы;  $n$  — число оборотов фрезы в минуту.

Схемы определения пути врезания инструмента при обработке плоских поверхностей фрезами приведены на рисунке 5.5.

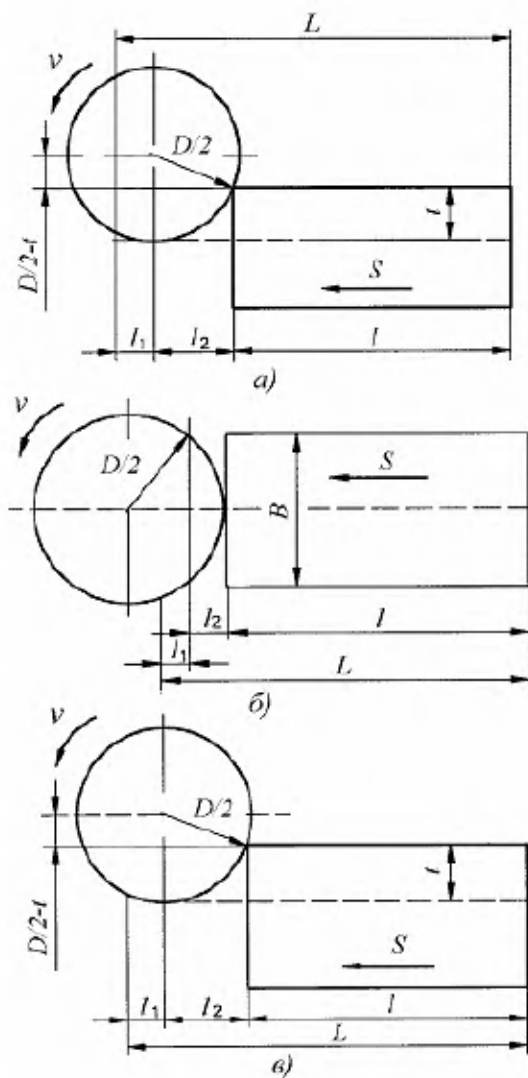


Рис. 5.5

Схемы определения пути врезания инструмента при обработке плоских поверхностей фрезями:

а — цилиндрической; б — торцевой; в — торцевой при несимметричном фрезеровании.

Путь врезания фрезы определяется при обработке плоскости цилиндрической фрезой (рис. 5.5а) по формуле

$$l_2 = \sqrt{t(D-t)}, \text{ м;}$$

при обработке торцевой фрезой (симметричное фрезерование, рис. 5.5б):

$$l_2 = 0,5(D - \sqrt{D^2 - B^2}), \text{ мм,}$$

при обработке торцевой фрезой (несимметричное фрезерование, рис. 5.5в):

$$l_2 = \sqrt{t(D-t)}, \text{ мм.}$$

### 5.3. ОБРАБОТКА ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОТЯГИВАНИЕМ

Протягивание является высокопроизводительным методом и успешно конкурирует с фрезерованием, превосходя его по точности обработки, стабильности качества, а также по производительности в пять и более раз.

Протягивание плоских поверхностей осуществляется на универсальных и специальных станках вертикальной и горизонтальной компоновки. В крупносерийном и массовом производствах применяются высокопроизводительные многопозиционные станки и станки непрерывного действия.

Главным движением при протягивании является поступательное движение протяжки. Принципиальным отличием протягивания от других видов механической обработки является то, что при протягивании отсутствует движение подачи  $S$ . Размер каждого последующего зуба режущего элемента больше предыдущего на величину, численно равную  $S_Z$  – подаче на зуб. Каждый зуб протяжки только один раз участвует в обработке данной заготовки (превышение одного зуба над другим 0,01–0,4 мм/зуб).

Протяжки для плоских и фасонных линейчатых поверхностей подразделяют следующим образом.

По профилю обрабатываемой поверхности: плоские, ступенчатые, угловые, пазовые, фасонные.

По типу протяжного станка – с хвостовиком для работы на горизонтально-протяжных станках общего назначения и без хвостовика для работы на вертикальных станках для наружного протягивания.

Режущая часть протяжек для наружного протягивания может быть выполнена по разным схемам резания: профильной, генераторной и групповой (рис. 5.6а, б, в).

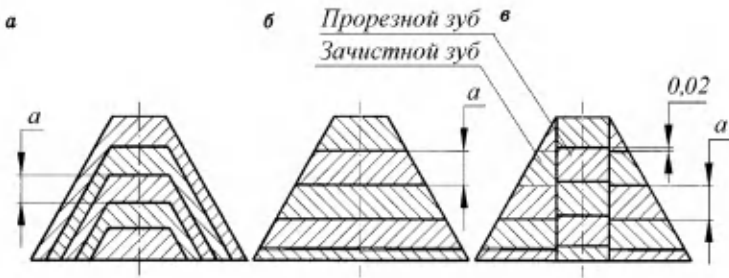


Рис. 5.6

Схемы резания при протягивании:

*a* — профильная; *б* — генераторная; *в* — групповая.

Для изготовления протяжек, применяемых для протягивания труднообрабатываемых материалов, применяются быстрорежущие стали Р9Ф4К8М, Р18ФЖ8М, Р18ФЗК8М с повышенным содержанием ванадия, дополнительно легированные кобальтом с добавкой молибдена. Более эффективно применение протяжек с режущими зубьями из твердых сплавов ВК8, ВК10, ВК6М, ВК10М.

Геометрия режущих зубьев выбирается в зависимости от прочности обрабатываемого материала. Для протягивания жаропрочных сплавов на никелевой основе передний угол  $\gamma = 10-12^\circ$ , для титановых сплавов  $\gamma = 9-10^\circ$ . Задние углы протяжек с нерегулируемой высотой зуба принимают  $\alpha = 2-3^\circ$ . Для наружных и шпоночных протяжек регулируемых по высоте  $\alpha = 8-12^\circ$ .

Скорость резания при протягивании зависит от стойкости протяжки, подъема на зуб  $S_z$  и определяется по формуле

$$v = \frac{C_v}{T^m S_z^{y_v}}, \text{ м/мин,}$$

где  $T$  — принятая стойкость зубьев протяжки. Значения постоянных  $C_v$  и показателей степени  $m$  и  $y_v$  приводятся в справочной литературе.

Протягивание широко применяется при обработке пазов в дисках турбин. Схема протягивания елочных пазов в диске турбины приведена на рисунке 5.7.

Последовательность снятия припуска обозначена цифрами 1, 2, 3, 4. Участок 1 снимается фрезерованием, участки 2, 3, 4 снимаются последовательным протягиванием.

Пазы в дисках компрессора типа «ласточкин хвост» протягивают на горизонтально-протяжных и вертикально-

протяжных станках. Схема протягивания паза такого типа приведена на рисунке 5.8. Учитывая, что длина пазов на дисках компрессора разная, в зависимости от ступени количество проходов может быть разное — от одного до семи.

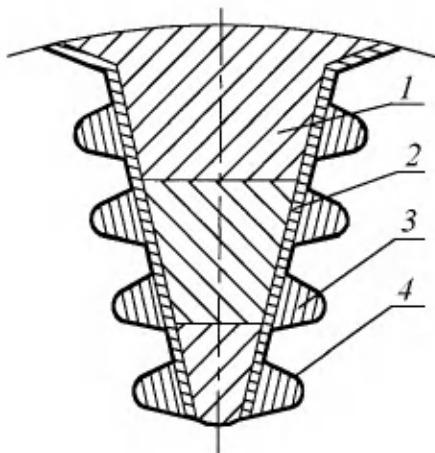


Рис. 5.7

Схема протягивания пазов в диске турбины:

1 — припуск, снимаемый фрезерованием; 2, 3, 4 — припуски, снимаемые протягиванием.

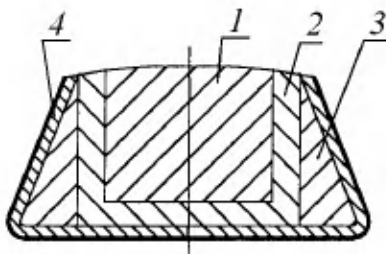


Рис. 5.8

Схема протягивания паза в дисках компрессора:

1, 2, 3, 4 — припуски, снимаемые последовательным набором протяжек.

Лопатки турбины и компрессора с хвостовиками типа елочного профиля и ласточкина хвоста, как и диски, могут обрабатываться протягиванием. Елочный профиль лопатки турбины может обрабатываться за два этапа: сначала поверхности клина, а затем профиля хвостовика. При

протягивании клина могут обрабатываться сразу обе стороны на горизонтально-протяжном станке. Вторым этапом — протягивание профиля хвостовика с двух сторон одновременно с основанием хвостовика.

Обработка хвостовиков лопаток компрессора типа «ласточкин хвост» выполняется на универсально-протяжных и специализированных автоматах непрерывного действия. Протягивание выполняется комплектом протяжек, собранных в блок. Схема резания при протягивании хвостовика типа «ласточкин хвост» штампованных лопаток компрессора представлена на рисунке 5.9. Припуски, обозначенные цифрами 1, 2, 3, снимаются последовательно соответствующими секциями протяжки.

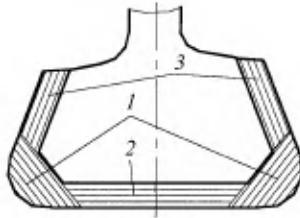


Рис. 5.9

Схема резания при протягивании хвостовиков лопаток типа «ласточкин хвост» у лопаток компрессора:

1 — фаски; 2 — подошва; 3 — боковые поверхности.

Протягиванием обрабатываются и другие плоские поверхности хвостовиков лопаток турбины и компрессора, например, базовые поверхности, полки, торцевые поверхности и другие. Режимы резания при протягивании плоских и фасонных линейчатых поверхностей деталей из жаропрочных и титановых сплавов приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2

### Режимы резания при протягивании

Режимы резания и геометрические параметры инструмента	Обрабатываемые материалы	
	жаропрочные сплавы	титановые сплавы
Подъем на зуб $S_z$ , мм:		
черновое протягивание	0,04–0,07	0,04–0,08
чистовое протягивание	0,01–0,025	0,02–0,03
Скорость резания $v$ , м/мин	1–5	2–7
Передний угол $\gamma$ , град	12–15	5–8
Задний угол $\alpha$ , град	3–4	3–4

При протягивании в качестве СОТС применяют эмульсии, сульфозфрезол, смеси масла. При обработке твердосплавными протяжками жаропрочных сталей подъемы на зуб для предварительных протяжек могут быть увеличены до 0,1 мм. Величина припуска при наружном протягивании плоских поверхностей при черновой обработке принимается 2–6 мм.

Скорости резания при работе протяжками из быстрорежущей стали 15–30 м/мин, при работе твердосплавными протяжками в пределах 40–60 м/мин. В последнее время установлены возможности обработки труднообрабатываемых материалов на скорости 100 м/мин. Применение высоких скоростей резания при протягивании труднообрабатываемых материалов позволяет преодолеть зону неблагоприятных скоростей (15–20 м/мин) наростообразования и уменьшить шероховатость с  $R_a = 5$  мкм до  $R_a = 0,63$  мкм.

Протягивание плоских и фасонных линейчатых поверхностей обеспечивает точность 11–10-го квалитетов и шероховатость поверхности  $R_a = 3,2$ –1,6 мкм (черновое протягивание). При чистовой обработке точность 9–6-го квалитетов,  $R_a = 1,6$ –0,4 мкм.

Машинное время при протягивании определяют по формуле

$$T_{\text{маш}} = \frac{L_p \cdot i \cdot K_x}{1000 \cdot v}, \text{ мин.}$$

где  $L_p$  — длина рабочего хода протяжки;  $i$  — количество протяжек в комплекте;  $K_x$  — коэффициент, учитывающий обратный ход протяжки ( $K_x = 1,2$ –1,5);  $v$  — скорость резания.

#### 5.4. ОБРАБОТКА ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ШЛИФОВАНИЕМ

Шлифование является одним из основных методов обработки плоских поверхностей деталей для достижения требуемой точности и шероховатости обрабатываемой поверхности. Шлифованием могут обрабатываться плоские и фасонные линейчатые поверхности, например элементы замковых соединений лопаток турбины и компрессора. Шлифование плоских поверхностей осуществляется на плоскошлифовальных станках с продольным или круглым столом, специализированных станках обычного использования и станках с ЧПУ. Шлифование плоских поверхностей может быть осуществлено двумя способами: периферией круга и торцем круга. Шлифование периферией

круга является более универсальным видом обработки плоскостей, в том числе и с жесткими требованиями по плоскостности. Шлифование торцем круга — высокопроизводительный процесс, применяемый при обработке плоских поверхностей заготовок с большими съемами материала. Наиболее эффективно торцевое шлифование абразивными сегментами. При работе абразивными сегментами обеспечиваются наиболее благоприятные условия процесса шлифования. Прерывистая работа сегментного круга способствует уменьшению выделяемого тепла, улучшению отвода стружки.

Глубинное шлифование плоских и фасонных линейчатых поверхностей выполняется на плоскошлифовальных и специализированных станках с ЧПУ. Схема шлифования плоских поверхностей лопаток турбины приведена на рисунке 5.10, где шлифование входных торцев выполняется глубинным шлифованием с поперечной подачей. При этой схеме обработки предварительное и окончательное шлифование производится за одну установку. При предварительном проходе снимается весь основной припуск 1,5–3 мм. Второй проход является зачищающим, глубина шлифования составляет 0,03–0,06 мм. При такой схеме шлифования одновременно могут обрабатываться две плоские поверхности.

Шлифование деталей из литейных и деформируемых жаропрочных сплавов ЖС6К, ЖС6У, ХН77ТЮР, ХН77ВМТЮ выполняется абразивными кругами из электрокорунда белого характеристики 24А40ПСМ16...7К5 на следующих режимах: скорость круга  $v_k = 25\text{--}28$  м/с; скорость детали  $v_d = 14\text{--}19$  м/мин; поперечная подача  $S_{\Pi} = 0,7\text{--}1$  мм/дв. х.; глубина шлифования  $t$  до 3–5 мм за один проход, СОТС — эмульсия.

При шлифовании плоских поверхностей обеспечивается точность 9–6-го квалитетов, шероховатость поверхности  $Ra = 1,6\text{--}0,1$  мкм.

Машинное время при шлифовании на станках с продольным ходом стола периферией круга определяется по формуле

$$T_{\text{маш}} = \frac{(B + 2x)h}{S_{\Pi} \cdot S_{\text{в}} \cdot n_{\text{дв.х}}} \cdot \frac{1}{m} \cdot K, \text{ мин},$$

где  $B$  — ширина шлифуемой поверхности, мм;  $x$  — боковой сход круга, мм;  $h$  — припуск на сторону, мм;  $S_{\Pi}$  — поперечная подача, мм;  $S_{\text{в}}$  — вертикальная подача круга на один проход, мм;  $n_{\text{дв.х}}$  — число двойных ходов стола в мин;

$K$  — коэффициент, учитывающий точность шлифования (имеет значения 1,1–1,8);  $m$  — количество деталей, одновременно устанавливаемых на столе.

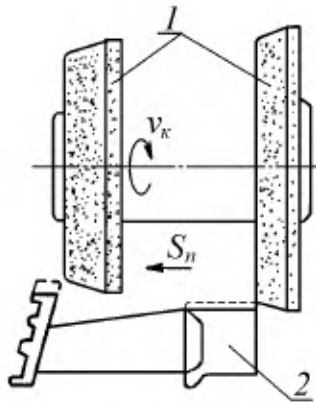


Рис. 5.10

*Схема двухкругового глубинного шлифования плоских поверхностей хвостовика и бандажной полки лопаток турбины методом поперечной подачи:*

1 — шлифовальные круги; 2 — обрабатываемая заготовка.

## 5.5. ОБРАБОТКА ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИТИРКОЙ, ПОЛИРОВАНИЕМ И ШАБРЕНИЕМ

**Притирка** является процессом отделочной обработки, обеспечивающим съем малого припуска посредством мелкозернистых порошков в среде смазки, нанесенной на поверхность притира, и удалением припуска с обрабатываемой поверхности в результате воздействия абразивных и алмазных зерен при перемещении детали по поверхности притира с протеканием химических и физико-химических процессов.

Притирка применяется при обработке плоских поверхностей, например, деталей дозирующего пакета форсунок: распылителей, сопел, завихрителей. Притиркой обрабатывают и некоторые корпусные детали, например, коробки и крышки корпусов приводов, имеющие плоскости разъема, требующие плоского герметичного прилегания.

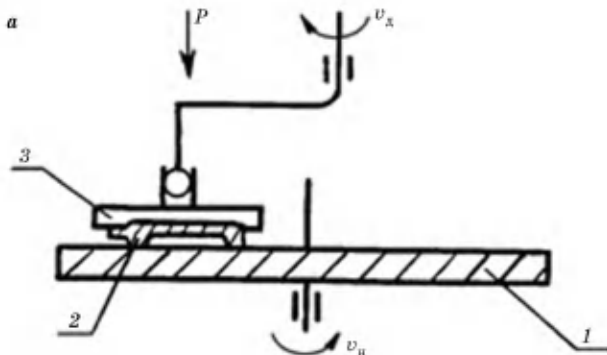
Для притирки применяются абразивные и алмазные порошки и пасты. Притиры изготавливаются из чугуна, бронзы и других материалов. Для притирки деталей из

труднообрабатываемых материалов наиболее распространенными материалами для притиров являются серый чугун с ферритной, перлитной и перлитно-ферритной структурой марок СЧ15, СЧ18, СЧ25 твердостью НВ 120–200.

Эффективной является обработка притирами с жестко закрепленными алмазными зернами синтетических алмазов. Основными преимуществами обработки алмазными притирами по сравнению с притиркой пастами являются стабильность технологических размеров, высокая износостойкость притира, отсутствие шаржирования обрабатываемых поверхностей. Алмазные притиры с жестко закрепленными алмазными зернами могут быть изготовлены на металлических и гальванических связках, а также из алмазного проката.

Для повышения производительности притирки вместо металлических притиров могут применяться абразивные круги. Суспензии и мелкозернистые круги для доводки изготавливают из микропорошков следующих материалов: электрокорунда белого (23А, 24А, 25А), хромистого (33А, 34А), титанистого (37А), монокорунда (43А, 44А, 45А), карбида кремния зеленого (63С, 64С), карбида бора (КБ) и эльбора (ЛВМ, ЛПМ) зернистостью М40–М1; алмазных микропорошков (из синтетических алмазов) марок АСМ и АСН зернистостью 60:40–1:0.

Принципиальная схема притирки плоских поверхностей деталей дозирующего пакета форсунок показана на рисунке 5.11. Одностороннюю и двухстороннюю обработку плоских деталей осуществляют с помощью плоского притира в виде диска (рис. 5.11а) или трубчатого притира (рис. 5.11б).



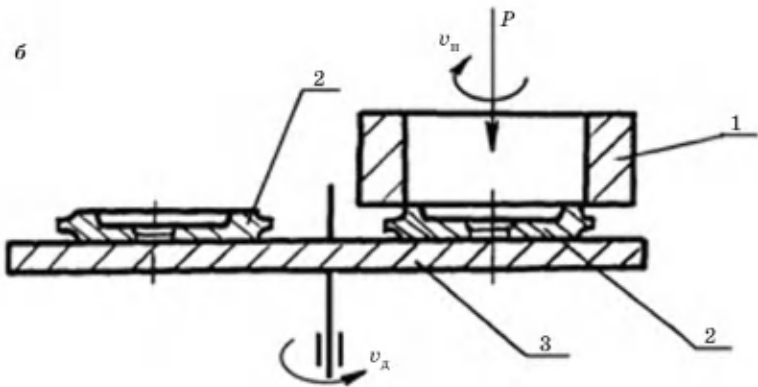


Рис. 5.11

Принципиальные схемы притирки плоских поверхностей деталей дозирующего пакета форсунки:

1 — притир; 2 — обрабатываемая заготовка; 3 — стол (устройство для установки заготовки).

Применяются ручная и механическая притирки. Механическая притирка плоских наружных поверхностей выполняется на однодисковых и двухдисковых с неподвижными и подвижными притирами притирочных станках. Производительность притирки повышается с увеличением скорости движения заготовки относительно притира при принудительном вращении поводкового устройства. Механическая притирка повышает производительность обработки в 2–6 раз по сравнению с ручной, обеспечивая стабильное получение выходных характеристик деталей.

В таблице 5.3 приведены точностные характеристики и шероховатость плоских поверхностей после притирки.

Таблица 5.3

#### Характеристика поверхностей, обработанных притиркой

Вид обработки	Припуск на притирку, мм	Точность обработки, мкм	Шероховатость поверхности Ra, мкм
Предварительная	0,02–0,05	3–5	0,63–0,16
Получистовая	0,005–0,015	1–2	0,16–0,08
Чистовая	0,002–0,005	0,5–1	0,08–0,02
Тонкая	0,0002–0,002	0,1–0,5	0,1–0,025

**Полирование** — процесс отделочной обработки поверхностей деталей, обеспечивающий минимальную шероховатость поверхности, придавая ей зеркальный блеск. Полированию подвергают ответственные части деталей, например полотно дисков турбины и компрессора. Оно получило распространение как декоративная и антикоррозионная обработка, а также способ уменьшения трения и повышения усталостной прочности. Полирование выполняется эластичными (войлочными, фетровыми, поропластовыми) кругами, абразивными лентами, абразивно-жидкостной суспензией.

В зависимости от требуемой шероховатости поверхности, выбирают вид абразивного, алмазного материалов и их зернистость. Для полирования применяются пасты и смазочные композиции, в них добавляются активные кислоты для улучшения полирующих свойств.

При полировании деталей, например дисков турбины, эффективно использование порошков и паст из карбида титана, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Применение таких порошков и паст при полировании обеспечивает снижение шероховатости поверхности, повышение производительности и срока службы в 1,5 раза по сравнению с деталями, обработанными абразивными и алмазными пастами.

Припуск на обработку при полировании кругами составляет 0,005–0,015 мм. Оно выполняется на скоростях до 50 м/с. При ручном полировании окружная скорость круга до 30 м/с. Полирование может обеспечить шероховатость поверхности  $Ra = 0,63-0,02$  мкм.

**Шабрение** — процесс чистовой обработки плоских поверхностей, выполняемый вручную или механическим способом с применением инструмента — шабера. Шабрение вручную — малопроизводительный процесс, требует больших затрат времени и высокой квалификации рабочего. Механический способ шабрения реализуют на специальных станках. При обработке шабер совершает возвратно-поступательное движение.

Сущность шабрения состоит в соскабливании шабером слоев металла (толщиной около 0,005 мм) для получения ровной поверхности, после ее чистовой обработки. Точность шабрения определяется по числу пятен на площади поверхности 25×25 мм (при проверке контрольной плитой с нанесением на нее краски-синьки), чем больше пятен, тем точнее обработка. Шабрение называют чистовым, если число пятен 6–10, а шероховатость поверхности  $Ra \leq 1,25$  мкм, и тонким, если число пятен более 22 и  $Ra \leq 0,08$  мкм.

Шабрение применяется для деталей, где необходимо герметичное прилегание плоских поверхностей (фланцы, торцы и т. д.). Шабрение может применяться также для обеспечения герметичного соединения поверхностей корпусных деталей.

### ОБРАБОТКА ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В производстве применяется значительная номенклатура деталей с коническими, сферическими, винтовыми, гиперболическими и другими поверхностями. Формирование указанных поверхностей на станках может быть представлено как результат согласованного движения двух производящих линий: образующей и направляющей. При обработке на станке эти линии и их взаимное перемещение обеспечиваются движениями заготовки и инструмента. Результатом согласованного перемещения образующей и направляющей является форма поверхности детали. Согласованные движения, обеспечивающие получение образующей и направляющей, и их взаимное перемещение называют формообразующими. Они могут быть простыми и сложными. Сложные движения формообразования получают в результате сложения двух и более простых движений.

В зависимости от профиля режущей кромки и вида инструмента производящая линия может быть получена одним из четырех методов: копирования, обката, следа и касания.

При обработке методом копирования производящая линия 2 получается как копия профиля режущей кромки 1 инструмента (рис. 6.1а). Метод копирования целесообразно применять, когда профиль режущей кромки близок к форме производящей линии.

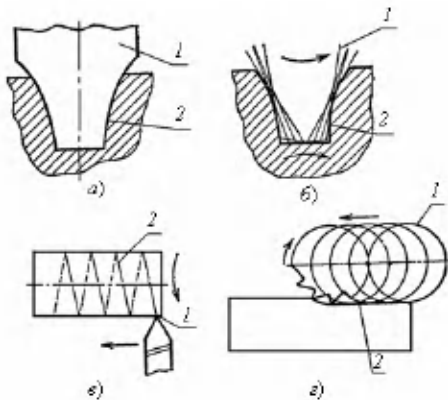


Рис. 6.1

Методы образования производящих линий

При обработке **методом обката** (рис. 6.1б) производящая линия 2 получается как огибающая нескольких последовательных положений режущей кромки 1 при ее обкатывании по получаемой производящей линии.

При обработке **методом следа** (рис. 6.1в) производящая линия 2 получается в результате движения режущей точки вдоль заданной траектории. Производящая в этом случае является следом от движения режущей точки 1 (режущей кромки инструмента).

При обработке **методом касания** (рис. 6.1г) производящая линия 2 образуется как огибающая совокупность траекторий движения режущей точки. Эти траектории обычно имеют форму прямой линии или окружности 1.

Технология обработки деталей с фасонными поверхностями, в том числе таких, к которым относятся лопатки турбины и компрессора, крыльчатки, цельнолитые роторы турбин, шнеки насосов и другие, должна учитывать технологичность конструктивных элементов, вид производства и применение эффективных методов обработки и оборудования, обеспечивающих необходимое формообразование деталей, точность и производительность.

## 6.1. ОБРАБОТКА КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

К деталям с элементами конической формы относятся сопла дозирующего пакета форсунок, конические зубчатые колеса, коробки приводов, диски компрессора. Конические поверхности образуются перемещением (вращением) прямой линии, проходящей через некоторую неподвижную точку, по направляющей линии. Широкое распространение в деталях конической формы имеют прямые круговые конусы. Угол  $2\alpha$  между образующими конуса в осевом сечении называют углом конуса. Конусность  $K$  определяет отношение разности диаметров большого  $D$  и малого  $d$  оснований конуса к его длине  $l$ :

$$K = (D - d) / l = 2 \operatorname{tg} \alpha.$$

Конические поверхности в зависимости от требований точности и шероховатости поверхности чаще всего обрабатывают на токарных или шлифовальных станках.

Обработка **коротких конических поверхностей** может выполняться с использованием широких резцов, у которых главный угол в плане равен половине угла при вершине конической поверхности (рис. 6.2а).

Обработка конических поверхностей на токарных станках связана с изменением положения его узлов или

кинематических связей между ними. При обработке точных конических поверхностей верхний суппорт поворачивается вокруг вертикальной оси на половину угла конуса. Движение подачи вдоль образующей конуса сообщается салазкам верхнего суппорта (рис. 6.2б).

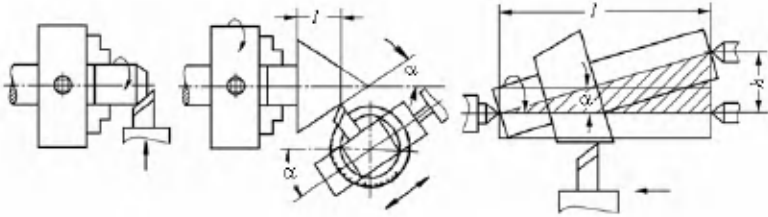


Рис. 6.2

*Схемы обработки конических поверхностей на токарном станке*

Обработку **длинных конических поверхностей** деталей с углом  $\alpha$  не свыше  $11^\circ$ , установленных в центрах (рис. 6.2в), выполняют путем смещения корпуса задней бабки на расстояние  $h$  в поперечном направлении. Смещение определяется зависимостью  $h = l \cdot \sin \alpha$ , где  $l$  — расстояние между центрами.

Обработку длинных конических поверхностей с точными углами конуса ( $\alpha$  до  $10^\circ$ ) выполняют с использованием конусной линейки 1, закрепляемой на станине станка (рис. 6.2г). Перед обработкой ходовой винт поперечного движения подачи отключается от салазок 2. Салазки связываются тягой с конусной линейкой, которая поворачивается на угол  $\alpha$ . При включении продольного движения подачи суппорта салазки получают одновременное продольное и поперечное перемещение, при этом резец будет двигаться под углом  $\alpha$ , равным углу поворота копировальной линейки. На детали 3 будет получен конус с углом  $2\alpha$ .

Конические поверхности могут обрабатываться на многолезцовых станках полуавтоматах и автоматах. Для автоматической обработки конических поверхностей деталей, например дисков компрессора, зубчатых колес и других деталей, применяются гидравлические суппорты, обеспечивающие высокую точность обработки (до  $0,05$  мм) и производительность.

Для обработки конических поверхностей применяются станки с ЧПУ. В этом случае обработка осуществляется при сочетании продольного и поперечного движения подачи, задаваемой программой. Применение станков с ЧПУ для обработки конических и других поверхностей деталей

за одну установку, например дисков компрессора, обеспечивает повышение производительности на 30 и более процентов с обеспечением стабильного качества.

Для повышения точности и необходимой шероховатости конических поверхностей применяется круглое наружное и внутреннее шлифование. В этом случае применяются, круглошлифовальные, внутришлифовальные и универсальные станки.

Обработка конических поверхностей большой длины с малой конусностью (до  $12-14^\circ$ ) производится поворотом верхней части стола  $l$  на половину угла конусности. Обработка выполняется осциллирующим методом (рис. 6.3а).

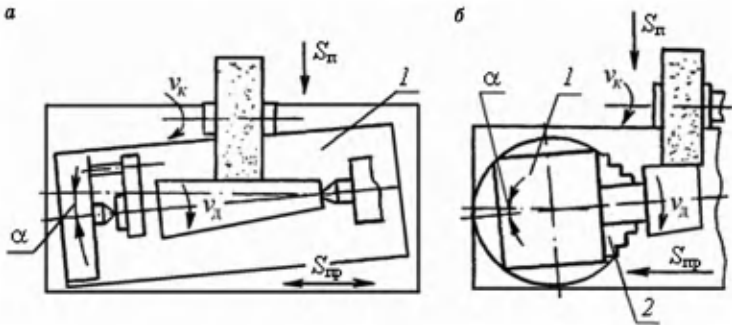


Рис. 6.3

*Схемы обработки наружных конических поверхностей на шлифовальных станках*

При длине образующей конуса больше, чем ширина (высота) круга, обработка выполняется по схеме, показанной на рисунке 6.3б. Передняя бабка  $1$  поворачивается относительно продольной оси стола на угол  $\alpha$  и обработка осуществляется осциллирующим шлифованием. Заготовка, закрепленная в патроне  $2$  передней бабки, совершает круговое движение вокруг своей оси, а стол совершает возвратно-поступательное движение. Поперечное движение подачи  $S_{\text{п}}$  передается шпинделю во время вывода шлифовального круга из зоны резания на каждый ход стола или двойной ход.

Обработка **внутренних конических поверхностей** может выполняться с продольным движением подачи и поворотом бабки с заготовкой на угол  $\alpha$ . Этим методом выполняется обработка конических отверстий до упора и на проход.

## 6.2. ОБРАБОТКА СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Сферические поверхности представляют разновидность фасонных поверхностей и делятся на наружные (выпуклые) и внутренние (вогнутые) поверхности.

Обработка сферических поверхностей выполняется обтачиванием фасонными резцами, фрезерованием и зенкерованием сферическими лезвийными инструментами, шлифованием профилированными абразивными кругами, электроэрозионной и электрохимической обработкой с применением электродов со сферической рабочей частью. Сферы большого диаметра можно получать обычными резцами с помощью устройств, устанавливаемых на суппорте токарного станка так, чтобы ось поворота резцедержателя проходила через центр обрабатываемой сферы.

В производстве изготавливаются детали трубопроводов, насосов, плунжерных соединений и других узлов, имеющих элементы со сферическими поверхностями, к которым предъявляются особые требования к качеству рабочих поверхностей. Такие поверхности могут быть получены только **доводкой**, выполняемой после шлифования.

Доводка сферических поверхностей может выполняться по *способу свободного притира* (рис. 6.4а), при котором соприкосновение рабочих поверхностей инструмента и заготовки происходит по площадкам, имеющим контур конечных размеров. Относительное движение инструмента и заготовки складывается не более чем из трех простых движений, одно из которых обязательно вращательное, и ось вращения является нормалью к притирающимся поверхностям. Предельные отклонения формы после доводки до 0,5 мкм. Этот способ доводки зависит от многих технологических факторов, малопроизводителен и требует высокой квалификации оператора.

Применяется доводка сферических поверхностей *способом ориентированного притира* (рис. 6.4б). При доводке происходит профилирование контактирующих поверхностей детали и инструмента (притира) с одновременным обеспечением точности положения обрабатываемой поверхности относительно баз детали. Точность координирования определяют схема и точность относительного расположения детали и инструмента. При пересечении осей их вращения под углом  $\alpha$  получается сферическая поверхность, центр которой находится в точке пересечения осей. Способ ориентированного притира наиболее устойчив во времени, наиболее производителен, не требует высокой квалификации оператора, легко автоматизируется.

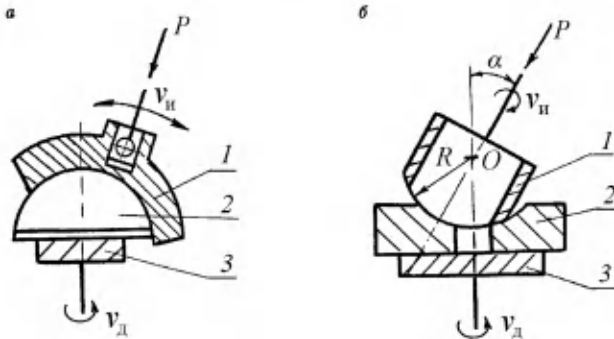


Рис. 6.4

Принципиальная схема доводки сферических поверхностей:

1 — притир; 2 — обрабатываемая заготовка; 3 — стол (устройство для установки заготовки).

Для доводки сферических поверхностей применяется также способ *комбинированной обработки*, сочетающий признаки свободного и ориентированного притирова.

При обработке сферических поверхностей скорости вращения инструмента  $v_n$  и детали  $v_d$  выбирают из условия достижения их оптимального сочетания. Отношение скоростей при доводке сферических поверхностей, когда  $\alpha$  меньше  $45^\circ$ ,  $v_n/v_d \approx \cos\alpha$ . Для наружных сферических обрабатываемых поверхностей угол  $\alpha$  близок к  $90^\circ$ . В этих случаях целесообразно доводку выполнять двумя инструментами при  $v_n/v_d \approx 1$ . Давление  $P$  выбирается в пределах 0,2–0,8 МПа в зависимости от материала детали и инструмента, заданной шероховатости и точности формы.

Для обработки сферических поверхностей применяются сферодоводочные станки, в которых оси вращения шпинделей, в которых устанавливаются заготовки и инструменты, должны пересекаться в точке, являющейся центром доведенной сферической поверхности. Применяются доводочные станки, скомпонованные на базе унифицированных головок, а также специализированные станки.

Для доводки сферических поверхностей в зависимости от материала детали применяются доводочные пасты из микропорошков синтетических алмазов, карбида титана, электрокорунда белого и др. В таблице 6.1 приведены зернистость и материалы доводочных паст и притиров.

Режимы доводки сферических поверхностей деталей из стали и алюминиевых сплавов приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.1

### Характеристика инструментальных материалов при доводке сферических поверхностей

Материал детали	Вид обработки	Зернистость микропорошка	Материал притира
Высококарбидные стали	предварительная	АСМ 20/14 АСМ 14/10	Перлитный чугун
	окончательная	АСМ 7/5 АСМ 5/3	
Низкокарбидные стали	предварительная	24А М28 24А М14	Перлитный чугун
	окончательная	24А М10 24А М5	
Алюминиевые сплавы	предварительная	24А М14 24А М10	Медь М0, М1
	окончательная	24А М7 24А М5	

Таблица 6.2

### Режимы доводки сферических поверхностей

Материал детали	Зернистость пасты	Материал притира	Режимы обработки	
			Скорость, м/с	Давление, МПа
Высококарбидные стали	АСМ 20/14	Перлитный чугун	0,4	0,2
	АСМ 14/10			0,3
	АСМ 7/5			0,6
	АСМ 5/3			0,6
Низкокарбидные стали	24А М28	Перлитный чугун	0,4	0,3
	24А М14			0,6
	24А М10			0,6
	24А М5			0,6
Алюминиевые сплавы	24А М14	Медь	0,2	0,3
	24А М7	М0,М1	0,1	0,6

## 6.3. ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ

В единичном производстве поверхности вращения можно обрабатывать путем *точения по разметке*, выполненной на металлической пластинке или бумаге, которые закрепляют на станке. Комбинацией продольных и поперечных подач с

помощью чертилки 1, воспроизводящей профиль 2, обрабатывают заготовку 3 (рис. 6.5).

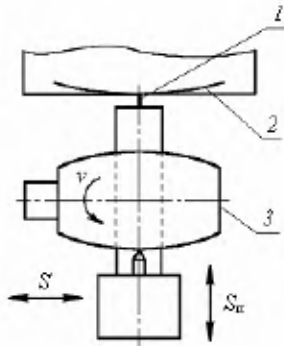


Рис. 6.5

*Схема обработки фасонной поверхности по разметке*

Фасонную поверхность вращения (рис. 6.6) можно обрабатывать методом обкатки резцом 1, имеющим фасонную поверхность, который вращается вокруг оси 3 на суппорте 2 и перемещается по направляющим параллельно оси 4 обрабатываемой заготовки. Обработка выполняется при соответствующих скорости  $v$  продольного суппорта, угловой скорости вращения резца  $\omega_2$  и угловой скорости вращения заготовки  $\omega_1$ . Угловая скорость  $\omega_2$  может быть постоянной или переменной в зависимости от конфигурации и припусков на обработку. По такой схеме точения можно обрабатывать, например, элементы плунжеров механизма автоматического регулирования.

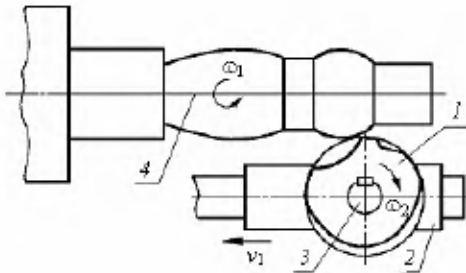


Рис. 6.6

*Схема обработки фасонной поверхности вращения методом обката резца*

Обработка поверхностей вращения *методом копирования* может выполняться с применением шаблонов, образцовых деталей и неподвижных копиров и может быть осуществлена на токарных станках с применением гидрокопировальных суппортов.

Для обработки фасонных поверхностей вращения применяются и специальные гидрокопировальные станки. На таких станках выполняется обработка наружных и внутренних фасонных поверхностей. В них применяются следящие системы, основными элементами которых являются задающие устройства (копиры, графические шаблоны, модели), следящие устройства (пальцы, ролики, электрические и фотоэлектрические датчики), усилительные устройства и вспомогательные органы, приводящие в движение приводы задающей и следящей подач. Наиболее широко применяются следящие системы двух типов: с электрическим силовым приводом исполнительного механизма и электрической связью между следящей головкой и исполнительным органом и с гидравлическим приводом и гидравлической связью между следящей головкой и исполнительным органом.

Обработка мелких и средних деталей трубопроводов и арматуры, например ниппелей и штуцеров, выполняется на токарных и токарно-револьверных станках, в том числе и автоматах. Для обработки могут использоваться фасонные и обычные резцы. Схема обработки фасонной поверхности ниппеля трубопровода из прутка с наружной фасонной поверхностью вращения на одношпиндельном продольно-фасонном автомате приведена на рисунке 6.7.

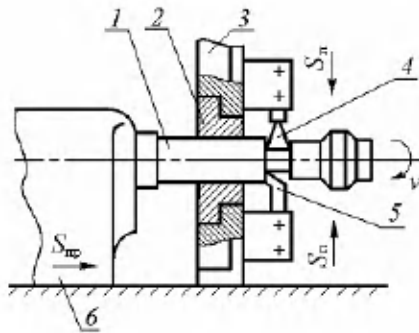


Рис. 6.7

Схема обработки фасонной поверхности вращения на токарном полуавтомате

Калиброванный пруток *1* закрепляется в цанговом патроне полуавтомата и пропускается через люнетную втулку *2* стойки *3*. Шпиндельная бабка *6* или шпиндель имеет продольную подачу. В суппорте закрепляются проходной *5* и отрезной *4* резцы. Скоростями перемещения передней бабки (прутка) и поперечных суппортов, а также моментами включения и выключения подач управляют кулачки распределительного вала полуавтомата. Сочетание продольной подачи прутка с поперечной подачей резцов позволяет обтачивать наружные фасонные, конические и цилиндрические поверхности.

Для обработки наружных поверхностей вращения применяются фасонные резцы: призматические, круглые, пластинчатые. Обычно ширина фасонных призматических и круглых резцов не превышает 60 мм. Увеличение ширины вызывает вибрации технологической системы. Для снижения вибрации применяются специальные пружинные державки.

Резцы имеют профиль режущей кромки, соответствующий профилю поверхности обрабатываемой детали. Обработка поверхностей вращения на станках токарной труппы фасонными резцами выполняется на несколько заниженных режимах (подача  $S = 0,01-0,08$  мм/об, скорость резания  $v = 20-40$  м/мин), но, несмотря на это, обеспечивается высокая производительность благодаря малому пути резания.

Обработка внутренних поверхностей вращения может осуществляться фасонными перовыми сверлами и зенкерами или фасонными резцами. Внутренние поверхности вращения деталей средних и больших размеров могут обрабатываться по копиру.

#### **6.4. ОБРАБОТКА ЛИНЕЙЧАТЫХ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Детали, содержащие элементы с линейчатыми фасонными поверхностями, относятся к классам: валы, диски, корпусные и плоскостные детали, лопатки и другие. Наибольшее распространение при обработке линейчатых фасонных поверхностей получило фрезерование, протягивание, шлифование и при необходимости отделочные методы обработки. В некоторых случаях, в единичном и опытном производствах, для обработки линейчатых фасонных поверхностей применяется строгание. Обработка линейчатых фасонных поверхностей типа плоских кулачков, дисков, фланцев и др. может выполняться точением

на токарно-копировальных станках, снабженных копировальным устройством. Наружные и внутренние линейчатые поверхности деталей из труднообрабатываемых материалов могут обрабатываться электроэрозионным и лазерными методами.

Обработка линейчатых фасонных поверхностей фрезерованием в зависимости от типа производства может выполняться по разметке, фасонным инструментом, с помощью копировальных устройств, на копировальных станках и станках с ЧПУ.

*Обработка по разметке* является менее производительной и точной. Она применяется при изготовлении небольшого числа деталей. Обработка производится чаще всего концевыми фрезами, обычно на вертикально-фрезерных станках при двух одновременно действующих ручных подачах. Значения подач выбираются с учетом обеспечения заданной формы обрабатываемой поверхности. Обработка выполняется методом встречного фрезерования во избежание поломки фрезы. Использование круглого поворотного стола позволяет выполнять обработку наружных и внутренних фасонных поверхностей.

Фрезерование линейчатых фасонных поверхностей, например эвольвентных и прямоугольных шлиц валов турбины, с использованием фасонных дисковых фрез может выполняться на горизонтально-фрезерных станках. Наиболее производительной является обработка шлиц на горизонтальных шлицефрезерных станках.

Более совершенным методом является фрезерование *методом обкатки*. Окончательная обработка шлицев по методу обкатки производится чистовым фрезерованием червячными шлицевыми фрезами высокого класса точности, что позволяет в некоторых случаях исключить операцию шлифования.

Замкнутые и незамкнутые фасонные линейчатые поверхности типа дисков, копиров, кулачков, фланцев корпусных деталей, например коробок приводов, обрабатываются фрезерованием *по контуру* или *на станках с ЧПУ*.

В серийном и массовом производстве детали с линейчатыми фасонными поверхностями обрабатывают протягиванием. При правильно выбранной схеме протягивания линейчатых фасонных поверхностей у заготовок сплошного профиля весь припуск снимается за один рабочий ход. К таким деталям относятся диски и лопатки турбин, конфигурация поверхностей замковых соединений которых сложна. Высокая производительность процесса изготовления фасонных

поверхностей протягиванием сочетается с высокой точностью обработки (9–6-го квалитетов) и шероховатостью поверхности  $Ra = 1,6\text{--}0,4$  мкм.

Машинное время при протягивании определяется по формуле

$$T_{\text{маш}} = \frac{L_{\text{пр}} + l_q}{1000} \left( \frac{1}{v_p} + \frac{1}{v_{\text{вх}}} \right), \text{ мин,}$$

где  $L_{\text{пр}}$  — длина рабочей части протяжки, мм;  $l_q$  — длина протягиваемой поверхности, мм;  $v_p$  — скорость резания, м/мин;  $v_{\text{вх}}$  — скорость вспомогательного хода, м/мин.

Шлифование фасонных поверхностей может осуществляться профильными абразивными кругами на плоскошлифовальных, круглошлифовальных, внутришлифовальных и специализированных станках. Шлифование эвольвентных и прямоугольных шлицев чаще всего выполняется профильными кругами, правка которых может осуществляться как периодически, так и непрерывно.

Шлифование элементов лопаток турбины, имеющих линейчатые фасонные поверхности, например входные торцы хвостовика, контактные поверхности бандажных полок, может осуществляться на плоскошлифовальных станках методом глубинного шлифования. Профилирование круга производится алмазным правящим роликом.

Точность шлифования фасонных линейчатых поверхностей соответствует 7–6-му квалитетам, а шероховатость поверхности  $Ra = 1,25\text{--}0,5$  мкм.

Машинное время шлифования определяется по формулам:

- с продольным движением подачи

$$T_{\text{маш}} = \frac{L_{\text{ст}} + z_i}{n \cdot S_{\text{пр}} \cdot S_{\text{поп}}} \cdot k, \text{ мин;}$$

- врезанием

$$T_{\text{маш}} = \frac{z_i}{n \cdot S_{\text{поп}}} \cdot k, \text{ мин;}$$

- при плоском шлифовании периферией круга

$$T_{\text{маш}} = \frac{B \cdot z_i}{S_{\text{поп}} \cdot n_{\text{дв.х}} \cdot S_{\text{в}}} \cdot k, \text{ мин,}$$

где  $L_{\text{ст}}$  — длина хода стола станка, мм;  $z_i$  — припуск на сторону обрабатываемой поверхности, мм;  $n$  — частота вращения шпинделя,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $S_{\text{пр}}$  — продольная подача,

мм;  $S_{\text{поп}}$  — поперечная подача круга за один рабочий ход, мм/раб. ход;  $B$  — ширина круга, мм;  $n_{\text{дв.х}}$  — число двойных ходов в мин;  $S_{\text{в}}$  — вертикальная подача, мм/об;  $k$  — поправочный коэффициент на выхаживание (принимается равным 1,1–1,7 в зависимости от точности размеров).

Обработка фасонных линейчатых поверхностей может выполняться строганием фасонным инструментом. Более высокопроизводительным процессом образования фасонных поверхностей, например шлицев, является *контурное шлицестрогание*, обеспечивающее шероховатость обработанной поверхности  $Ra = 2,5\text{--}1$  мкм.

Детали из конструкционных, жаропрочных, композиционных материалов, имеющие линейчатые фасонные поверхности могут изготавливаться **электрофизическими методами**: электроэрозионная, лазерная и другие виды обработки.

*Электроэрозионная обработка* непрофилированным электродом-инструментом (проволока диаметром 0,05–0,3 мм) позволяет вырезать сложные контурные детали, обычно по двум координатам. Проволока (электрод-инструмент) при обработке получает непрерывное движение посредством роликового механизма. Обрабатываемая заготовка получает поперечную и продольную подачи или движется по криволинейной траектории. Электроэрозионная обработка на чистовых режимах обеспечивает точность в пределах 0,01–0,05 мм.

*Лазерная обработка* фасонных линейчатых поверхностей деталей из указанных материалов может осуществляться  $\text{CO}_2$ -лазером непрерывного действия.

Электроэрозионная и лазерная обработка деталей с фасонными линейчатыми поверхностями выполняется в автоматическом режиме на электроэрозионных станках и лазерных технологических комплексах с ЧПУ.

## 6.5. ОБРАБОТКА СЛОЖНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Детали со сложными пространственными поверхностями имеются в турбинах, компрессорах, турбонасосных агрегатах, насосах и других узлах машин. К ним относятся: цельнолитые роторы турбин с лопатками, колеса турбины, крыльчатки осевых и центробежных компрессоров и вентиляторов, лопатки турбины и компрессора.

Для обработки сложных поверхностей деталей применяются следующие методы обработки: фрезерование, абразивное и алмазное шлифование кругами и лентами, электрохимическая обработка, полирование.

Обработка сложных поверхностей выполняется:

- копированием с использованием объемных копиров, графических копиров с видами отдельных сечений профиля и др.;
- кинематической настройкой при помощи механизмов-построителей, имеющих конечное звено, воздействующее на режущий инструмент или копировальный палец, формируя необходимую поверхность;
- обкатом, заключающимся в том, что форма образуемой производящей линии возникает в виде огибающей ряда последовательных положений, занимаемых режущей кромкой инструмента при обкатывании ею без скольжения образующей линии;
- применением систем программного управления.

Фрезерование лопаток турбины и компрессора может выполняться на копировально-фрезерных станках. При обработке лопаток перемещение исполнительного механизма (с фрезой) согласовано с перемещением чувствительного элемента (щупа, наконечника, пальца, ролика) копировального устройства, контактирующего с профилем копира. Одним из основных элементов в устройствах копировально-фрезерного станка является следящий привод. По принципу действия следящие приводы подразделяются на гидравлические, механические, электрические и электрогидравлические.

На рисунке 6.8 показана принципиальная схема гидравлического следящего привода фрезерного станка. На столе 1 станка в приспособлении с базовыми поверхностями закреплены заготовка 2 и копир 8. С копиром в контакте находится ролик 10 следящего золотника 6, а заготовка 2 контактирует с фрезой 3. Фреза установлена на фрезерной бабке 4, которая связана со штоком цилиндра 5. При сообщении столу заданной продольной подачи от электродвигателя 9 плунжер золотника будет перемещаться вверх под действием копира или вниз под давлением пружины. При этом масло под давлением от насоса 7 будет поступать в полость цилиндра и фрезерная бабка будет перемещаться в ту же сторону и на ту же величину, как и плунжер золотника. Противоположная полость цилиндра соединяется со сливом. После фрезерования одной строки в конце продольного хода стола (в момент реверса) стол получает поперечную подачу на ширину строки и цикл фрезерования повторяется.

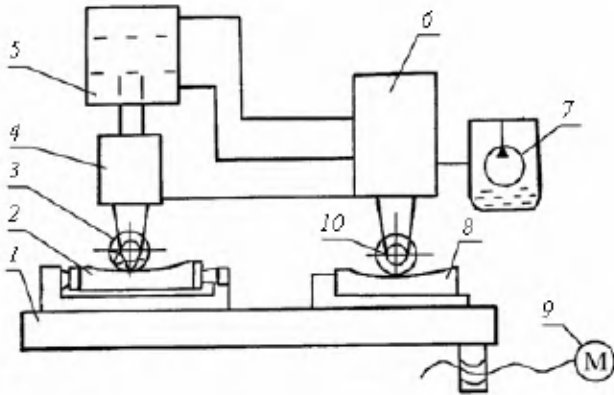


Рис. 6.8

*Принципиальная схема гидравлического следящего привода фрезерного станка*

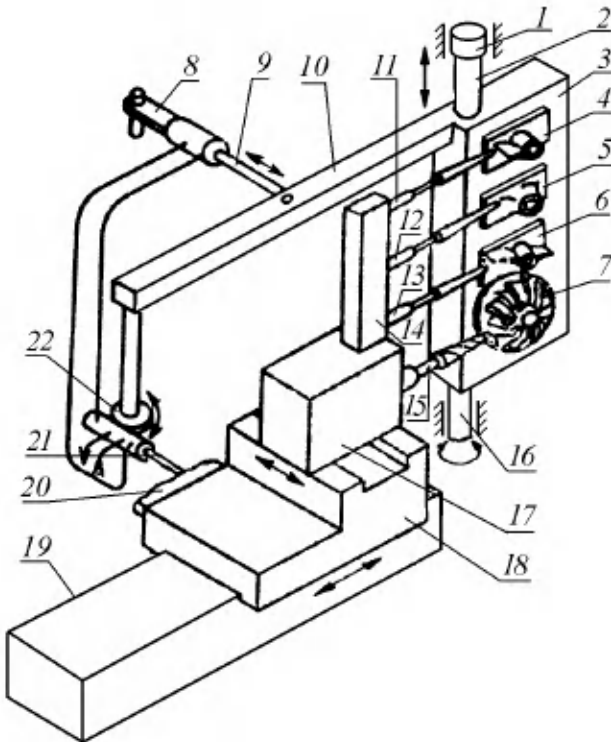
Сложные поверхности могут быть получены за счет четырех основных типов перемещений копира и обрабатываемой заготовки:

- поступательное перемещение копира и заготовки;
- вращательное перемещение копира и заготовки;
- поступательное перемещение копира, вращательное перемещение заготовки;
- вращательное перемещение копира, поступательное перемещение заготовки.

При обработке сложных поверхностей могут применяться четыре и более копиров. Применение четырех копиров обеспечивает до десяти типов перемещений копиров и обрабатываемой заготовки, например: поступательные перемещения четырех копиров и заготовки; вращательное перемещение четырех копиров и заготовки; поступательное перемещение копиров и вращательное перемещение заготовки и т. д. Вращательное перемещение трех копиров и заготовки, а также поступательное — четвертого копира можно использовать, например, для обработки крыльчатки. Станок для обработки фасонных поверхностей крыльчатки по четырем копирам изображен на рисунке 6.9.

В копировально-фрезерном станке, работающем по четырем копирам, по направляющим станины 19 перемещаются салазки 18 с закрепленным копиром 20. В поперечном направлении по салазкам 18 перемещается бабка 17 со встроенным в нее приводом для шпинделя с фрезой 15. В кронштейне 14 установлены три копировальных устройства 11, 12, 13.

На стол 3, находящийся на цапфах 16, установлены копиры 4, 5, 6 и обрабатываемая заготовка 7. Верхняя цапфа стола 3 представляет шток 2 гидроцилиндра 1. Под воздействием копира 6 копировальное устройство 13 управляет вертикальным перемещением стола 3. Копировальное устройство 11 через копир 4 сообщает вращательное перемещение заготовке 7. Поперечное перемещение бабки 17 обеспечивает копир 5 через копировальное устройство 12. Зубчатое колесо 22, закрепленное на оси рычага 10, находится в зацеплении со штоком золотника гидроцилиндра. Передний конец золотника является копировальным пальцем 21, контактирующим с копиром 20. Шток 9 поршня 8 соединен с рычагом 10. При перемещении салазок 18 копир 20 воздействует на палец 21, который через шток 9 гидроцилиндра обеспечивает поворот рычага 10 и одновременно стола 3 с заготовкой 7.



**Рис. 6.9**

Станок для обработки фасонных поверхностей крыльчатки по четырем копиям

Фрезерование боковых поверхностей лопаток объемной кривизны, например лопаток у крыльчаток, роторов и других деталей, может выполняться на станках, работающих в системе шести координат. При обработке таких поверхностей необходимо иметь перемещения: три поступательных вдоль осей III, IV, V системы прямоугольных координат и три вращательных I, II, VI относительно тех же осей координат. Для обработки крыльчатки наиболее удобна схема, в которой вращательные перемещения I и II выполняются самой крыльчаткой, а поступательные III, IV, V — крыльчаткой и фрезой (рис. 6.10).

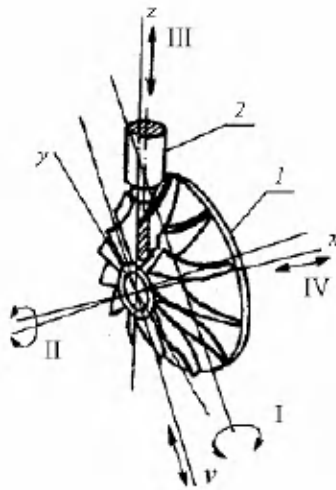


Рис. 6.10

Схема обработки боковых поверхностей лопаток крыльчатки:

1 — обрабатываемая заготовка; 2 — фреза.

Для фрезерования элементов лопаток применяются высокопроизводительные **многошпиндельные специализированные станки**. Фрезерование профиля спинки и корыта пера лопатки компрессора узкими поперечными строками производится на специальных восьми- и четырехшпиндельных копировально-фрезерных станках-полуавтоматах типа 8КФЛ и 4КФЛ. Одновременное фрезерование спинки и корыта может выполняться на специализированных станках типа КФП-3 и КА-65. Для изготовления лопаток с хвостовиком, расположенным под углом к оси пера, применяются специализированные станки. Для обработки

лопаток выпускаются копировально-фрезерные станки с ЧПУ моделей ГФ 2554, ГФ2005 и др. Оснащение станков с ЧПУ широкой номенклатурой инструментов значительно расширяет их технологические возможности и позволяет выполнять обработку большой номенклатуры деталей двигателей со сложными поверхностями.

Основным методом окончательного формообразования в авиадвигателестроении при обработке деталей сложной формы, например лопаток турбины и компрессора, крыльчаток, вентиляторов, является *ленточное шлифование*, которое выполняется перед полированием. Применение в копировальных системах и устройствах эластичного инструмента, какими являются абразивные и алмазные ленты, вызвано необходимостью поддержания постоянства и соответствия геометрических форм и размеров копиров и режущих элементов. Для шлифования лопаток ГТД из титановых и жаропрочных сплавов и сталей созданы ленточно-шлифовальные копировальные станки, работающие узкой или широкой лентой. Ленточное шлифование осуществляется на скоростях  $v_d = 25-50$  м/с в зависимости от условий и способа обработки, свойств обрабатываемого материала и других факторов.

Рабочая поверхность ленты в несколько раз превышает рабочую поверхность шлифовального круга, что обеспечивает лучшее рассеивание теплоты. В этом случае уменьшается вероятность появления прижогов, возможна автоматизация процесса чистовой обработки сложных поверхностей, повышается качество поверхностного слоя за счет формирования надлежащих условий обработки, осуществляющих формирование остаточных напряжений сжатия и т. д.

Шлифование профиля пера лопаток с длиной пера более 120 мм целесообразно выполнять *строчным методом* с использованием узкой абразивной ленты (рис. 6.11). Обработка выполняется на станках типа ШСЛ и ЛШ продольными строчками. Направление подачи перпендикулярно плоскости перемещения абразивной ленты. Продольная подача  $S_{пр}$  осуществляется за счет возвратно-поступательного перемещения стола станка. Дискретное вращение заготовки вокруг оси обеспечивает круговую подачу  $S_k$ . При обработке лопаток на станках типа ЛШ (ЛШ-1, ЛШ-2 и других) устанавливается контактное давление  $P_{пр}$  между обрабатываемой заготовкой и абразивной лентой, которое определяется весом стола и регулируется компенсирующими пружинами.

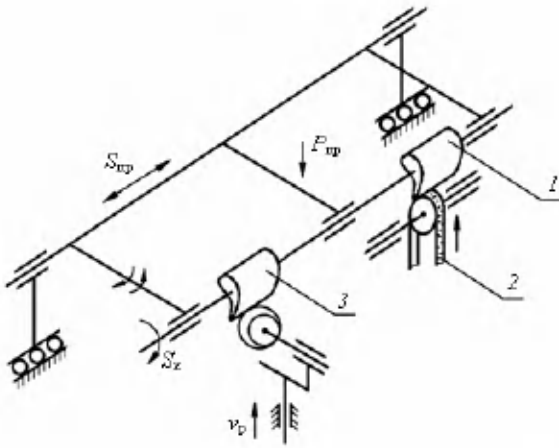


Рис. 6.11

Схема ленточного шлифования профиля пера лопаток компрессора:

1 — лопатка; 2 — абразивная лента; 3 — копир.

Обработка спинки и корыта лопаток может выполняться *методом обкатки*. Движения абразивной ленты или круга и заготовки взаимосвязаны между собой, при этом форма инструмента является сопряженной с формой обрабатываемой поверхности детали. Формообразование обрабатываемой детали происходит за счет движения обкатки (рис. 6.12).

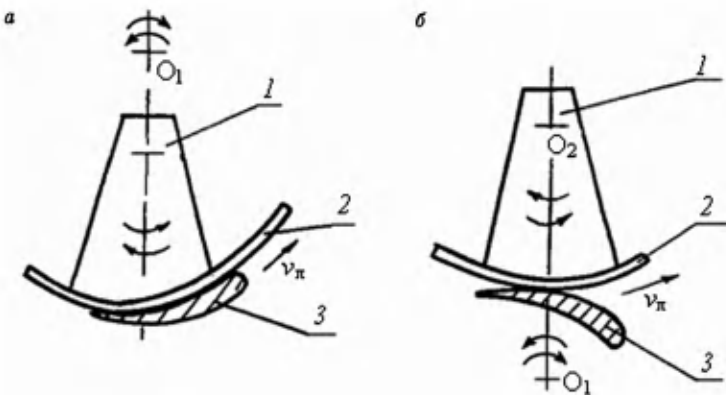


Рис. 6.12

Схема процесса ленточного шлифования корыта (а) и спинки (б) лопатки

Спинка и корыто обрабатываются отдельно. При шлифовании широкой лентой вся поверхность спинки или корыта обрабатывается полностью. При обработке копир 1 прижимает к обрабатываемой поверхности лопатки 3 абразивную ленту 2, перемещающуюся со скоростью 25–30 м/с. При шлифовании копир и лопатка совершают покачивающие движения относительно осей  $O_1$  и  $O_2$  периодически изменяя тем самым прижим ленты к различным участкам корыта или спинки лопатки. Бесконечная абразивная лента приводится в движение ведущим шкивом, который получает вращательное движение от электродвигателя. Этот метод отличается высокой производительностью и его применяют при обработке лопаток сравнительно небольших размеров, так как с увеличением ширины ленты повышается теплонапряженность процесса шлифования, что может отразиться на качестве поверхностного слоя лопаток и, кроме того, снижается точность обработки.

Шлифование методом обкатки может производиться на станках ХШ-185, ХШ-186, 3813Д с применением СОТС.

Эффективным методом повышения производительности ленточного шлифования при обработке деталей из титановых и жаропрочных сплавов и сталей является *обработка с применением бесконечных абразивных лент* с прерывистой поверхностью, которые имеют в 3–4 раза большую стойкость по сравнению с обычными лентами и обеспечивают увеличение съема металла, приходящегося на одну ленту. В таблице 6.3 приведены сравнительные данные по объему металла снимаемого при обработке лопаток из титановых сплавов.

Таблица 6.3

**Объем металла, снимаемого при обработке лопаток  
шлифованием**

Материал лопатки	Вид ленточного шлифования	Средний объем металла, снятого одной лентой, г/см <sup>3</sup>		Среднее число лопаток, обработанных одной лентой, шт.	
		по корыту	по спинке	по корыту	по спинке
ВТ8	обычное	76	71	5	4
	прерывистое	108	103	8	7
ВТ9	обычное	84,2	79,8	6	5
	прерывистое	120,6	116,9	9	8

Сложной и трудоемкой операцией при изготовлении лопаток турбин и компрессора, крыльчаток, вентиляторов, роторов и других деталей является обработка сопряженных по радиусу поверхностей, например прикомлевых участков, обработка которых может осуществляться по методу обкатывания или копирования.

*Метод обкатывания* (рис. 6.13а) целесообразно применять при обработке выпуклых поверхностей прикомлевого участка лопатки со стороны спинки. При этом методе лопатке сообщается возвратно-поступательное движение подачи обката  $S_{об}$ .

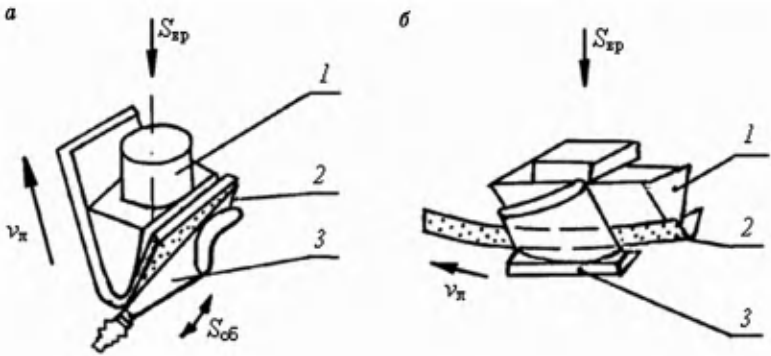


Рис. 6.13

*Схема обработки прикомлевого участка лопаток ленточным шлифованием:*

*а* — лопатки турбины со стороны спинки; *б* — лопатки компрессора со стороны корыта; 1 — копир; 2 — бесконечная абразивная лента; 3 — обрабатываемая заготовка.

*Метод копирования* применяют для обработки вогнутых поверхностей со стороны корыта. При формообразовании поверхностей по методу копирования рабочие поверхности контактного копира должны быть эквидистантны на толщину абразивной ленты обрабатываемым поверхностям. Формообразование радиусных участков производится с относительным поперечным движением лент (рис. 6.13).

Ленточное шлифование может применяться и при обработке сложных поверхностей деталей типа крыльчаток, вентиляторов, цельнолитных роторов направляющих аппаратов и других деталей. На рисунках 6.14 и 6.15 приведены принципиальная и гидравлическая схемы станка для ленточного шлифования лопаток вентилятора.

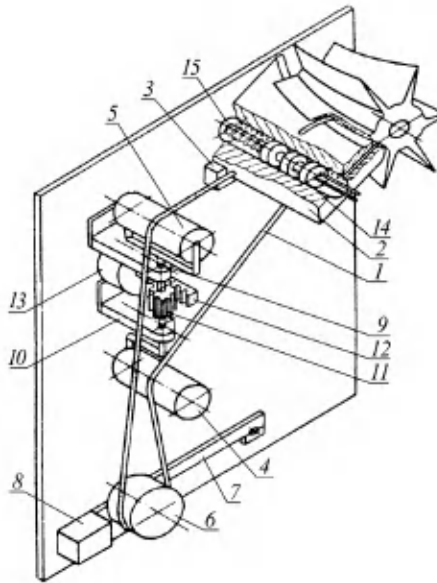


Рис 6.14

*Принципиальная схема станка для ленточного шлифования лопаток вентилятора*

Станок состоит из контактного элемента (копира) 2, абразивной ленты 1, кронштейна 3, роликов для перемещения ленты 4 и 5, приводного шкива 6, одновременно являющегося натяжным, и коромысла 7 с грузом 8. Перемещающие ленту ролики 4 и 5 установлены на оси 9, которая расположена в подшипниковых опорах 10, закрепленных на основании станка. Шестерня 11 взаимодействует с зубчатой рейкой 12, являющейся одновременно штоком силового гидроцилиндра 13. В расточке копира 2 размещен задатчик скорости поперечной подачи ленты, выполненный в виде плунжера 14, перемещаемого при помощи винта 15 и зубчатой пары 16 посредством двигателя 17 (рис. 6.15) с регулируемой частотой вращения. Внутри плунжера 14 выполнены осевые каналы 18 и 19, которые сообщены с каналами 20, выполненными в копире. Расстояние между каналами 20 кратно ширине кольцевых проточек плунжера. Каналы 18 и 19 соединены со следящим задатчиком 21, управляющим работой силового гидроцилиндра 13, являющегося приводом механизма поперечного перемещения ленты.

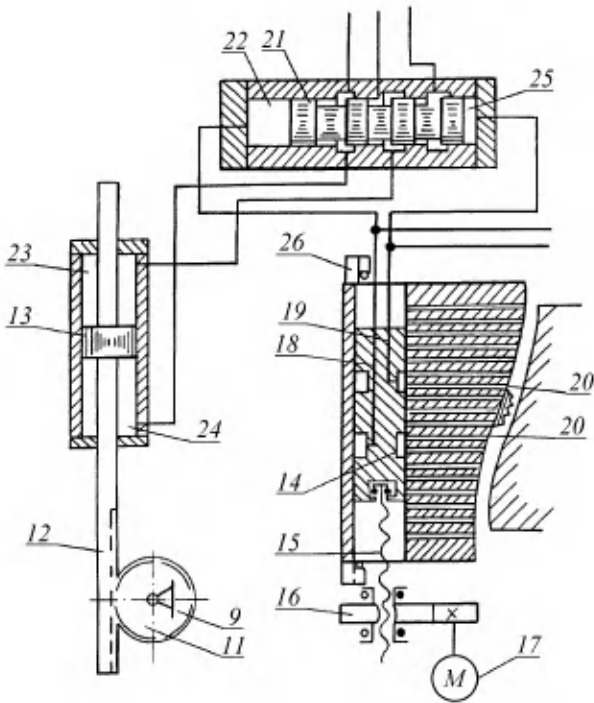


Рис. 6.15

*Гидравлическая схема станка для шлифования лопаток вентилятора*

Станок работает следующим образом. При включении привода вращения ленты и подачи СОТС последнее нагнетается в каналы 18 и 19, сообщаемые с кольцевыми проточками плунжера, а также каналы 20, выполненные в копира, подается по обе стороны полотна к вращающейся ленте. Затем включается привод поперечной подачи ленты. Двигатель 17 через зубчатую пару 16 и винт 15 перемещает плунжер 14. Каналы копира, сообщаемые с каналами 18, перекрываются полотном абразивной ленты. В полости 22 следящего золотника поднимается давление, и золотник 21 перемещается вправо, соединяя полость 23 гидроцилиндра 13 с нагнетателем, а полость 24 со сливом. Гидроцилиндр поворачивает через кинематическую связь ось 9 и направляющие ролики против часовой стрелки (относительно оси 9), вследствие чего полотно абразивной ленты перемещается по поверхности

роликов и, соответственно, поверхности копира вверх (рис. 6.15). При достижении крайнего положения плунжер нажимает на концевой выключатель 26, двигатель 17 изменяет направление вращения, и плунжер 14 начинает перемещаться вниз, изменяя при этом на обратное и направление перемещения ленты вдоль копира до снятия всего припуска с обрабатываемой детали.

Наряду с ленточным шлифованием сложных пространственных поверхностей, например лопаток и других деталей двигателей, применяется шлифование абразивным и алмазным инструментом. Шлифование выполняется по разным схемам.

Шлифование пера лопаток может выполняться широким профильным кругом методом врезания. Сущность метода шлифования широким кругом заключается в том, что заданная форма обрабатываемой поверхности детали получается в виде огибающей ряда последовательных положений профиля круга; при этом формы профилей спинки лопатки и круга сопряжены (рис. 6.16).

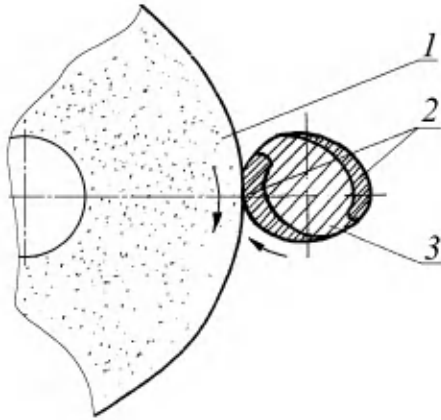


Рис. 6.16

*Схема шлифования пера лопаток профильным кругом методом врезания:*

1 — шлифовальный круг; 2 — обрабатываемые лопатки; 3 — оправка.

При сопряженном шлифовании вращение лопатки кинематически связано с вращением круга. Каждый участок поверхности лопатки обрабатывается соответствующим ему участком шлифовального круга. Например, при шлифовании лопаток по две штуки они крепятся на специальной оправке, которая устанавливается в центрах станка.

За период одного оборота оправки шлифовальный круг делает два полных оборота. Вследствие разности диаметров круга и обрабатываемой заготовки по линии их контакта при шлифовании происходит взаимное проскальзывание сопряженных профилей со скоростью 30 м/с. Профиль шлифовального круга по мере его затупления и износа восстанавливается алмазом с помощью специального механизма с объемным копиром. Профиль копира, как и круга, соответствует профилю спинки лопатки. Профилирование копира осуществляется шлифованием на станке методом обратного копирования по эталонной (образцовой) лопатке, установленной на рабочей оправке.

Для предварительного шлифования профиля пера лопаток широким кругом применяют копировально-шлифовальные станки. Лопатки с постоянным профилем пера, например сопловых спрямляющих аппаратов, также можно обрабатывать широким абразивным кругом. Лопатки закрепляют в приспособлении, которое установлено на столе плоскошлифовального станка, с совмещением образующей цилиндрической поверхности с направлением хода стола. Поверхности корыта и спинки лопатки обрабатываются отдельно по всей ширине пера. При наличии у лопаток полок или хвостовиков их обрабатывают на профилишлифовальных станках или профилированными кругами на плоскошлифовальных станках.

При обработке сложных поверхностей лопаток и других деталей из титановых и жаропрочных сплавов и сталей наиболее эффективным методом по сравнению с обработкой абразивными кругами и лентами является **алмазное шлифование**. Большой срок службы алмазного инструмента способствует повышению точности обрабатываемых деталей. Например, размерный износ алмазного круга диаметром 150 мм с характеристикой АСВ 250/200 М016-100% концентрации при съеме 80 г сплава ВТЗ-1 с одной детали составляет 4 мкм, что позволяет получать значительно меньшую погрешность обрабатываемой поверхности детали, чем погрешность от износа абразивного круга или ленты.

На рисунке 6.17 показана схема шлифования фасонных поверхностей лопаток узкими строчками алмазным кругом, имеющим закругленный профиль. Для обработки применяется объемный копир, имеющий в нормальных сечениях эквидистантные профили обрабатываемой детали. Вращающийся круг имеет относительное продольное перемещение вдоль заготовки, причем за один оборот заготовки круг перемещается относительно обрабатываемой лопатки на величину продольной подачи.

Шлифование лопаток и других деталей со сложными поверхностями абразивными и алмазными кругами и бесконечными лентами должно выполняться с учетом качества поверхностного слоя, влияющего на эксплуатационные характеристики деталей. При шлифовании лопаток из титановых и жаропрочных сплавов и сталей могут появляться дефекты в виде разнообразных по форме пятен, выявляемых травлением. Такие дефекты представляют места перехода от одной структуры к другой и появляется опасность концентрации максимальных растягивающих напряжений, которые могут привести к разрушению лопаток при эксплуатации.

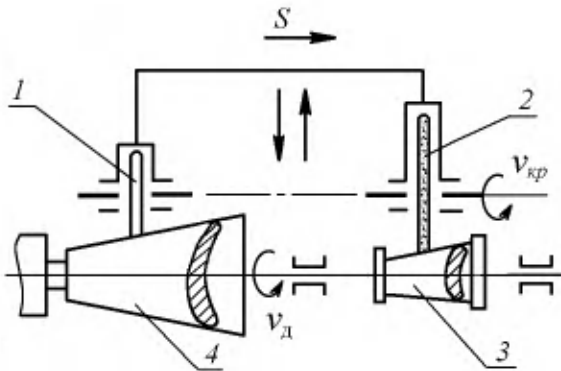


Рис. 6.17

Схема шлифования лопаток строчками по объемному копиру:

1 — ролик; 2 — алмазный круг; 3 — лопатка; 4 — копир.

Условия контакта инструмента и обрабатываемой поверхности пера лопатки значительно отличаются при шлифовании корыта и спинки. Увеличение пятна контакта при шлифовании корыта способствует повышению температуры на этих участках и формированию в поверхностном слое детали остаточных напряжений растяжения.

После алмазного шлифования спинки пера лопатки создаваемые напряжения сжатия больше по величине, чем после ленточного шлифования, и распространяются на большую глубину. На величину и характер распределения остаточных напряжений при алмазном шлифовании деталей из жаропрочных сталей и титановых сплавов на станках типа ЛШ-1 наибольшее влияние оказывают скорость, глубина шлифования и расход подаваемого в зону обработки СОТС. Повышение скорости

шлифования лопаток из титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ5-1 от 35 до 62 м/с при постоянном значении других режимов шлифования ( $S_{\text{пр}} = 0,2$  м/с;  $S_{\text{ф}} = 104,76 \cdot 10^{-4}$  рад. — круговая подача детали;  $t = 0,1$  мм) приводит к появлению в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений, максимальная величина которых по корыту лопатки составляет  $294 \cdot 10^6$  Па.

При изготовлении деталей со сложными поверхностями успешно применяются электрохимические методы обработки. Это объясняется особенностями, свойственными этому методу обработки, такими как производительная обработка материалов независимо от их прочностных характеристик, возможность изготовления деталей сложной формы и др. Схема электрохимической обработки пера лопатки ГТД приведена на рисунке 6.18. Эта обработка основана на растворении поверхности анода, например спинки или корыта лопатки, в процессе электролиза. При протекании электролита с большой скоростью 15–20 м/с в зазоре между катодом (электрод-инструмент) и поверхностью анода (лопатки) и при пропускании тока большой плотности интенсивно растворяется металл с поверхности анода. Интенсивная прокачка электролита между анодом (лопаткой) и катодом обеспечивает удаление продуктов анодного растворения.

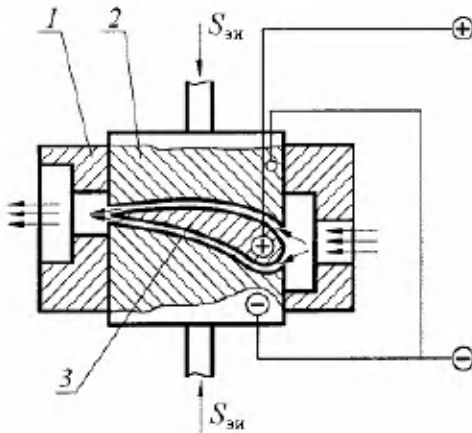


Рис. 6.18

Схема электрохимической обработки пера лопатки ГТД:

1 — рабочая камера; 2 — электрод-инструмент (катод); 3 — лопатка (анод).

Размерная электрохимическая обработка не сопровождается силовым воздействием электрода-инструмента на деталь. Низкая температура электролита способствует перераспределению остаточных напряжений, создаваемых предыдущей механической обработкой.

Для повышения точности обработки лопаток и уменьшения припуска на окончательную обработку процесс изготовления может предусматривать предварительную и окончательную обработку. После окончательной обработки применяется отделочная обработка, например виброконтактное полирование.

Создание алмазных кругов на металлических связках позволяет внедрять высокопроизводительные методы электрохимического (электроалмазного) шлифования профиля пера лопаток и других деталей из труднообрабатываемых жаропрочных и титановых сплавов. Схема обработки профиля пера лопаток компрессора электроалмазным шлифованием приведена на рисунке 6.19.

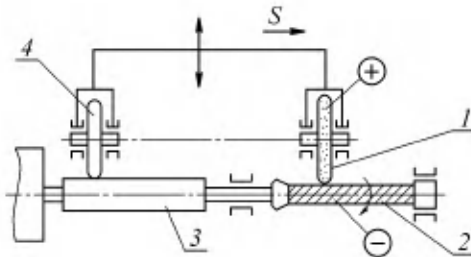


Рис. 6.19

*Схема обработки профиля пера лопатки компрессора электроалмазным шлифованием по копии:*

1 — алмазный токопроводящий круг; 2 — лопатка; 3 — копия; 4 — ролик.

При электроалмазном шлифовании профиля пера лопатки 2 на одной оси с алмазным токопроводящим кругом 1 устанавливается ролик 4, обкатывающийся по эквидистантному профилю копии 3. При обработке ролик и круг синхронно перемещаются с подачей  $S$ . В зависимости от марки обрабатываемого материала (титановые, жаропрочные и другие стали и сплавы) подбираются соответствующие электролиты.

Электрохимическое шлифование деталей, например лопаток компрессора из титановых сплавов, позволяет значительно уменьшить склонность схватывания инструмента с обрабатываемым материалом, что повышает качество поверхностного слоя и производительность процесса обработки.

При размерной электрохимической обработке некоторых жаропрочных сплавов наблюдается растравливание по границам зерен глубиной до 0,03 мм, которое с увеличением плотности тока уменьшается. Следы растравливания удаляются при последующей обработке абразивной лентой или полированием. Электрохимическое шлифование алмазным инструментом наряду с высокой производительностью обеспечивает высокое качество поверхностного слоя, исключает трещины и прижоги.

Электрохимические методы обработки обеспечивают шероховатость поверхности  $Ra = 2,5-0,32$  мкм.

## ОБРАБОТКА РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

### 7.1. ВИДЫ РЕЗЬБ

Резьбы бывают цилиндрические и конические, наружные и внутренние. Для изготовления наружной резьбы применяют: резцы, гребенки, плашки, самораскрывающиеся резьбонарезные головки, дисковые и групповые фрезы, шлифовальные круги, накатные плашки. Внутренняя резьба нарезается: резцами, метчиками, групповыми фрезами, накатными роликами.

Точность изготовления резьбы определяется тремя классами. Точность изготовления относится к размеру среднего диаметра резьбы.

### 7.2. НАРЕЗАНИЕ РЕЗЬБЫ РЕЗЦАМИ И ГРЕБЕНКАМИ

Треугольную резьбу часто нарезают на токарно-винторезных станках *резьбовыми резцами*. Используются резцы обычного типа, заточенные под требуемым углом в плане ( $60^\circ$  для метрической резьбы и  $55^\circ$  — для дюймовой), или дисковые (рис. 7.1).

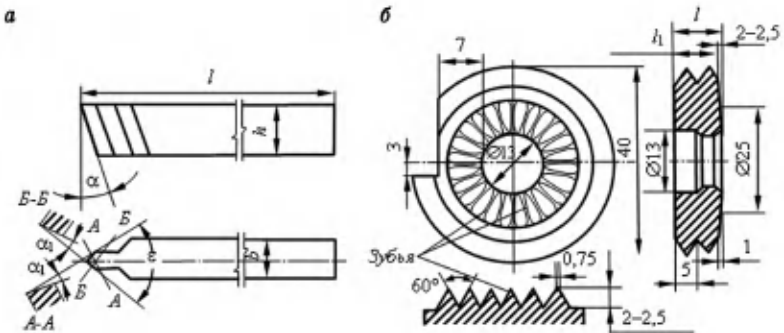


Рис. 7.1  
Резьбовые резцы

Резец устанавливается перпендикулярно к оси станка, так как в противном случае получится искаженный профиль резьбы. Передняя поверхность резца должна быть на высоте центров станка. Этот метод обеспечивает нарезание резьб точного класса (класс точности А по ГОСТ Р ИСО

4759-1-2009), но с низкой производительностью. Применяется в единичном и мелкосерийном производстве.

Резьба нарезается за несколько проходов. Поперечная подача резца при нарезании резьбы с треугольным профилем впадины может осуществляться тремя способами. На рисунке 7.2а поперечная подача должна быть в направлении, перпендикулярном к оси резьбовой поверхности. На рисунке 7.2б она выполняется под углом. Для этого верхние салазки суппорта должны быть повернуты на  $30^\circ$  при нарезании метрической резьбы и на  $27^\circ 30'$  при нарезании дюймовой резьбы. Этот метод применяется для нарезания грубых резьб. Последнюю стружку снимают поперечной подачей. На рисунке 7.2в показана работа по такому же способу, как и на рисунке 7.2б, но резец при этом установлен наклонно и имеет заточку, отличную от обычного резьбового резца. Он режет только передней кромкой, поэтому ему легко придать передний угол, что облегчает работу резца. Окончательный проход осуществляется другим резцом (по схеме на рис. 7.2а).

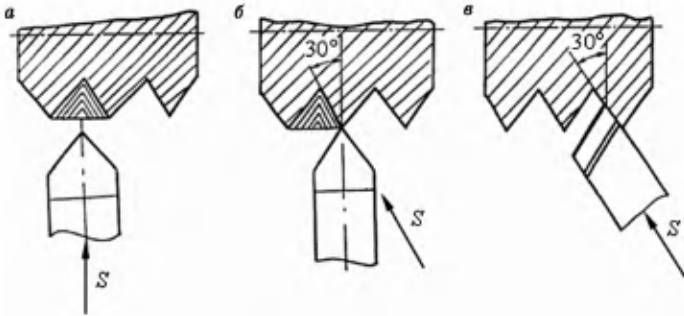
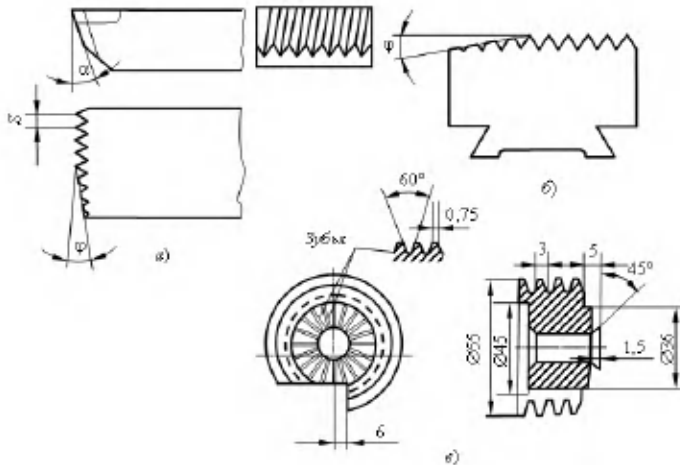


Рис. 7.2

Схемы нарезания резьбы

При нарезании резьбы одним и тем же резцом с начала и до конца его режущая кромка быстро притупляется и легко теряет свою форму. Поэтому при крупных шагах резьбы первоначальное нарезание производят одним резцом, а окончательное другим.

С целью повышения производительности для нарезания резьбы применяют *гребенки*, которые отличаются от резцов тем, что режут одновременно несколькими кромками (рис. 7.3). При нарезании резьбы гребенкой работа резания распределяется между несколькими зубьями за счет стачивания нескольких первых зубьев.



**Рис. 7.3**  
Резьбовая гребенка:

*a* — плоская гребенка; *b* — призматическая гребенка; *в* — круглая гребенка.

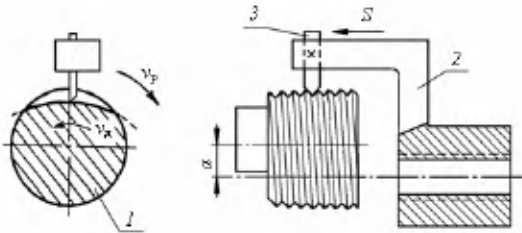
Применяется этот метод в серийном производстве. Он более производительен. Точность обработки — до среднего класса (класс В по ГОСТ Р ИСО 4759-1-2009). Этим методом нельзя нарезать резьбу на деталях, у которых резьба доходит до выступа или буртика, так как часть резьбы, находящаяся ближе к буртику, не получит полного профиля.

Наибольшее применение находят призматические и круглые гребенки, так как они допускают большее количество переточек. Внутренние резьбы нарезаются только круглыми гребенками.

### 7.3. ВИХРЕВОЕ НАРЕЗАНИЕ РЕЗЬБЫ

Вихревое нарезание резьбы (рис. 7.4) осуществляется следующим образом: заготовка, закрепленная в патроне токарного станка, медленно вращается. В специальной вращающейся головке, установленной на суппорте станка, закрепляется резец с пластинкой из твердого сплава. Головка расположена эксцентрично (величина эксцентриситета  $a$ ) относительно оси обрабатываемой заготовки, и резец, закрепленный в ней, описывает окружность, диаметр которой больше диаметра детали. Периодически (один раз за каждый оборот головки) резец прорезает на детали серповидную канавку, имеющую профиль резьбы. За каждый

оборот вращающейся заготовки при перемещении вращающейся головки вдоль оси на величину шага резьбы на детали будет образовываться один виток резьбы.

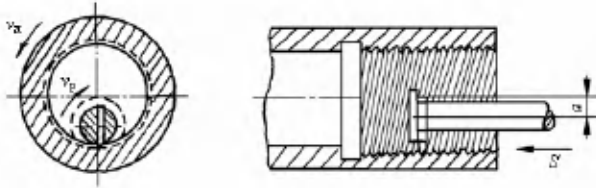


**Рис. 7.4**

*Вихревое нарезание наружной резьбы:*

1 — обрабатываемая заготовка; 2 — резцовая головка; 3 — резец.

При нарезании внутренней резьбы деталь закрепляется в патроне, а резец в оправке головки, которая устанавливается на суппорте станка (рис. 7.5)

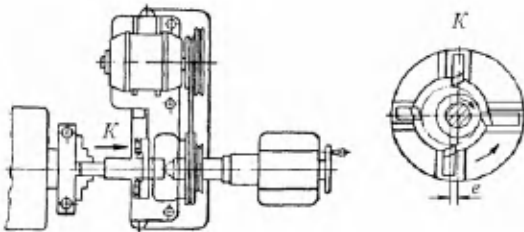


**Рис. 7.5**

*Вихревое нарезание внутренней резьбы*

Скорость резания при вихревом нарезании  $v_p = 150\text{--}450$  м/мин. Скорость вращения детали  $v_d = 1\text{--}2$  м/мин.

Конструктивное оформление резцовой головки представлено на рисунке 7.6.



**Рис. 7.6**

*Резцовая головка*

## 7.4. НАРЕЗАНИЕ РЕЗЬБЫ МЕТЧИКАМИ И ПЛАШКАМИ

**Метчики** предназначены для нарезания внутренней резьбы (рис. 7.7). Они бывают машинные и ручные. Метчики диаметром до 25 мм имеют три канавки, диаметром свыше 25 мм — 4 канавки. Канавки могут быть прямые и винтовые, правые и левые. Метчики выпускаются диаметром до 300 мм. Метчики больших диаметров выпускаются со вставными и с раздвигающимися нарезными плашками (резьбонарезные головки).

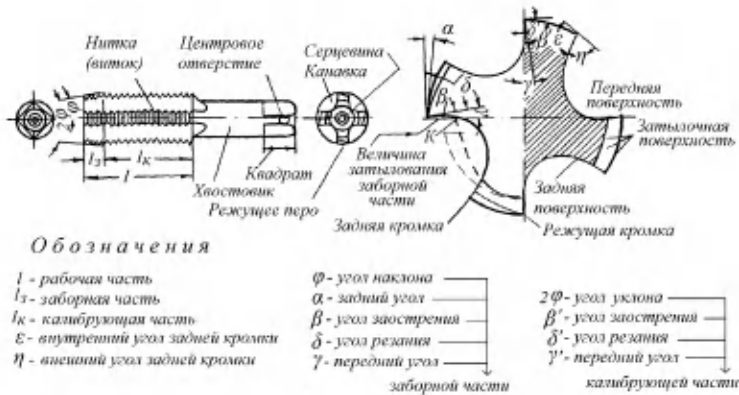


Рис. 7.7

Метчик для нарезания резьбы

По методу изготовления различают метчики, нарезанные с нешлифованной резьбой, которые применяются для грубых классов резьб, и метчики со шлифованной резьбой (для точных классов резьб). Они обеспечивают более высокую точность и производительность. Метчики с накатанной поверхностью предназначаются для резьб грубого класса (класс точности С по ГОСТ Р ИСО 4759-1-2009). Они значительно дешевле, так как накатывание производительно, и выпускаются диаметром до 12 мм.

Метчики закрепляются в шпинделе станка с помощью предохранительного патрона, который предохраняет метчик от поломки в случае перегрузки и обеспечивают его самозатягивание.

С целью сокращения времени на обратный ход метчика после нарезания резьбы в массовом производстве

применяют самораскрывающиеся резьбовые головки (рис. 7.8). Внутри корпуса головки 8 размещены режущие плашки 1, которые могут перемещаться в радиальном направлении. Величина перемещения регулируется винтом 10 и сухарем 2. После нарезания резьбы шайба 4 торцом обрабатываемой детали смещается вправо и при помощи стержня 9 смещает вправо втулку 5. При движении втулки смещается рукоятка 6, которая с помощью паза 11 на корпусе 8 сдвигает вправо сердечник 7, отводит крестовину 3 и плашки выводятся из нарезаемой резьбы. Самораскрывающиеся резьбовые головки позволяют производить нарезание резьбы в несколько проходов за счет регулирования положения плашек. Они допускают большое число проточек.

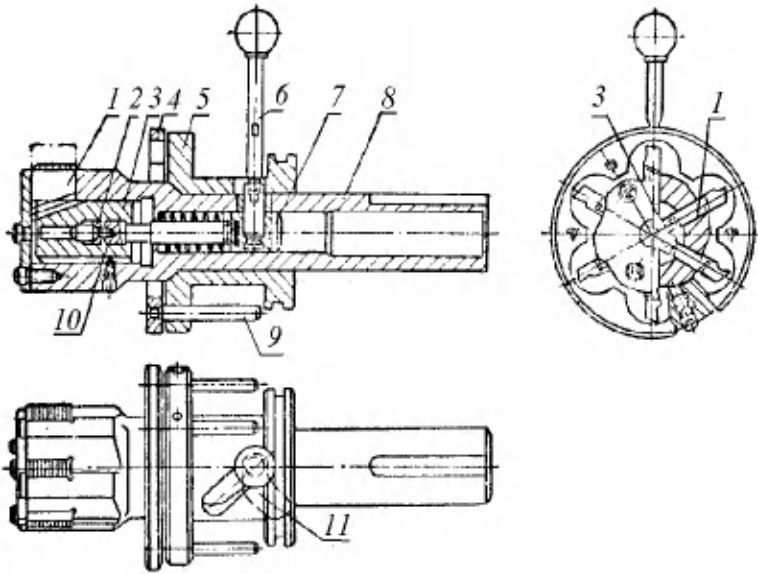


Рис. 7.8

*Самораскрывающаяся резьбовая головка*

Нарезание *плашками* — малопроизводительный метод. Основной недостаток обработки заключается в необходимости их свинчивания по окончании нарезания резьбы, что вызывает затрату времени, снижает производительность и ухудшает качество поверхности резьбы. Скорость резания

2–4 м/мин. Плашки можно шлифовать при диаметре свыше 25 мм. Плашки обеспечивают класс точности резьбы С (по ГОСТ Р ИСО 4759-1-2009), а при шлифованных плашках класс точности В.

Более производительным является нарезание резьбы *резьбонарезными головками*, так как благодаря автоматическому раскрыванию головки обратного свинчивания их не требуется. Существуют головки с призматическими плашками (радиальные — рис. 7.9а и тангенциальные — рис. 7.9б) и круглыми плашками (рис. 7.9в). Скорость резания при работе резьбонарезными головками 14–18 м/мин, точность резьбы — класс С и даже выше.

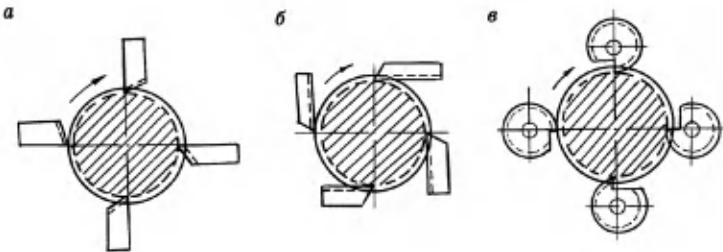


Рис. 7.9

*Нарезание резьбы резьбонарезными головками*

## 7.5. ФРЕЗЕРОВАНИЕ РЕЗЬБЫ

Осуществляется двумя способами: дисковой и групповой фрезами. Фрезерование **групповой фрезой** применяется для коротких резьб с мелким шагом (рис. 7.10а, б). Фреза представляет собой как бы группу дисковых фрез, собранных на одну оправку. Длина фрезы обычно на 2–5 мм больше длины фрезеруемой резьбы. Групповая фреза устанавливается параллельно оси детали. Предварительно производят врезание фрезы на глубину резьбы, а затем фреза получает продольную подачу. Во время полного оборота детали групповая фреза перемещается на величину шага резьбы. Фрезерование резьбы происходит за 1,2 оборота детали, так как 0,2 оборота детали требуется для врезания фрезы на глубину резьбы и перекрытия места врезания.

**Дисковая фреза** (рис. 7.10в) применяется при нарезании резьбы с большим шагом и крупным профилем.

Нарезание может выполняться за один, два или три прохода. Профиль фрезы соответствует профилю резьбы. Ось фрезы располагается по отношению к оси детали под углом  $\alpha$ , равным углу наклона резьбы. При нарезании

резьбы фреза вращается и имеет поступательное движение вдоль оси детали (за один оборот детали перемещение на величину шага).

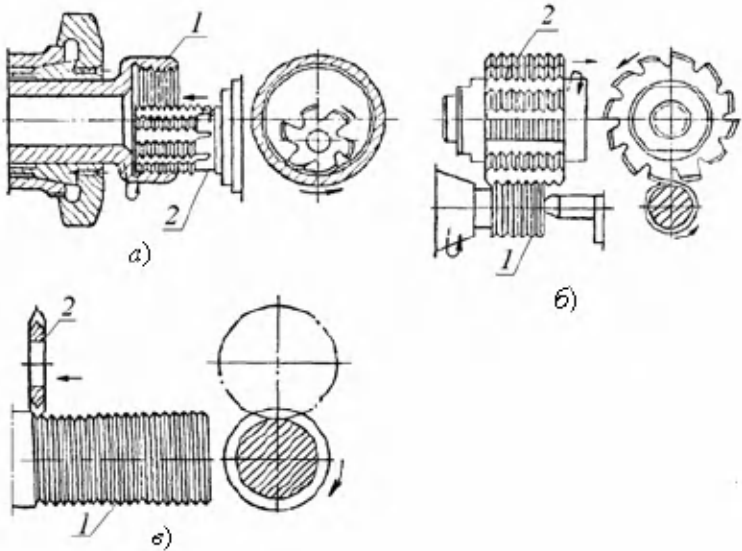


Рис. 7.10.

Схемы фрезерования резьб:

1 — обрабатываемая заготовка; 2 — фреза.

## 7.6. ШЛИФОВАНИЕ РЕЗЬБЫ

Шлифование резьбы одно- или многониточным кругом аналогично фрезерованию соответственно дисковой и групповой фрезой.

Шлифование однопониточным кругом осуществляется при продольном перемещении заготовки или круга (рис. 7.11б). Многониточные круги применяют преимущественно при шлифовании резьбы на деталях с короткой нарезанной частью (не более 40 мм).

Ширина шлифовального круга больше длины шлифуемой резьбы на 2–4 витка (рис. 7.11а, в). На круге делается кольцевая резьба с требуемым шагом. Шлифование производится при продольном передвижении заготовки или круга на 2–4 шага за 2–4 ее оборота. Шлифуют резьбу главным образом на специальных резьбошлифовальных станках. При

единичном производстве можно шлифовать наружную и внутреннюю резьбу на токарно-винторезных станках при помощи специальных приспособлений. Шлифование обеспечивает получение резьб класса А по ГОСТ Р ИСО 4759-1-2009.

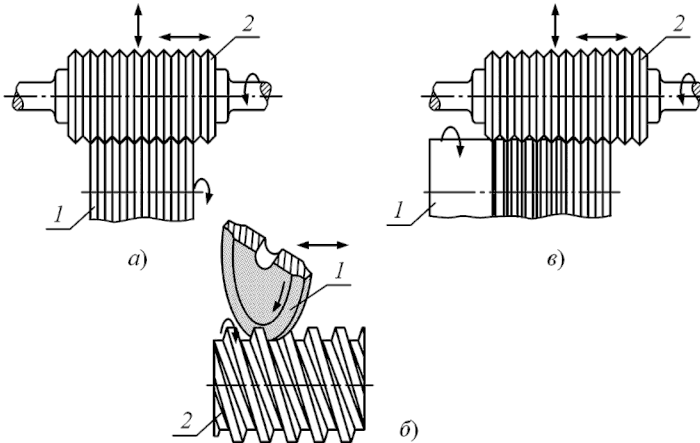


Рис. 7.11

Схемы шлифования резьб:

1 — шлифовальный круг; 2 — заготовка.

## 7.7. НАКАТЫВАНИЕ РЕЗЬБЫ

Наиболее производительным методом является накатывание резьбы. Этот метод применяется для получения резьб крепежных и резьб высокого качества. При этом методе изготовления резьбы волокна не разрезаются, а деформируются пластически под воздействием резьбонакатных плашек или роликов, выступы которых вдавливаются в обрабатываемый материал. Полученная таким образом резьба имеет чистую, ровную и уплотненную поверхность. Накатывается резьба в холодном состоянии.

Резьбу можно накатывать круглыми и плоскими роликами или круглыми плашками. При накатывании плоскими плашками (рис. 7.12) нижняя плашка неподвижна, а верхняя установлена в ползуне, совершающем возвратно-поступательные движения. Рабочая поверхность плашек имеет прямолинейную резьбу с профилем и углом подъема, соответствующими профилю и углу подъема накатываемой резьбы.

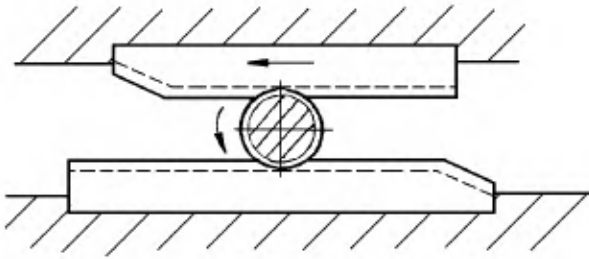


Рис. 7.12

*Накатывание резьбы плоскими плашками*

Плоскими плашками накатывают преимущественно болты и винты. Точность – класс С по ГОСТ Р ИСО 4759-1-2009. На резьбонакатных станках, работающих плоскими плашками, можно накатывать резьбу диаметром от 2 до 25 мм длиной до 125 мм.

На рисунке 7.13 представлен пример накатывания резьбы круглыми плашками. Одновременно накатываются две детали. При накатывании в наружной поверхности происходит наклеп поверхностного слоя резьбы, что повышает ее износостойкость. Наружный диаметр заготовки под накатывание  $D_{\text{заг}}$  выполняется равным среднему диаметру резьбы, поскольку при накатывании металл выдавливается (рис. 7.14).

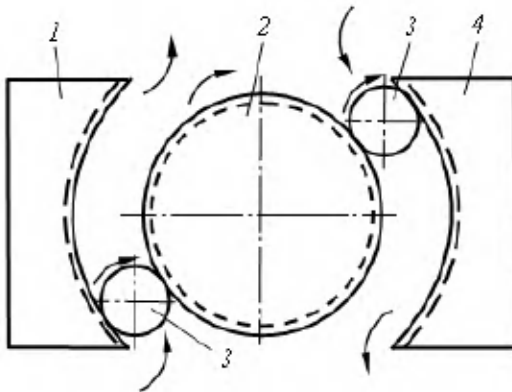
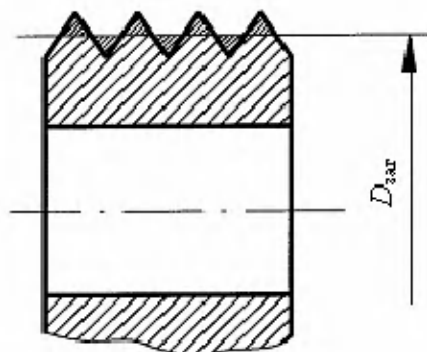


Рис. 7.13

*Накатывание резьбы круглыми плашками:*

1 — неподвижные плашки; 2 — вращающаяся плашка; 3 — обрабатываемые заготовки.

**Рис. 7.14**

*Схема расположения металла при накатывании*

Наибольший шаг резьбы при накатывании круглыми плашками — до 6 мм. Диаметр накатываемых изделий — от 6 до 100 мм.

# ОБРАБОТКА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ШЛИЦЕВ

## 8.1. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ

Пара для передачи движения или сил посредством зубчатых колес, зубчатого колеса и рейки, червяка и червячного колеса или зубчатых элементов особой формы (шлицы) называется зубчатой передачей.

Для осуществления вращательного движения с относительным перемещением звеньев пары в зависимости от расположения валов существуют следующие *виды передач*.

1. Цилиндрические зубчатые передачи внешнего зацепления с параллельными осями (рис. 8.1а).

2. Цилиндрические зубчатые передачи внутреннего зацепления с параллельными осями (рис. 8.1б).

Эти два вида передач осуществляются с прямозубыми и с косозубыми зубчатыми колесами.

Передача с пересекающимися осями под различными углами. Применяются в основном конические ортогональные передачи под углом  $90^\circ$ , осуществляемые прямозубыми коническими зубчатыми колесами, косозубыми (с наклонным зубом) и с круговым зубом (рис. 8.1в).

Кроме того, используются передачи с перекрещивающимися осями.

1. Коническая гипоидная передача (рис. 8.1г) с гипоидным смещением оси колеса.

2. Винтовая зубчатая передача, осуществляемая из цилиндрических косозубых колес (рис. 8.1д).

3. Червячная зубчатая передача, осуществляемая червячным колесом, находящимся в зацеплении с цилиндрическим (рис. 8.1ж) или глобоидным (рис. 8.1з) червяком.

4. Реечная зубчатая передача (рис. 8.1е), предназначенная для преобразования вращательного движения в поступательное и наоборот.

Для передачи вращения без относительного перемещения звеньев пары предназначена шлицевая зубчатая передача, состоящая из шлицевого вала и втулки с применяемыми чаще всего эвольвентными, треугольными и прямобочными шлицами (рис. 8.1и и рис. 8.1к).

Применяются преимущественно зубчатые зацепления с эвольвентным профилем зуба, имеющим неоспоримые пре-

имущества в технологическом отношении по сравнению с профилями, выполненными по циклоиде и по дугам окружности (зацепление Новикова).

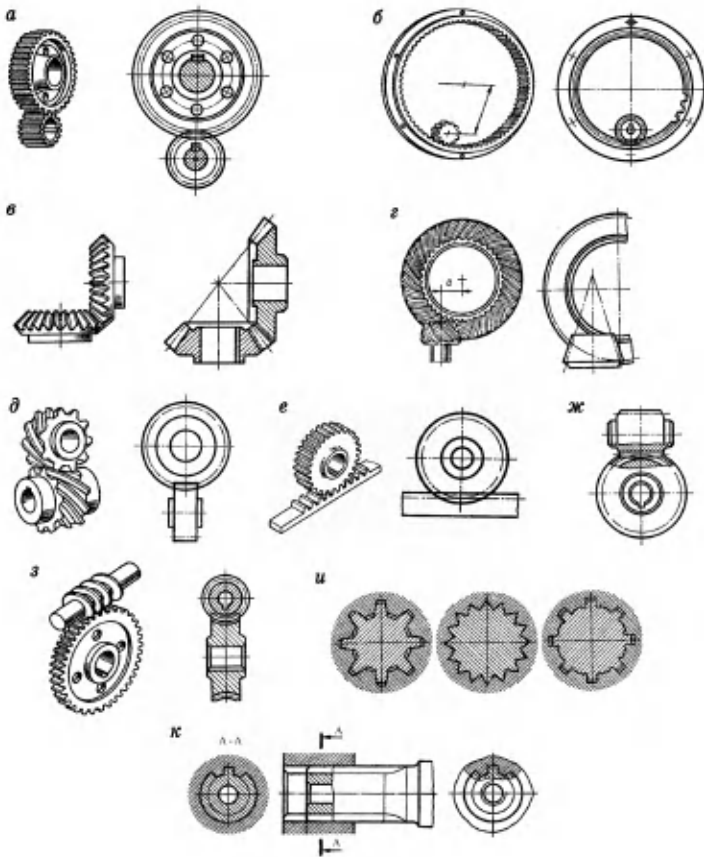


Рис. 8.1

*Виды зубчатых передач*

## 8.2. ОСОБЕННОСТИ АВИАЦИОННЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Зубчатые передачи авиационных ГТД являются ответственными узлами летательных аппаратов и обеспечивают передачу вращения на винт от центрального вала ТВД, вращение несущего и рулевого винтов вертолетов, передачу вращения на привод к агрегатам различного типа у турбореактивных двигателей.

В авиационной промышленности применяются в основном передачи видов *a*, *b*, *в*, *и*, *к* (рис. 8.1). Среди цилиндрических зубчатых передач наибольшее количество (более 70%) прямозубые, большинство конических передач с круговым зубом при наблюдаемой тенденции их преимущественного применения. Наиболее распространены шлицевые зубчатые передачи с эвольвентным профилем.

Зубчатые передачи авиационных двигателей отличаются ажурностью конструкции, малым удельным весом, обеспечиваемым оптимальным коэффициентом запаса прочности, и должны обеспечивать высокую надежность и большой ресурс работы. Большое количество авиационных зубчатых передач относится к высокоскоростным с окружной скоростью до 100 м/с и более и высоконапряженным. К высоконапряженным можно отнести такие передачи, деформации зубьев которых под нагрузкой сопоставимы с погрешностью их изготовления. Наряду с понятием «технологическая точность» появляется понятие «точность под нагрузкой», которая обеспечивается преднамеренным введением технологической «неточности» путем осуществления различных модификаций и коррекций профиля зуба.

Основными особенностями авиационных зубчатых колес являются:

- применение зубчатых колес средних модулей  $m = 2-8$  мм;
- высокая точность. Степень точности 4-6 по ГОСТ 1643-81;
- относительно узкий зубчатый венец;
- широкое применение нестандартного угла зацепления ( $\alpha_0 = 25^\circ$ ) у цилиндрических и конических зубчатых колес;
- применение модифицированных исходных контуров с поднутренным основанием (выкружкой) при предварительном формообразовании;
- отделка профилей зубьев методом зубошлифования с последующим зубохонингованием и нешлифованной впадиной после химико-термической обработки;
- продольная и высотная модификация профилей зубьев (продольная и высотная бочкообразность) с целью локализации пятна контакта в паре;
- применение высокопрочных легированных, цементруемых и азотируемых сталей типа 12Х2Н4А, 20ХЗМВФА (ЭИ415), 12Х2НВФМА (ЭИ712М), 13ХЗНВФМБ (ВКС-5), 38ХМЮА;

- высокая поверхностная твердость профилей зубьев  $HRC \geq 60$ , достигается нитроцементацией и цианированием.

К особенностям зубчатых передач **энергетических ГТД** можно отнести:

- повышенный ресурс зубчатых передач до 50 тыс. часов и более;
- регламентирование параметров исходного контура цилиндрических зубчатых колес по ГОСТ 8889-88 и отраслевой инструкции И255.102-015-82;
- преимущественное применение стандартного угла зацепления  $\alpha_0 = 20^\circ$ ;
- применение увеличенного по высоте зуба  $h = 2,5 m$ ;
- высокая точность зубчатых колес (не ниже степени точности 5-4-4 по ГОСТ 1643-81);
- преимущественное азотирование профилей зубьев с применением прогрессивного метода ионного азотирования;
- регламентированный сопряженный радиус во впадине зуба, выполняемый при шлифовании до азотирования;
- запрет какой-либо абразивной обработки профилей зубьев и впадин после азотирования;
- применение модифицированных профилей зубьев (фланкирование, высотная и продольная бочкообразность)
- применение азотируемых высоколегируемых сталей типа 18Х2НЧМА, 14ХГС2МА-Ш, 38ХНМФА;
- большие длинные габариты и размеры зубчатых венцов деталей, выходящие за технические возможности традиционно применяемых зубообрабатывающих станков в авиационном двигателестроении.

### 8.3. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

#### 8.3.1. Общие вопросы технологии

Технологический процесс изготовления зубчатых колес должен обеспечивать связь между заданными эксплуатационными показателями и функциональными параметрами (кинематической точностью, плавностью, качеством поверхностного слоя и т. д.). Техпроцесс изготовления цилиндрических зубчатых колес гарантирует полную взаимозаменяемость, а конических зубчатых колес — преимущественно парную взаимозаменяемость.

Особенность построения маршрутного техпроцесса изготовления зубчатого колеса и введение специальных операций строго в определенной последовательности зависят от применяемой химико-термической обработки и особенно в случаях необходимости применения на одной детали разнородной химико-термической обработки, например нитроцементации рабочего зубчатого венца и цианирования шлицевого венца.

В данном случае необходимо двойное применение операции меднения для защиты поверхностей, не подлежащих нитроцементации и цианированию. Первое меднение кругом проводится перед операцией нарезания зубчатого венца от протшлифованных после меднения базовых шеек под подшипники, которые также подлежат нитроцементации вместе с нарезанным профилем зуба.

После проведения этих операций проводится второе меднение для защиты уже нитроцементированных от последующего цианирования, проводимого для шлицевых поверхностей, обработанных после второго меднения. Цианированные шлицы и нитроцементированные поверхности профилей зубьев и базовых шеек, подвергают общей закалке до необходимой твердости.

После закалки требуется операция исправления шлиц притиркой или шлифованием, после чего с выверкой от исправленного шлицевого венца следует операция восстановления фасок – базовых поверхностей для окончательного шлифования базовых шеек и зубчатого венца. После операций шлифования для ответственных зубчатых колес вводятся операции контроля на прочность методом травления и магнитного контроля на наличие трещин.

### 8.3.2. Методы формообразования поверхностей зубьев зубчатых колес

Для любого зубчатого колеса главной операцией в технологическом процессе его изготовления является формообразование профилей зубьев. В связи с широким и многообразным применением зубчатых колес с различными требованиями к ним по точности, несущей способности и другим параметрам существует многообразие методов формообразования поверхностей зубьев. В таблице 8.1 приведены основные и наиболее эффективные методы образования профилей зубьев.

Новый высокоточный метод электроэрозионного контурного вырезания проволокой по программе, обеспечивающий шероховатость поверхности  $Ra = 0,32$  мкм, может применяться как окончательный для изготовления шлицевых калибров и других эталонных зубчатых изделий.

В производстве авиационных зубчатых колес как на предварительных операциях формообразования зубьев, так и на отделочных операциях широко применяется обработка резанием традиционными методами копирования и обката.

Анализируя общий перечень методов при обработке зубчатых колес применительно к производству ГТД можно выделить сложившееся направление и тенденции.

1. Метод обката с единичным делением является преобладающим при изготовлении конических зубчатых колес, как на предварительных, так и на чистовых операциях. Разрабатываемые ранее и применяемые процессы с непрерывным делением, такие как тюнингование конических зубчатых колес не нашли применения в современных технологиях их производства.

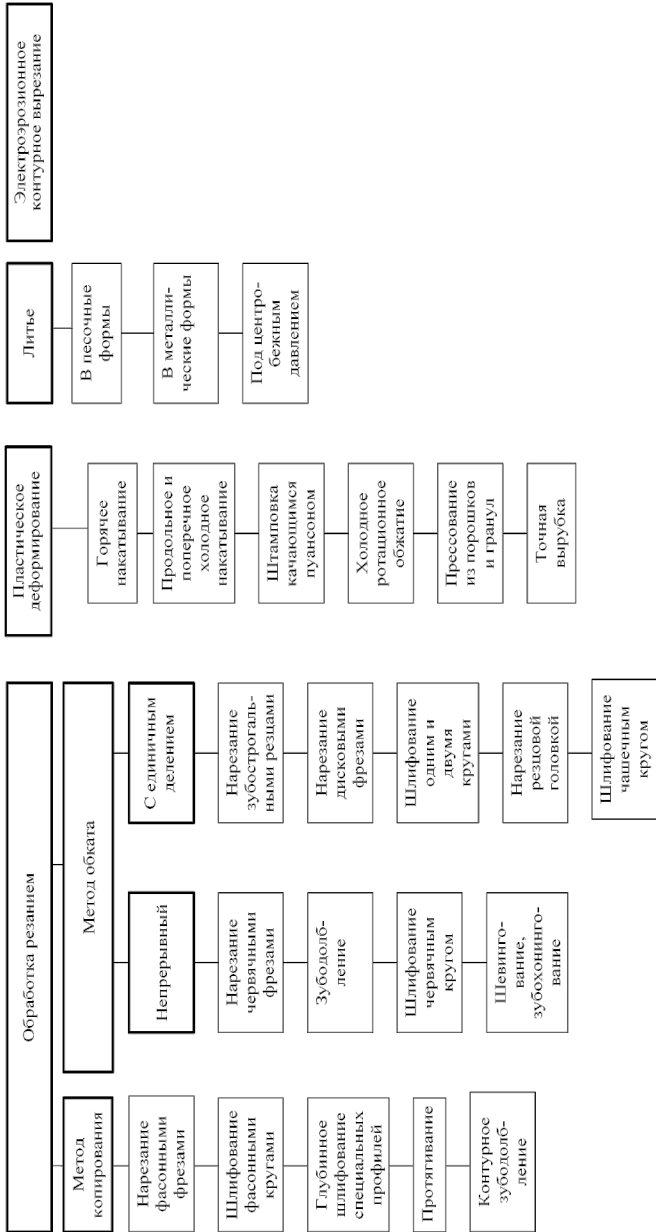
2. Метод обкатного зубошлифования двумя тарельчатыми кругами (метод МААГ) с единичным делением все более вытесняется методом зубошлифования червячным абразивным кругом, который интенсивно совершенствуется по пути полной автоматизации цикла шлифования, правки круга и возможности шлифовать модифицированный профиль за счет систем с ЧПУ, обеспечивающих движение режущей кромке шлифовального круга или правочного инструмента по необходимой траектории для образования фланца, высотной или продольной бочкообразности на обрабатываемом профиле зуба.

3. Методы обката с непрерывным делением — зубофрезерование и зубодолбление остаются основными для предварительного формообразования наружных и внутренних профилей зубьев рабочих венцов и шлицев. Намечается тенденция применения современных режущих материалов и оборудования для финишной обработки эвольвентных наружных и внутренних шлиц высоконагруженных валов из труднообрабатываемых материалов методами зубофрезерования и зубодолбления, как наиболее благоприятными для повышения усталостной прочности.

3. Расширяется применение профильного зубошлифования методом копирования правящимся инструментом на керамической связке с применением современного оборудования с ЧПУ как для высокоточного чистового зубошлифования, так и для предварительного формообразования вместо лезвийных методов в режиме глубинного шлифования.

Таблица 8.1

## Методы формообразования поверхностей зубьев зубчатых колес



## 8.4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

По конструктивным особенностям все цилиндрические зубчатые колеса можно разделить на 2 класса: класс дисков (рис. 8.2а, б) и класс валов (рис. 8.2в).

В свою очередь, дисковые зубчатые колеса и колеса-валы можно подразделить на 2 вида — одновенцовые и многовенцовые. На многовенцовых колесах-дисках, как правило, один из венцов закрытый (рис. 8.2б), т. е. не имеет достаточного выхода инструмента. На зубчатых колесах класса валов все зубчатые венцы открытой конструкции и доступны для любого вида обработки.

Конструктивные особенности зубчатых колес определяют технологические особенности их изготовления. Процессы обработки заготовок до операции формообразования зубчатого венца полностью соответствуют типовым процессам обработки деталей класса дисков и валов. На операцию зубонарезания существенным образом влияют конструктивные особенности. Так закрытый малый венец (рис. 8.2б) можно обработать только методом зубодолбления.

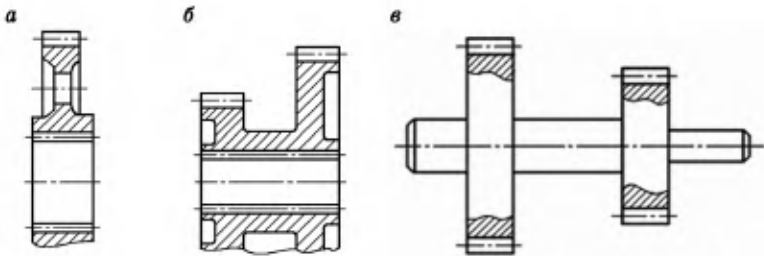


Рис. 8.2

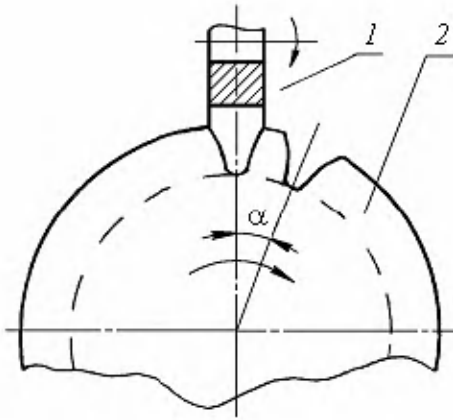
*Классификация цилиндрических зубчатых колес*

### 8.4.1. Методы предварительного формообразования цилиндрических зубчатых колес

Формообразование профилей зубьев может быть осуществлено двумя методами: копирования и обкатки.

**Метод копирования** заключается в том, что каждая впадина зубьев обрабатывается инструментом, имеющим профиль впадины по всем точкам (рис. 8.3). Во время обработки заготовка не вращается и по окончании обработки очередной впадины она поворачивается на угол  $\alpha = 360/z$ , где  $z$  — число обрабатываемых впадин. До последнего

времени метод копирования считался недостаточно точным, применялся в основном в ремонтном деле и в случаях, где другие методы неприемлемы, например шлифование внутренних венцов шлицевых соединений. Появление специального высокоточного эльборового инструмента высокой стойкости, исключаящего в конструкции станка механизм правки (основной источник погрешностей профиля), и высокоточного электронного делительного механизма сделало метод копирования одним из самых перспективных как по точности, так по другим технологическим показателям.



**Рис. 8.3**

*Формообразование цилиндрического зубчатого колеса методом копирования:*

1 — профильный инструмент; 2 — обрабатываемое зубчатое колесо.

Наибольшее распространение в машиностроении и авиационном двигателестроении, при формообразовании профилей зубьев, нашел **метод обкатки**, который заключается в том, что инструменту и заготовке сообщаются движения, воспроизводящие зацепление зубчатого колеса с рейкой или пары зубчатых колес, одно из которых инструментальное. В соответствии с этим, метод обкатки реализуется с применением инструмента двух типов:

- 1) шестеренчатого типа, к которому относятся, прежде всего, долбяки, а также шеверы, зубчатые хоны, притиры;
- 2) реечного типа, к которому относятся червячные фрезы, зубонарезные рейки, шлифовальные круги, воспроизводящие рейки.

Возможность получения эвольвентных профилей методом обкатки инструментом с прямолинейными режущими кромками является одним из замечательных свойств эвольвентного зацепления. Это позволяет зуборезный инструмент делать более технологичным и высокоточным, упрощает его заточку и правку. Метод обкатки с применением инструмента реечного типа находит в машиностроении преимущественное применение. Для предварительного формообразования таким методом применяется зубофрезерование, которое используется для нарезания цилиндрических прямозубых и косозубых зубчатых колес открытой конструкции наружного зацепления, а также червячных колес и других профильных поверхностей, имеющих равномерно распределенные выступы (шлицевые валики, храповые колеса, звездочки цепных передач и др.)

Инструментом для зубофрезерования является червячная профильная фреза. В осевом сечении червячная фреза имеет профиль, сопряженный при обкате с профилем нарезаемых зубьев. Червячная фреза для профилирования эвольвентных профилей в осевом сечении имеет прямобочную рейку с шагом  $t$  и углом наклона боковой грани, равным, чаще всего, углу зацепления нарезаемого колеса  $\alpha$  (рис. 8.4).

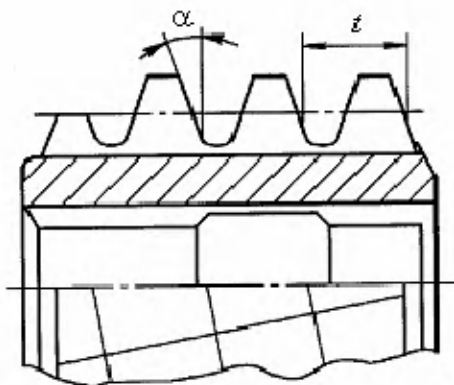


Рис. 8.4

*Осевое сечение червячной фрезы для нарезания эвольвентных профилей зубчатых колес*

По конструкции фреза представляет собой архимедов червяк с посадочным отверстием, разделенный стружечными канавками, перпендикулярными углу наклона

витка, на режущие зубья, затылованные для образования задних углов на режущих кромках и заточенные по передней поверхности.

Образование заднего угла зуба червячной фрезы методом затылования дает возможность сохранять постоянные параметры профиля исходной производящей рейки при переточках фрезы по передней грани. В противоположность долбякам червячную фрезу можно перетачивать без изменения параметров нарезанного профиля, руководствуясь только наличием полного затылованного профиля на утоненном переточенном зубе и его прочностными возможностями. Наружный диаметр червячной фрезы при переточках уменьшается.

На рисунке 8.5 показана схема работы зубофрезерного станка. При нарезании зубчатого колеса вращения червячной фрезы 1 и заготовки 2 должны быть согласованы между собой таким образом, чтобы линейная скорость производящей рейки по оси фрезы при ее вращении была равна линейной скорости перемещения нарезаемого зубчатого венца при его вращении. За один оборот однозаходной фрезы ее виток по оси перемещается на 1 шаг, на эту же величину должна повернуться обрабатываемая заготовка. Передаточное отношение между фрезой и заготовкой  $i = n_1 / n_2 = k / z$  обеспечивается кинематикой станка и механизмом согласования скоростей вращения 4 в виде набора зубчатых колес  $ac/bd$  или за счет электронных систем, где  $n_1$  — число оборотов фрезы, об/мин;  $n_2$  — число оборотов обрабатываемой заготовки, об/мин;  $k$  — число заходов фрезы;  $z$  — число обрабатываемых зубьев заготовки;  $a, b, c, d$  — зубчатые колеса делительного набора (гитара деления).

Для осуществления процесса зубофрезерования зубофрезерный станок в любом исполнении должен обеспечить следующие движения:

- вращение фрезерного шпинделя с регулируемой скоростью, обеспечивающей необходимую скорость резания;
- согласованное с вращением фрезы вращение стола с заготовкой зубчатого колеса для обеспечения нарезания необходимого числа зубьев  $z$ ;
- осевое перемещение фрезы, обеспечивающее требуемую рабочую подачу фрезы на один оборот заготовки и обработку зубчатого колеса по всей длине зуба;
- дополнительный поворот стола при нарезании косозубых зубчатых колес, обеспечиваемый настройкой дифференциального механизма;

- радиальное перемещение заготовки на глубину врезания до получения необходимой высоты зуба при однопроходной или многопроходной обработке.

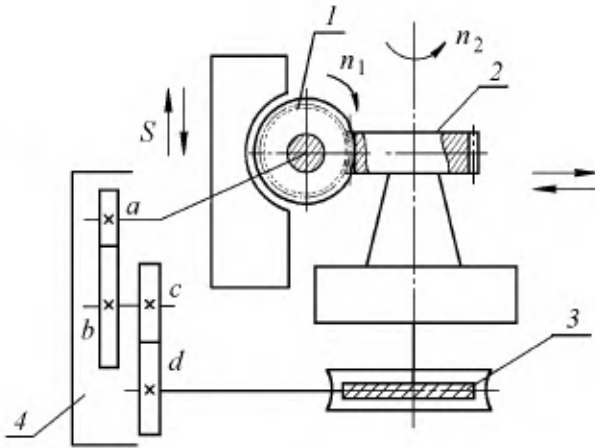


Рис. 8.5

Кинематическая схема узла вертикального зубофрезерного станка:

- 1 — червячная фреза; 2 — обрабатываемая заготовка; 3 — червячная передача;  
4 — набор зубчатых колес (гитара деления).

В зависимости от положения оси заготовки зубофрезерные станки разделяются на вертикальные и горизонтальные. Станки с вертикально расположенной осью заготовки имеют либо подвижный в радиальном направлении стол с обрабатываемой деталью (рис. 8.5), либо подвижную стойку с червячной фрезой.

Основное время одного перехода при зубофрезеровании червячной фрезой определяется по формуле

$$T_0 = \frac{L}{S} = \frac{(B + l_1 + l_2) \cdot z}{n \cdot S_0 \cdot k}, \text{ мин.},$$

где  $L$  — общая длина хода фрезерного суппорта, мм;  $S$  — рабочая подача фрезы, мм/мин;  $B$  — длина нарезаемого венца, мм;  $l_1$  — величина врезания фрезы, мм;  $l_2$  — величина перебега фрезы, мм;  $z$  — число нарезаемых зубьев;  $n$  — число оборотов фрезы, об/мин;  $S_0$  — осевая подача фрезы на оборот нарезаемого колеса, мм/об;  $k$  — число заходов фрезы.

Величину врезания для прямозубых зубчатых колес определяют по формуле

$$l_1 = \sqrt{t(D_{\text{ф}} - t)}, \text{ мм},$$

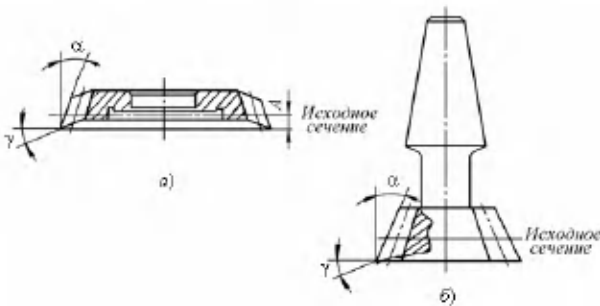
где  $t$  — глубина фрезерования, мм;  $D_{\text{ф}}$  — диаметр фрезы, мм.

Величину перебега для прямозубых колес принимают равной  $l_2 = 3-5$  мм.

**Зубодолбление** является основным методом обработки закрытых венцов цилиндрических блочных зубчатых колес, зубчатых колес с буртами, внутренних венцов планетарных редукторов и шлицевых соединений. При зубодолблении воспроизводится зацепление двух сопряженных зубчатых колес, одним из которых является режущий инструмент — долбяк.

Долбяк представляет собой коррегированное зубчатое колесо из инструментального материала, передняя поверхность которого смещена на величину  $A$  от исходного сечения с целью увеличения количества переточек долбяка. В исходном сечении размеры зуба долбяка соответствуют размерам исходного контура инструментальной рейки. Режущие зубья стандартного долбяка имеют передний угол  $\gamma = 5^\circ$ , задний угол по вершинам зубьев  $\alpha = 6^\circ$ , задний боковой угол по профилю зубьев  $\alpha_{\text{б}} = 2^\circ$ .

В основном долбяки изготавливают дисковой и хвостовой конструкции (рис. 8.6). Хвостовые долбяки применяются для профилирования внутренних венцов малого диаметра шлицевых соединений.



**Рис. 8.6**

*Конструктивное выполнение долбяков:*

*а — дисковый долбяк; б — хвостовой долбяк.*

Зубодолбежные станки преимущественно выпускаются вертикальной конструкции.

Горизонтальные зубодолбежные станки имеют оригинальную компоновку, позволяющую обрабатывать в горизонтальном положении валы любой длины, закрепляя их на подвижной бабке изделия с зажимом по передней обрабатываемой части и поджимом задним подвижным центром, обеспечивая выверку соосности детали с долбяком. При производстве валов ГТД повышенных длинных габаритов, а также деталей, имеющих далеко утопленные от торца шлицевые венцы, альтернативы горизонтально-долбежным станком нет.

Процесс зубодолбления со всеми необходимыми движениями детали и инструмента, а также режимами аналогичен процессу на станках вертикальной схемы.

Для выполнения процесса зубодолбления должны быть осуществлены следующие движения (рис. 8.7):

- вращения заготовки 1 и долбяка 2, согласованные между собой гитарой деления 3 или электронным механизмом;
- возвратно-поступательное движение долбяка от электродвигателя 4 с частотой, устанавливаемой коробкой скоростей 5. Величина хода долбяка настраивается механизмом 6. Скорость вращения инструмента настраивается гитарой круговой подачи 7;

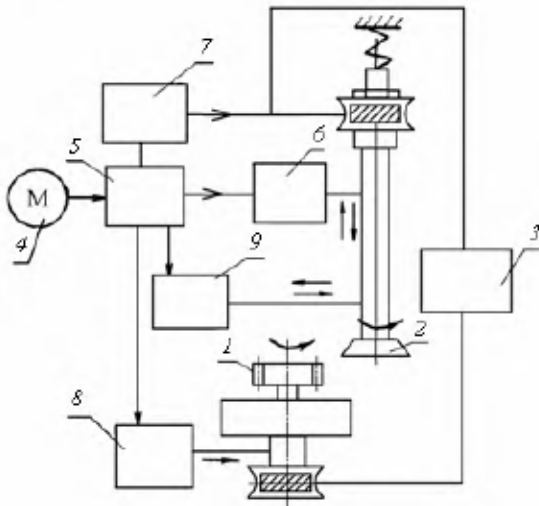


Рис. 8.7

Принципиальная структурная схема зубодолбежного станка

- радиальное врезание инструмента в заготовку, настраиваемое с помощью механизма радиального врезания и гитары радиальных подач 8;
- отвод шпинделя с долбяком на каждом обратном его ходе с помощью механизма отвода 9.

Основное время при зубодолблении определяется по формуле

$$T_0 = \frac{\pi \cdot m \cdot z}{n \cdot S} i + \frac{h_1}{n \cdot S_{\text{рад}}}, \text{ мин.}$$

где  $z$  — число зубьев нарезаемого колеса;  $m$  — модуль зубчатого колеса;  $n$  — число двойных ходов долбяка в мин;  $S$  — круговая подача, мм/дв. ход;  $S_{\text{рад}}$  — радиальная подача, мм/дв. ход;  $h_1$  — высота нарезаемого зуба, мм;  $i$  — количество рабочих проходов.

#### 8.4.2. Методы чистовой обработки цилиндрических зубчатых колес

Основной отделочной операцией зубчатых колес, подвергаемых химико-термической обработке и имеющих высокую поверхностную твердость по профилю зуба ( $\text{HRC} \geq 60$ ), является **зубошлифование**. С помощью процесса зубошлифования достигается высокая точность обработки (4–6 степень точности по ГОСТ 1643-81) и шероховатость поверхности в пределах  $Ra = 0,63\text{--}0,32$  мкм.

Для обработки цилиндрических зубчатых колес наружного зацепления преимущественное применение находит **метод обката**. При этом методе прямолинейные поверхности шлифовального круга при взаимном обкате с обрабатываемыми поверхностями образуют инструментальную рейку, теоретически сопряженную с обрабатываемым зубчатым колесом.

Существует **метод обкатного зубошлифования** с единичным и непрерывным делением. При первом методе обрабатывают одним кругом или двумя кругами два противоположных профиля зуба с последующим выводом инструмента и очередным делением на шаг или несколько шагов с помощью делительного механизма. Второй метод не имеет делительного механизма, и деление производится непрерывно без выведения инструмента из обрабатываемой детали при их взаимном обкатывании.

На рисунке 8.8 показан метод зубошлифования конусной частью дискового круга 2, воспроизводящего рейку исходного контура 3. Шлифовальный круг совершает быстрые возвратно-поступательные движения вдоль зуба

заготовки *1* и при взаимном обкатывании обрабатывает последовательно левый и правый профили, после чего происходит деление на следующий зуб.

Метод обладает большой универсальностью, простотой правки круга, достаточно высокой точностью и возможностью обрабатывать зубчатые колеса большого модуля и диаметра. Обработка производится с применением охлаждающей жидкости. Коническим двусторонним кругом работают станки модели 5М841 Московского завода шлифовальных станков. Станки, работающие данным методом, выпускают также фирмы «Нейлс» и «Хефлер» (Германия), «Рейсхауер» (Швейцария).

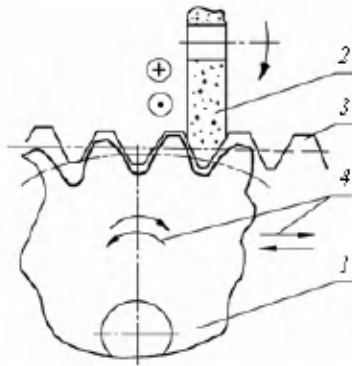


Рис. 8.8

*Схема зубошлифования конусной частью дискового круга:*

*1 — обрабатываемое зубчатое колесо; 2 — дисковый двусторонний конусный круг;  
3 — воображаемый производящий реечный исходный контур, образованный кругом;  
4 — движения обкатки и деление.*

Наиболее широко применяется метод **шлифования тарельчатыми кругами** с единичным делением (метод фирмы «МАОГ») и метод шлифования червячным абразивным кругом.

На рисунке 8.9 показана схема шлифования тарельчатыми кругами по двум методам.

1. Метод шлифования с наклоном оси шлифовального круга на угол  $\alpha = 15-20^\circ$ . Два шлифовальных тарельчатых круга образуют воображаемую производящую рейку с углом, равным углу зацепления обрабатываемого колеса или меньшим. Обкат производится с помощью обкатного ролика, диаметр которого равен диаметру начальной окружности в станочном зацеплении.

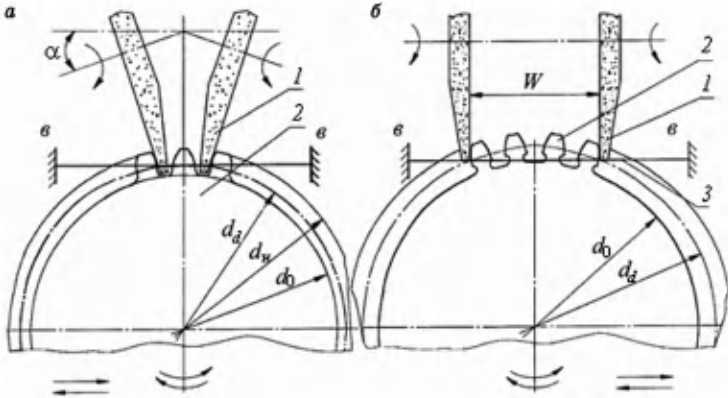


Рис. 8.9

Схема зубшлифования тарельчатыми кругами:

*a* — 15-градусный метод; *b* — 0-градусный метод (нулевое шлифование); 1 — обрабатываемое зубчатое колесо; 2 — тарельчатый шлифовальный круг; 3 — стальная натянутая лента (обкатная прямая);  $d_n$ ,  $d_0$  — диаметры обкатных роликов.

Для прямозубых зубчатых колес

$$d_n = d_d \cdot \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_{ш}}$$

Для косозубых зубчатых колес

$$d_n = \frac{m_n z}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha_{ш}}{\cos \alpha_0}\right)^2 - \sin^2 \beta}},$$

где  $d_n$  — диаметр обкатного ролика;  $d_d$  — делительный диаметр, равный  $m z$ ;  $\alpha_0$  — угол зацепления обрабатываемой детали;  $\alpha_{ш}$  — угол наклона кругов (угол шлифования);  $m_n$  — нормальный модуль;  $\beta$  — угол наклона зуба на делительном диаметре;  $z$  — число зубьев колеса.

Зубчатое колесо вместе с обкатным роликом на одной оси расположены на подвижной каретке и при ее возвратно-поступательном движении совершают обкатное движение по туго натянутой стальной ленте *v-v*. Кромка шлифовального круга, соприкасаясь с профилем зуба по хорде при обкате, обрабатывает его по всей высоте профиля. Для обработки зубчатого колеса по всей длине стол с обкатной кареткой совершает движение вдоль оси обрабатываемого колеса.

Шлифование производится без применения СОТС. При полном выходе кругов из детали производят деление для обработки очередной впадины. Шлифующая кромка кругов в процессе шлифования ощупывается, и производится компенсация ее износа вдоль оси вращения с дискретностью 1–2 мкм.

2. Метод шлифования с углом наклона оси шлифовального круга, равным нулю (нулевое шлифование). Плоскости, проходящие через режущие кромки двух шлифовальных кругов, отстоят друг от друга на величину общей нормали  $W$ . Обкатной (начальной) окружностью в данном случае является основная окружность с диаметром  $d_0 = m z \cos \alpha_0$  для прямозубых зубчатых колес и при  $\cos \lambda_{III} = 1$  диаметром основной окружности косозубого колеса:

$$d_0 = \frac{m_n z}{\sqrt{\left(\frac{1}{\cos \alpha_0}\right)^2 - \sin^2 \beta}}$$

Шлифовальный круг по сравнению с 15-градусным методом производит резание теоретически точкой. В результате нулевое шлифование имеет ряд преимуществ по сравнению с 15-градусным шлифованием:

1) обкатка по наименьшей (основной) окружности позволяет пройти кромкой круга профиль зуба при меньшем расходе обкатной каретки, благодаря чему значительно увеличивается число качаний в минуту;

2) увеличенная скорость качания и уменьшенная площадь контакта круга с профилем зуба позволяют производить обработку с меньшей теплонапряженностью и меньшим риском образования прижогов;

3) при движении круга вдоль зуба уменьшается величина его входа и выхода и возможно применение ускоренных ходов до процесса деления и после него;

4) наличие продольных рисок вдоль зуба в отличие от сетки при 15-градусном методе и возможность достижения меньшей шероховатости.

В итоге нулевое шлифование позволяет получить более качественную поверхность профиля зуба при повышении производительности обработки в 1,5–2 раза. Кардинальным преимуществом нулевого шлифования с точечным касанием шлифовального круга является возможность получения модифицированного профиля с наличием одновременно высотной и продольной бочкообразности.

Управление режущей кромкой круга вдоль его оси осуществляет гидравлическое копирное устройство, обеспечивая эволюцию кромки круга на каждом его качательном ходе по профилю зуба и по мере продвижения с рабочей подачей по всей длине зуба согласно задаваемым отклонениям по профилю и направлению зуба, перенесенным с увеличением на копии.

Станки для шлифования двумя тарельчатыми кругами модели 5A851 выпускает Московский завод шлифовальных станков, а модели SD-36X — фирма «МААГ» (Швейцария).

Недостатком всех методов шлифования тарельчатыми кругами является невозможность обработки зубчатых колес малого модуля ( $m < 2$  мм) и сравнительно низкая производительность.

Метод шлифования **червячным абразивным кругом** находит все более широкое применение. Сущность метода заключается в согласованном обкатывании шлифовального круга 2 в виде архимедова червяка с прямобочной рейкой в осевом сечении и обрабатываемого зубчатого колеса 1 (рис. 8.10). Для обработки по всей длине зуба деталь совершает возвратно-поступательное движение вдоль своей оси.

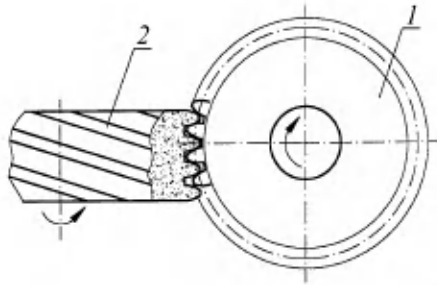


Рис. 8.10

Схема зубошлифования абразивным кругом:

1 — обрабатываемое зубчатое колесо; 2 — червячный абразивный круг.

Метод отличается наивысшей из всех методов обратного зубошлифования производительностью, может применяться в широком диапазоне модулей от 0,5 мм до 8 мм, причем мелко модульные зубчатые колеса могут быть обработаны по цельному материалу без предварительного профилирования. От выполнения по той или иной схеме кинематической связи между червячным абразивным кругом

и обрабатываемым зубчатым колесом зависят технологические возможности метода обработки.

На рисунке 8.11а показана традиционная схема кинематической связи по принципу «электрический вал». Синхронные электродвигатели М1 и М2 вращаются от одного генератора 3 со стабилизированной частотой. После разгона обороты двигателей М1 и М2 становятся строго одинаковыми, благодаря чему устанавливается теоретически настроенная кинематическая связь. Основной недостаток данной схемы заключается в запуске цикла обработки.

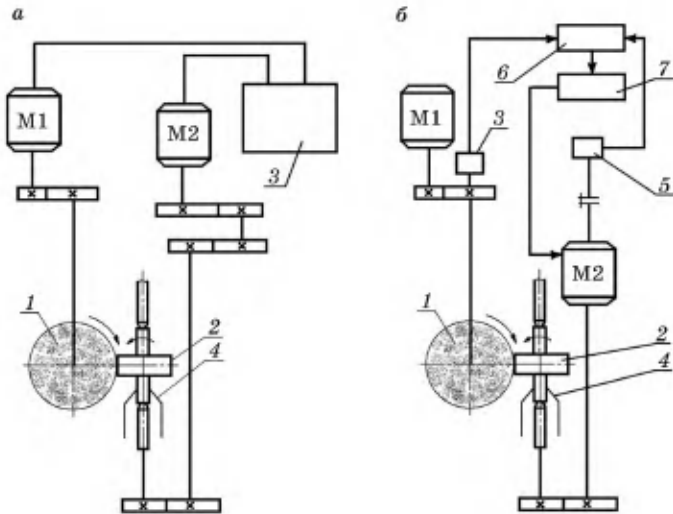


Рис. 8.11

*Кинематическая связь вращения червячного круга и обрабатываемого зубчатого колеса по схеме «электрический вал» (а) и с электронной связью (б)*

Перед запуском червячный круг 1 вводят в деталь и на незначительном боковом зазоре производят запуск круга, который свободно ведет деталь, вращающуюся в центрах. После набора оборотов и их стабилизации электродвигателями М1 и М2 включают зажимное устройство в виде панги 4, и при дальнейшей обработке червячный круг 1 и обрабатываемое зубчатое колесо 2 вращаются кинематически связано. При свободном вращении круг ведет зубчатое колесо по одной стороне и все погрешности в виде

разности шагов и биения профиля сказываются в дополнительных поворотах вокруг оси зубчатого колеса без существенного съема припуска. При зажиме панги мгновенное прекращение «рыскания» колеса вокруг своей оси в такт погрешностям вызывает съем части припуска в пределах величины погрешностей уже на первом обороте колеса. Повышенная теплонапряженность шлифования при этом на отдельных секторах зубчатого колеса с наибольшей погрешностью вызывает недопустимые тепловые повреждения, не удаляемые при последующем съеме припуска.

По системе связи круга с обрабатываемой деталью типа «электрический вал» работают станки модели 5Д833 Егорьевского станкостроительного завода и станки типа AZA фирмы «Рейсхауер» (Швейцария).

Более современные зубошлифовальные станки фирмы «Рейсхауер» (Швейцария) моделей RZ-300E, RZ-362, RZS и другие имеют электронную связь между цепями вращения круга и изделия (рис. 8.11б). Шлифовальный круг 1 приводится во вращение асинхронным двигателем М1, а зубчатое колесо 2 — серводвигателем постоянного тока М2. Угловой быстродействующий датчик 3, установленный соосно с вращением круга, посредством датчика 5, установленного соосно с серводвигателем М2, управляет синхронным со шлифованным кругом поворотом зубчатого колеса с помощью электронной системы управления с регулятором 6 и усилителем мощности 7.

Введение электронной связи, жестко синхронизирующей вращение червячного круга и обрабатываемого колеса, позволяет производить плавный запуск с распределением припуска по наиболее выступающим участкам профиля зуба путем дополнительного поворота зубчатого колеса в ту или иную сторону и последующего шлифования по ходам без резких выхватов материала и повышения теплонапряженности. Работающие на принципе электронной связи станки фирмы «Рейсхауер» по технологическим возможностям, производительности и качеству обработки значительно превосходят станки, работающие на принципе связи типа «электрический вал». На этих станках можно шлифовать деталь типа «зубчатый сектор» или «зубчатое колесо с перерывом зубчатого венца». Станки фирмы Рейсхауер дают возможность шлифовать модифицированный профиль зуба с продольной и высотной бочкообразностью.

В таблице 8.2 приведены характеристики основных методов зубошлифования при обработке цилиндрических зуб-

зубчатых колес из высоколегированных сталей типа 18Х2Н4МА и 12Х2Н4А.

Таблица 8.2

### Характеристики методов зубошлифования

Выходные параметры метода шлифования	Шлифование кругами			
	червячными	тарельчатыми		дисковыми
		$\alpha_n = 0^\circ$	$\alpha_n = 15^\circ$	
Степень точности по ГОСТ 1643-81	4-5	3-5	3-5	5-6
Шероховатость Ra, мкм	0,32-0,63	0,16-0,32	0,32-0,63	0,63-1,25
Относительное значение основного времени, %	100	400	600	300

Для окончательной отделки профилей зубьев цилиндрических зубчатых колес нашел широкое применение **процесс зубохонингования**. Зубохонингование осуществляется методом свободной обкатки без жесткой кинематической связи хона с обрабатываемым зубчатым колесом. Как правило, ведущим звеном является хон, ведомым звеном с подтормаживанием — обрабатываемое зубчатое колесо.

На рисунке 8.12 показана схема процесса зубохонингования. Абразивный инструмент — зубчатый хон 1, выполненный в виде косозубого зубчатого колеса с углом наклона зубьев  $\beta = 10-15^\circ$ , приводимый во вращение с регулирующими оборотами, находится в зацеплении и вращает обрабатываемое зубчатое колесо 2, установленное на оправке в центрах стола. Зубчатый хон и обрабатываемое колесо образуют винтовую пару с теоретически точечным контактом. Для обработки зуба по всей длине стол с обрабатываемым колесом совершает возвратно-поступательное движение. Для интенсификации процесса обработки зубчатое колесо может притормаживаться тормозным устройством 3.

Зубчатый хон изготавливают из абразивного зерна или микропорошка на эпоксидной, каучуковой или другой полимерной связке с последующим шлифованием профиля зуба на зубошлифовальном станке. Наиболее точной является односторонняя обработка с реверсированием направления вращения для обработки другой стороны зуба. В качестве охлаждающей жидкости применяется керосин с добавлением 20% индустриального масла или специальная СОТС.

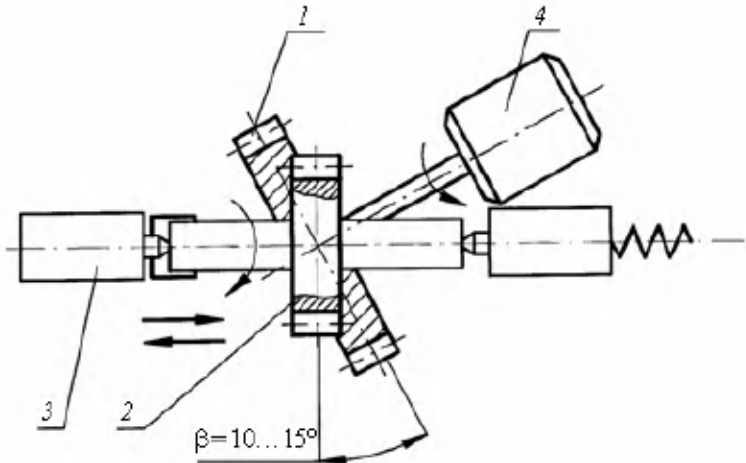


Рис. 8.12

Схема зубохонингования зубчатым хонем с наружными зубьями:

- 1 — зубчатый хон; 2 — обрабатываемое зубчатое колесо; 3 — тормозное устройство;  
4 — электродвигатель привода вращения хона.

Процесс зубохонингования не улучшает точностных параметров зубчатого колеса и применяется для снижения шероховатости поверхности профиля зуба путем снятия верхнего, наиболее поврежденного процессом шлифования или упрочнения слоя в пределах 0,01–0,02 мм. Процесс резания при зубохонинговании не может повредить поверхность зуба ввиду малой скорости резания и весьма незначительного съема металла (часто в пределах микронеровностей предшествующей обработки). Скорость резания равна

$$v_p = v_0 \cdot \sin\beta,$$

где  $v_0$  — окружная скорость хона;  $\beta$  — угол скрещивания осей между хонем и обрабатываемой деталью.

Так при диаметре хона 250 мм, частоте его вращения 1000 об/мин, угле скрещивания осей  $\beta$ , равном 10–15°, скорость резания при зубохонинговании будет находиться в пределах 2,5–3,5 м/с.

Профиль зуба наиболее ответственных высоконапряженных зубчатых колес подвергают обработке методом ППД (поверхностно-пластического деформирования). Чаще всего применяется дробеструйная обработка. Поток дроби, состоящей из чугунных или стальных шариков, ускоренный

воздушной струей или механическим путем, направляют на вращающийся зубчатый венец, установленный в специальной оправке.

Дробеструйная обработка восстанавливает микротвердость в поверхностном слое после зубошлифования, особенно на участках с измененной микроструктурой (поверхностные прижоги отпуска), и вносит благоприятные сжимающие остаточные напряжения. Такая обработка не оказывает существенного влияния на шероховатость исходной поверхности и точность профиля, увеличивая нагрузочную способность и ресурс нитроцементированных и цементированных зубчатых колес в 1,5–3 раза. Часто дробеструйная обработка профилей зубьев является заключительной, но после нее целесообразно вводить процесс зубохонингования.

При этом снятие поверхностного слоя в пределах 0,01–0,015 мм, в которых могут оказаться участки с повышенным уровнем плотности дислокаций, провоцирующие зарождение поверхностных микротрещин, положительно влияет на повышение контактной усталостной прочности, зарождение начальных микротрещин и очагов образования питтинговых лунок.

#### 8.4.3. Особенности обработки конических зубчатых колес

Особенности обработки конических зубчатых колес связаны с особенностями геометрии элементов зубчатого венца и профиля, которые заключаются в следующем.

1. В коническом зубчатом колесе нет постоянного шага и модуля. Для расчета и измерения параметров зуба задается наибольший модуль по сечению дополнительного заднего конуса, перпендикулярного образующим делительного конуса. В данном сечении коническую передачу можно с незначительной погрешностью заменить на эквивалентную цилиндрическую с радиусом делительной окружности, равным

$$r_{д.э\text{кв}} = \frac{r_{д}}{\cos\varphi}.$$

2. Профиль впадины зуба конического колеса по мере приближения к вершине конуса непостоянен и уменьшается в размерах, пропорционально уменьшению модуля и шага. В связи с этим невозможно обработать с приемлемой точностью впадину конического зубчатого колеса методом копирования.

Для достоверного измерения параметров профиля зуба необходимо иметь точные базовые поверхности, которыми

являются передний и задний конус. В связи с этим нужно точно выполнять конусные поверхности, обеспечивая с заданной точностью размер наружного диаметра  $D_H$ , расстояние  $A$  от посадочного базового торца до пересечения конусов и расстояние  $H$  от базового торца до вершин конусов (рис. 8.13).

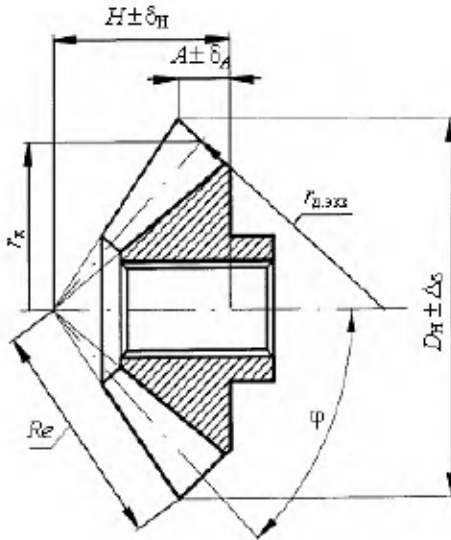


Рис. 8.13

*Коническое зубчатое колесо*

Задание исходного производящего контура, согласно геометрии эквивалентного цилиндрического колеса по дополнительному конусу, не определяет однозначно геометрию и другие качественные показатели будущего зацепления конических зубчатых колес. Основным в данном зацеплении является форма и расположение пятна контакта. В свою очередь, пятно контакта зависит от применяемой схемы обработки по плоскому или плосковершинному производящему колесу, заложенной в конструкции станков. Большинство станков для предварительной и окончательной обработки прямозубых конических колес работают по более простой конструктивной схеме плосковершинного производящего колеса, обеспечивая локализацию пятна контакта по высоте зуба, так как по профилю зуба образуется естественная (присущая методу обработки) высотная

бочкообразность. С уменьшением чисел зубьев обрабатываемого конического колеса величина отклонения на головке и ножке зуба от теоретического профиля увеличивается. По этой причине высоконагруженные скоростные конические передачи, обработка которых производится по схеме плосковершинного производящего колеса, не должны иметь в паре оба зубчатых колеса с малым числом зубьев ( $z < 20$ ).

В связи с тем, что жесткость конического зуба по длине неравномерна, пятно контакта конических колес смещается под нагрузкой в более жесткую часть, т. е. к наружному конусу. Для исключения этого явления при изготовлении конической пары пятно контакта смещают ближе к внутреннему конусу путем преднамеренного уменьшения толщины зуба на наружном конусе. С учетом жесткости корпусов и других элементов передачи опытным путем добиваются распространения пятна контакта в рабочих условиях при нагрузке по всей длине зуба.

Обработку прямозубых конических колес производят методом обкатки, за исключением предварительной прорезки впадин зубчатых колес с модулем 3 мм и выше методом копирования с единичным делением модульной дисковой фрезой на специальном станке.

Чистовое профилирование прямозубых конических колес производится преимущественно методом зубострогания по схеме плосковершинного производящего колеса (рис. 8.14). Зубострогальные резцы 4, расположенные на обкатной люльке 1, воспроизводят одну впадину обрабатываемого производящего колеса 2, вместе с люлькой совершая обкатное движение в зацеплении с обрабатываемым колесом 3. Резцы с помощью кулисного механизма 7 совершают возвратно-поступательные движения вдоль зуба. Траектория движения режущих кромок резца лежит в плоскости, перпендикулярной к оси вращения люльки. Тем самым производящее колесо становится не плоским, а конусным с углом ( $90^\circ - \alpha_n$ ), где  $\alpha_n$  — угол ножки нарезаемого зуба. Для того чтобы производящее колесо было плоское и нарезаемый профиль зуба теоретическим, движение резцов должно осуществляться под углом ( $90^\circ + \alpha_n$ ) к оси вращения люльки. Это значительно усложняет конструкцию станка.

На всех станках для обработки профилей зубьев конических зубчатых колес, в том числе и зубошлифовальных, деление на очередной зуб производится через элементы кинематической схемы, участвующих в обкате. Точность

такой схемы деления ниже, чем с применением делительных дисков при обработке цилиндрических зубчатых колес. Окончательная обработка профилей зубьев ответственных конических зубчатых колес производится методом зубошлифования.

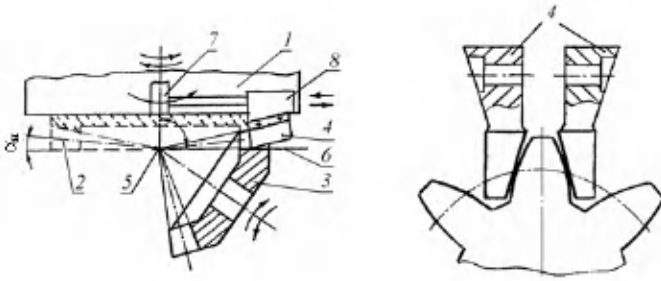


Рис. 8.14

*Обработка прямозубых конических колес по схеме плосковершинного производящего колеса:*

1 — обкатная люлька; 2 — воображаемое производящее колесо; 3 — обрабатываемое зубчатое колесо; 4 — зубострогальные резцы; 5 — центр станка; 6 — траектория движения режущей кромки резца; 7 — кулисный механизм; 8 — резцедержатель.

Известны три *схемы зубошлифования прямозубых конических колес.*

1. Метод шлифования тарельчатыми кругами по схеме плоского колеса с компенсацией износа режущих кромок кругов — метод фирмы «МАОГ» (Швейцария). Схема метода универсальна, обладает высокой точностью, но низкой производительностью и осуществляется на станках сложной конструкции. Метод нашел ограниченное применение и применяется в основном для изготовления эталонных колес.

2. Метод шлифования плоской поверхностью шлифовального круга большого диаметра без его продольного движения вдоль зуба. Метод отличается повышенной теплонапряженностью процесса шлифования ввиду увеличенной площади контакта, что снижает качество поверхностного слоя. Существует также ограничение по длине зуба в связи с образованием радиусного перехода от профиля к дну впадины зуба, являющегося отпечатком радиуса применяемого круга. Положительным свойством метода является возможность шлифования бочкообразного зуба в продольном направлении за счет придания плоскости круга некоторой конусности. Обработка осуществляется на станках моделей 26TS, 60TS фирмы «Геденрейх и Гарбек» (Германия).

3. Метод шлифования конусной частью двух дисковых кругов с их продольным движением вдоль зуба. Метод реализован на отечественных станках модели 5870М и МА-90 конструкции ЭНИМС и является основным для окончательной обработки профилей зубьев прямозубых конических колес. На рисунке 8.15 показана схема шлифования двумя конусными кругами.

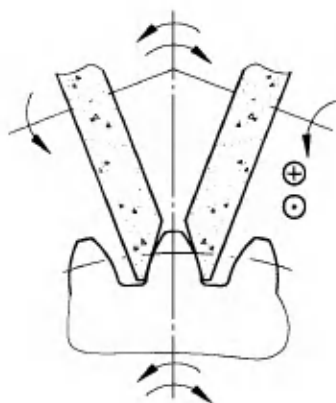


Рис. 8.15

*Схема шлифования профиля зуба прямозубых конических колес конусной частью 2-х кругов*

В своей основе данная схема полностью соответствует изображенной на рисунке 8.14 схеме обработки плосковершинным производящим колесом, но место резцов занимают шлифовальные круги. Иногда производят модернизацию зубострогальных станков, устанавливая вместо резцов шлифовальные круги и механизмы правки, обеспечивающие необходимое пространственное расположение режущей части шлифовального круга.

Профилирование конических зубчатых колес с круговым зубом производится методом обката преимущественно по схеме плосковершинного производящего колеса. Предварительная обработка производится исключительно резцовой головкой, задающей контур одной впадины воображаемого производящего колеса. Радиус кривизны зуба однозначно определяется радиусом резцовой головки.

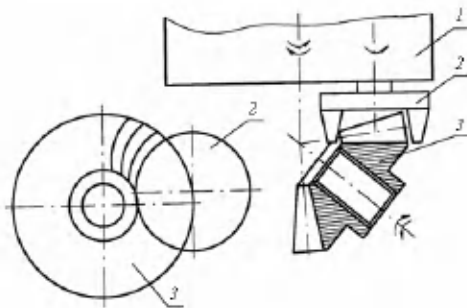
Изготовление высоконагруженных конических зубчатых передач с круговым зубом представляет собой одну из самых сложных задач в области зубообработки и требует наличия высококвалифицированных специалистов как по

расчету наладочных установок станка, так и по самому процессу наладки и изготовления зубчатой пары. Расчет наладок производится с применением ЭВМ.

**Обработку конической пары с круговым зубом** можно осуществлять в различных вариантах. Одним из наиболее целесообразных является верототно-односторонний. Он осуществляется двусторонней зуборезной головкой с уменьшенным разводом резцов. Колесо обрабатывается с одной установки раздельно по каждой стороне, но без изменения наладочных установок станка.

После обработки одной стороны колесо поворачивают на необходимый угол и обрабатывают другую сторону до получения нужной толщины зуба. Шестерню обрабатывают односторонним методом по выпуклой и вогнутой сторонам раздельно с индивидуальной наладкой для обеспечения нужного пятна контакта. Для изготовления одной конической пары с круговым зубом с обеспечением постоянных наладок требуется три станка. Переналадка станков является трудоемкой операцией и требует высокой квалификации обслуживающего персонала.

Шлифование конических зубчатых колес с круговым зубом производят по схеме, представленной на рисунке 8.16. Вместо резцовой головки 2 устанавливается чашечный шлифовальный круг. Геометрические размеры, соответствующие одной впадине производящего плосковершинного колеса, придают кругу правочные механизмы, правящие алмазы которых настраиваются по расчетным данным с высокой точностью.



**Рис. 8.16**

*Обработка конических зубчатых колес с круговым зубом по схеме плосковершинного производящего колеса:*

- 1 — обкатная люлька станка; 2 — резцовая головка (шлифовальный круг);  
3 — обрабатываемое зубчатое колесо.

Методы зубошлифования конических колес с круговым зубом и механизмы станка позволяют подгонять заранее заданную форму локализованного пятна контакта в парном зацеплении. Шлифование производится на распространенных станках модели 463 фирмы «Глисон» (США). Более современным является программируемый с электронной системой управления станок модели 463СНС фирмы «Глисон». Станок модели G-30 фирмы «Клингельнберг» (Германия) имеет кардинально новую кинематику без обкатной люльки и является наиболее прогрессивным в настоящее время.

## 8.5. ОБРАБОТКА ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Предварительное формообразование производится преимущественно методом обката. Обработка крупных шлиц производится методом зубофрезерования червячными фрезами, внутренних венцов – методом зубодолбления и, в отдельных случаях, методом протягивания.

Процесс фрезерования и долбления шлиц практически не отличается от станочных процессов обработки зубчатых колес, кроме геометрии инструмента.

Для фрезерования методом обката прямобочных шлиц червячная фреза имеет сложный профиль, близкий к эвольвентному, каждая точка которого взаимосопрягаема при обкате с точками прямобочных шлиц вала (рис. 8.17). Червячная фреза проектируется индивидуально для каждого шлицевого вала с новой геометрией шлицевого венца.

Особенностью обрабатываемых валов со шлицевыми элементами является их большая длина и применение специальных высоколегированных труднообрабатываемых материалов. При фрезеровании протяженных прямобочных шлиц на шлицефрезерном станке основной технологической проблемой является обеспечение стойкости червячной фрезы.

Окончательная обработка ответственных шлицевых соединений производится шлифовальными кругами исключительно методом копирования. Точность в шлицешлифовальных станках обеспечивается методом правки и заложена в конструкции правочного механизма. При шлифовании эвольвентных шлиц валов существует *4 метода правки абразивных кругов* (рис. 8.18).

1. Правка по профильным копирам увеличенных размеров с помощью пантографного устройства (рис. 8.18а).

2. Правка с заменой эвольвентных профилей с углом зацепления  $30^\circ$  участком окружности (рис. 8.18б).

3. Правка с заданием траектории относительного движения правящей кромки алмаза или дискового алмазного ролика по любому профилю электронной системой с ЧПУ (рис. 8.18в).

4. Правка с помощью вращающегося профильного алмазного ролика (рис. 8.18г).

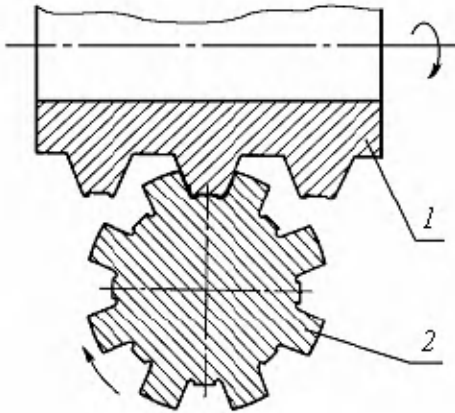
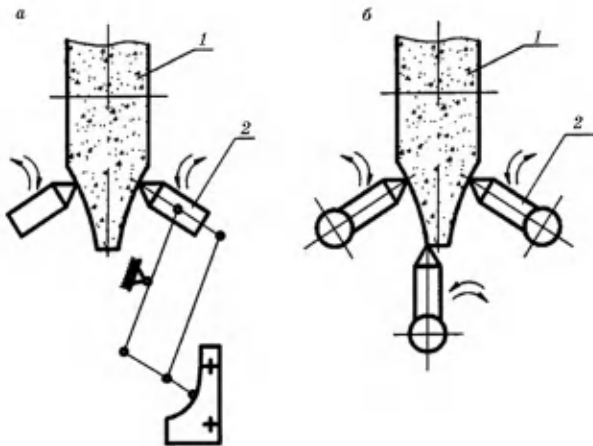


Рис. 8.17

Схема нарезания прямобочных шлиц валов методом обката червячной шлицевой фрезой:

1 — червячная шлицевая фреза; 2 — обрабатываемая заготовка.



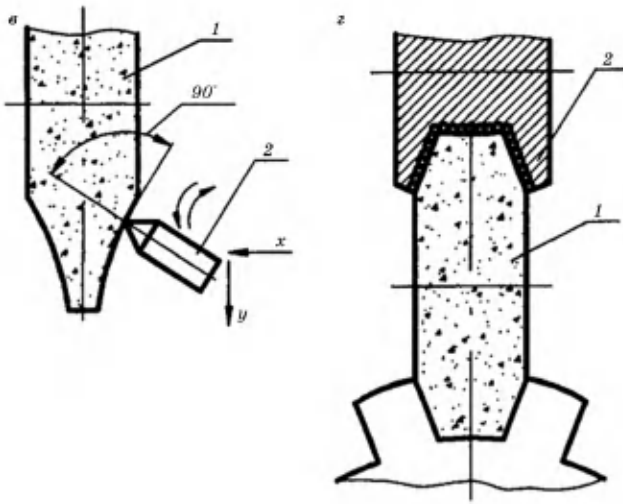


Рис. 8.18

*Методы правки шлифовального круга при шлифовании шлиц:*

*a* — по копирам; *б* — заменой эвольвенты окружностью; *в* — по программе;  
 2 — профильным алмазным роликом; 1 — шлифовальный круг; 2 — правящий алмазный инструмент.

**Метод 1** (рис. 8.18*а*) применяется на станках устаревшей конструкции. Правка производится с выходом круга на позицию правки. Управление правкой производят вручную. Изготовление шаблонов на конкретный профиль весьма трудоемко.

**Метод 2** (рис. 8.18*б*) широко применяется. Один или два боковых алмаза, в зависимости от модели станка, и один перпендикулярный достаточно легко настраиваются на расчетный для конкретного профиля радиус. Правочные механизмы установлены на шлифовальной головке, благодаря чему правка и компенсация размера производятся автоматически во время цикла обработки. Недостатком метода является отсутствие механизма для правки радиусов на круге, обеспечивающих радиусный переход от профиля зуба к дну впадины. Данным методом правки оснащены шлицешлифовальные станки фирмы «КАПП» и фирмы «Фритц Вернер» (Германия).

**Метод 3** (рис. 8.18*в*) наиболее универсален и позволяет одной алмазной иглой или дисковым алмазным роликом по программе заправить любой профиль, в том числе с закруглением радиусов на круге. При правке одновременно

работают 3 координаты, обеспечивающие линейные взаимоперпендикулярные перемещения правящей кромки и поворот ее в перпендикулярное к профилю положение. Недостатком при правке алмазной иглой является меньшая производительность и повышенный износ правящего алмаза. Вариант с применением дискового вращающегося алмазного ролика значительно повышает стойкость правящего инструмента и не требует применения третьей координаты. Системой правки по программе оснащены станки фирмы «Реформ» (Германия) и модели МШ396 Московского станкостроительного завода.

**Метод 4** (рис. 8.18*г*) является наиболее точным, производительным и широко применяемым при глубинном шлифовании. Недостаток метода — неуниверсальный, сложный и дорогостоящий правящий инструмент.

## **8.6. ПРОГРЕССИВНЫЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС**

В связи с необходимостью постоянно повышать качественные показатели двигателей и их надежность за счет повышения нагрузочной способности и качества поверхностного слоя ответственных деталей, особое значение имеют разрабатываемые прогрессивные методы, а также нетрадиционные специальные методы, решающие кардинально те или иные проблемы, но имеющие некоторые препятствия для промышленного внедрения. Проблемным вопросом при чистовой обработке зубчатых колес является повышение качества поверхностного слоя после процесса зубошлифования путем уменьшения теплонапряженности процесса резания.

Существенное повышение точности обработки профиля зуба ограничивается традиционными методами обработки и связанными с ними конструкциями станков.

Проблемным вопросом является изготовление цельных облегченных блочных цилиндрических зубчатых колес с наличием закрытого венца, окончательная отделка профилей зубьев которого методом зубошлифования представляет большие трудности.

### **8.6.1. Профильное шлифование наружных и внутренних венцов методом копирования однослойным эльборовым инструментом**

Освоение технологии изготовления высокоточного профильного эльборового инструмента позволяет значительно упростить кинематику зубошлифовальных и

шлифешлифовальных станков. Инструмент представляет собой металлический корпус с выполненным на нем точным профилем, идентичным профилю шлифуемого зубчатого венца, на который гальваническим методом наносят один слой эльборового зерна. Точность профиля может быть в пределах 0,002–0,003 мм, что в совокупности с электронным делительным механизмом делает метод копирования одним из самых точных в зубообработке.

Высокая стойкость эльбора при шлифовании легированных закаленных сталей позволяет обработать большие партии деталей до принудительного съема изношенного круга и дальнейшего использования точного корпуса для нового нанесения режущего слоя.

Кроме высокой точности *метод отличается:*

- высокой производительностью и возможностью повысить ее применением режимов глубинного шлифования на повышенных скоростях вращения инструмента;
- высоким качеством поверхностного слоя ввиду повышенной теплопроводности инструмента, сопоставимой с теплопроводностью материала обрабатываемой заготовки и, в связи с этим, значительного отвода тепла в охлаждаемый инструмент;
- возможностью введения высотной бочкообразности за счет модификации профиля инструмента и продольной за счет эволюции круга по высоте по мере движения вдоль зуба;
- отсутствием правочного механизма, упрощением схемы станка и возможностью полной автоматизации процесса обработки с помощью программируемых систем управления.

Недостатком метода является необходимость для каждого зубчатого венца новой геометрии иметь свой индивидуальный инструмент и ограниченные возможности в получении малой шероховатости.

Метод эльборового профильного шлифования имеет большую перспективу применения при изготовлении высокоточных зубчатых колес наружного зацепления и, особенно, при шлифовании малогабаритных шлицевых венцов с внутренним зубом.

Оборудование для обработки наружных и внутренних венцов зубчатых зацеплений, а также сам профильный эльборовый инструмент первой начала выпускать фирма «КАПП» (Германия).

### 8.6.2. Глубинное шлифование эвольвентных зубчатых колес со специальной формой зуба

Перспективным направлением является применение достижений в области глубинного шлифования при обработке отдельных видов зубчатых зацеплений.

Предварительную и окончательную обработку зубчатых колес маслонасосов с циклоидальной формой зуба целесообразно производить методом глубинного шлифования с правкой сложного профиля циклоиды с помощью алмазного правящего ролика (рис. 8.19). Изготовление точного правящего ролика с циклоидальным профилем не представляет больших затруднений.

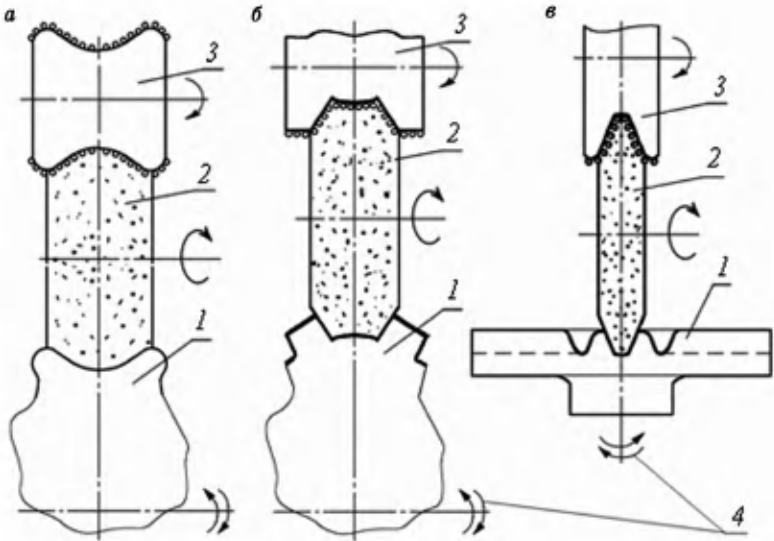


Рис. 8.19

*Обработка зубчатых профилей методом глубинного шлифования:*

*а* — циклоидальный профиль шестерен маслонасоса; *б* — прямобочные шлицы;

*в* — торцевые шлицы (шлицы Хирта); 1 — обрабатываемая заготовка;

2 — шлифовальный круг; 3 — алмазный правящий ролик; 4 — движение деления.

Механизм же правки абразивного круга по циклоидальному профилю весьма сложен и может иметь значительные погрешности. При этом как алмазный ролик, так и правочный механизм выполняются для одного профиля с определенными параметрами. В случае применения алмазного ролика полностью автоматизируется цикл обработки.

Обработку прямобочных шлиц большой протяженности целесообразно производить методом глубинного шлифования. Предварительное профилирование с непрерывной правкой круга в процессе резания (рис. 8.19б) производительней зубофрезерования в несколько раз. Окончательная обработка в режиме глубинного шлифования кругом большого диаметра с пониженной твердостью (до М1, М2) обеспечивает высокое качество поверхности и высокую точность.

Обработку торцевых шлиц (шлиц Хирта) на деталях из труднообрабатываемых жаропрочных и титановых сплавов производят методом глубинного шлифования (рис. 8.19в). Достигается высокая точность торцевых шлиц и полная автоматизация процесса обработки за исключением поставки и съема детали.

Обработку циклоидального профиля можно производить на станке типа ЛШ-220 Липецкого станкостроительного завода, обработку прямобочных шлиц длинных валов и шлиц Хирта — на станках типа ЛШ-262, ЛШ-265 (ЛСЗ). Аналогичное оборудование выпускают фирмы «Элб-шлиф», «Блом» (Германия) и «Мегерле» (Швейцария).

При обработке зубчатых профилей применение профильных алмазных правящих роликов целесообразно в том случае, если обрабатываемый профиль протяженный и глубинное шлифование производится с непрерывной правкой кругами большого диаметра (до  $\varnothing 500$ ).

Внедрение массовой высокопроизводительной обработки поверхностей сложной формы также целесообразно с применением профильных алмазных роликов.

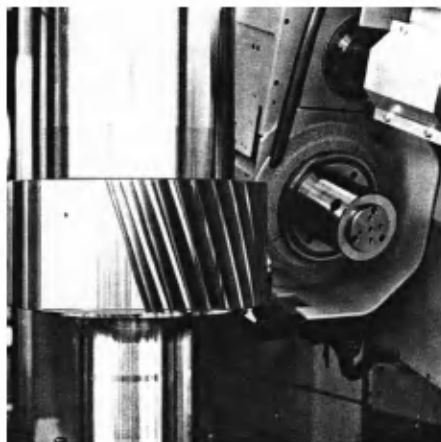
При изготовлении разнообразных зубчатых профилей деталей ГТД малой серии более прогрессивным и экономичным становится применение универсальной правки абразивных кругов по программе дисковым алмазным роликом упрощенной конструкции. Все современные зубошлифовальные станки, работающие методом копирования с применением кругов на керамических и бакелитовых связках, оснащаются автоматическим правящим устройством с дисковым алмазным роликом. При этом в современном машиностроении находят преимущественное применение техпроцессы зубошлифования именно с применением абразивных кругов, восстанавливаемых по профилю с помощью алмазной правки.

Выпущены специальные зубошлифовальные станки, работающие методом копирования с применением абразивных кругов на керамических связках, управляемых по

необходимому профилю универсальными дисковыми алмазными роликами. К таким станкам относятся «Опал 80» фирмы «Клингельнберг» (Германия), «Р600G» фирмы «Глисон», «Пфаутер» (США) и другие.

Эти зубошлифовальные станки с ЧПУ нового поколения обладают высокой точностью и производительностью, оперативной возможностью обработать зубчатые колеса с любым профилем, затрачивая минимальные средства на подготовку производства.

Такая универсальность обеспечивается заменой лезвийных методов профилирования зубчатых венцов на обработку их методом глубинного шлифования с применением специальных высокопористых кругов повышенной твердости и стойкости. На рисунке 8.20 приведен пример формообразования зубчатого колеса на станке «Опал 80».



**Рис. 8.20**

*Профилирование зубчатого венца взамен лезвийных методов обработки в режиме глубинного шлифования. Станок ОПАЛ-80 (Германия)*

Все зубошлифовальные станки, работающие методом копирования (типа «Опал-80»), в базовом исполнении предназначены для обработки цилиндрических зубчатых колес наружного зацепления. Для обработки внутренних венцов прилагаются приставки пониженной жесткости, затрудняющие обработку внутренних венцов в режиме глубинного шлифования вместо лезвийных методов. Это актуально особенно при обработке косозубых венцов (в том числе и шевронных), зубодолбление которых также проблематично.

Стремление унифицировать обработку наружных и внутренних венцов без переналадки с применением режима глубинного шлифования для профилирования привело к разработке универсальной схемы с жесткой шлифовальной головкой, обеспечивающей обработку наружных и внутренних зубчатых венцов.

Схема модернизации МОЦ «Горизон3» (Италия), имеющего все необходимые движения для обработки зубчатых зацеплений, приведена на рисунке 8.21. Наличие поперечной координации «Х» дает преимущество этой схеме, обеспечивая обработку в разгон протяженных шпоночных лазов муфт.

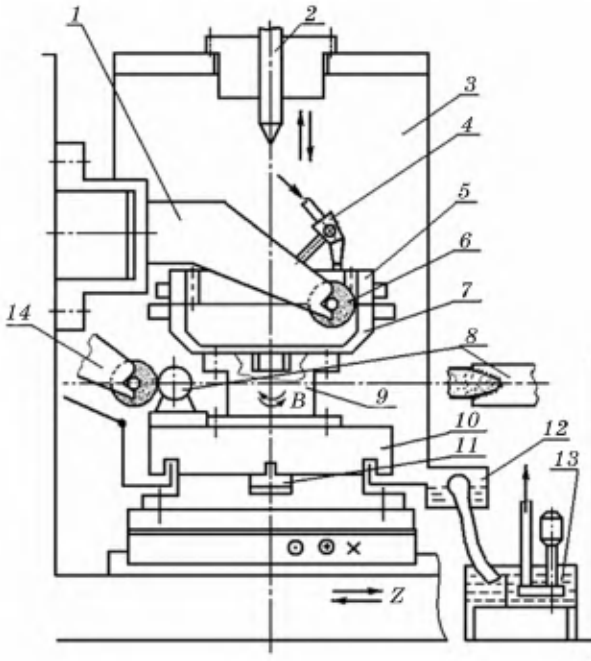


Рис. 8.21

Схема модернизированного МОЦ «Горизон3» для шлифования профилей зубчатых зацеплений:

- 1 — сменная шлифовальная головка; 2 — подвижный центр; 3 — ограждение;  
 4 — сопло для подвода СОТС; 5 — обрабатываемая заготовка; 6 — шлифовальный круг;  
 7 — рабочее приспособление; 8 — правящий алмазный ролик; 9 — подставка;  
 10 — вращающийся стол; 11 — датчик угловых перемещений; 12 — сборник СОТС;  
 13 — бак СОТС; 14 — позиция правки.

### 8.6.3. Зубохонингование зубчатыми хонами с внутренним зацеплением

Фирма «Фесслер» (Швейцария) разработала перспективный метод зубохонингования зубчатыми хонами с внутренними зубьями (рис. 8.22) в противоположность традиционному выполнению хонов с наружными зубьями (рис. 8.12). Хон с внутренними зубьями имеет следующие преимущества: более прочный на изгиб внутренний зуб, большой коэффициент перекрытия, простой метод изготовления прессованием по точному зубчатому колесу. Зубохонингование по методу «Фесслер» производится на станке с автоматическим протеканием цикла обработки.

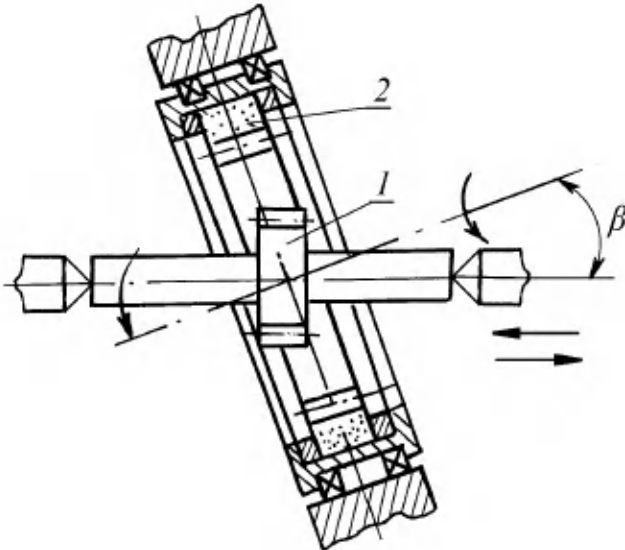


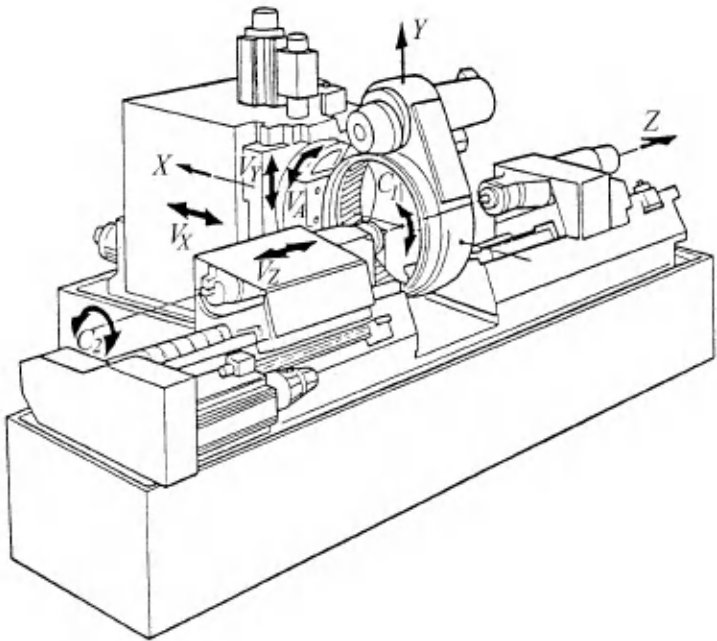
Рис. 8.22

Схема зубохонингования хонем с внутренним зубчатым венцом:

1 — обрабатываемое зубчатое колесо; 2 — абразивный хон с внутренним зубчатым венцом.

Возможна периодическая правка зубчатого хона с помощью инструментального алмазного зубчатого колеса, установленного соосно с обрабатываемым или вместо него на оправке.

Зубохонингование инструментом с внутренним зубчатым венцом при введении электронной кинематической связи между обрабатываемым зубчатым венцом и хонмом дает возможность исправлять погрешность профиля и снять значительный припуск в противоположность зубохонингованию при свободном обкате. На рисунке 8.23 приведена компоновочная схема станка для зубохонингования.



**Рис. 8.23**

*Компоновочная схема станка для зубохонингования хонмом с внутренним венцом*

#### 8.6.4. Методы обработки профилей зубьев закрытых венцов двухвенцовых цилиндрических зубчатых колес

Ввиду неэффективности применения процесса притирки профилей зубьев закрытого венца цельных двухвенцовых зубчатых колес их делают сборными. При этом усложняется технология изготовления, понижается надежность блочного зубчатого колеса и значительно (до 30%) увеличивается вес.

Изготовление цельных блочных зубчатых колес с приемлемой точностью является актуальной задачей. В связи

с этим разработан метод химико-механической обработки профилей зубьев цилиндрических зубчатых колес путем усовершенствования метода приработки зубчатых колес в парном зацеплении. Сущность метода заключается во взаимной обкатке в агрессивной среде обрабатываемого и инструментального колеса, неподверженного воздействию среды. Образующаяся на поверхности обрабатываемого зубчатого колеса под воздействием технологической среды окисная пленка в контакте с инструментальным колесом разрушается и процесс идет постоянно со съемом материала. В качестве инструмента применяются точно отшлифованные и хромированные зубчатые колеса. Технологическая жидкость состоит из воды (90%) и активных веществ — перекиси водорода, триэтаноламина, щавелевой, серной и олеиновой кислот. На рисунке 8.24 показана схема установки для химико-механической обработки.

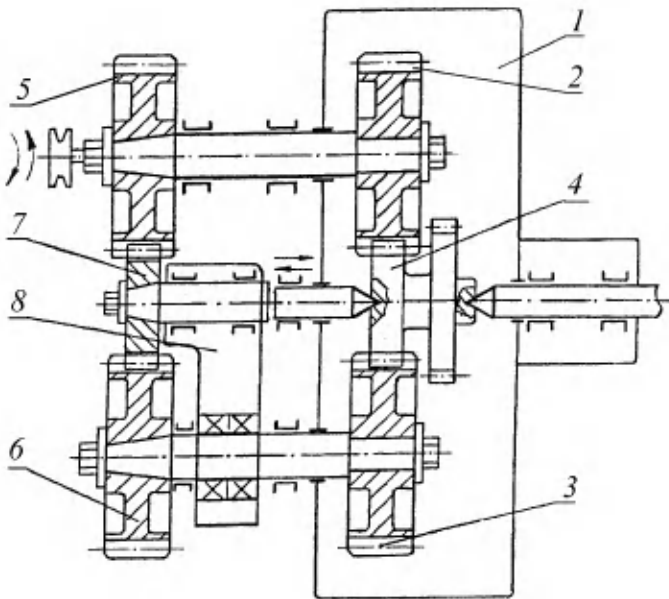


Рис. 8.24

*Схема химико-механической обработки двухвенцовых цилиндрических зубчатых колес:*

1 — рабочая ванна; 2, 3 — инструментальные зубчатые колеса; 4 — обрабатываемое зубчатое колесо; 5, 6 — эталонные зубчатые колеса; 7 — промежуточное нагрузочное зубчатое колесо; 8 — нагрузочное устройство.

Обрабатываемый венеч зубчатого колеса 4 находится в зацеплении с двумя инструментальными зубчатыми колесами 2 и 3, валы которых замыкаются зацепляющимися эталонными зубчатыми колесами 5, 6 и 7 с нагрузочным устройством 8, расположенным в эталонной коробке. Привод осуществляется посредством регулируемого электродвигателя постоянного тока от одного из эталонных колес.

Методом химико-механической обработки можно снять с нитроцементированной поверхности профилей зубьев припуск в пределах 0,2 мм, заменив зубошлифование. При этом независимо от любой исходящей шероховатости, реально получаемые поверхности профилей зубьев имеют шероховатость  $Ra = 0,16-0,2$  мкм, что возможно только методом зубохонингования.

Недостатками метода химико-механической обработки являются:

- малая стойкость технологического раствора, выражающаяся в ослаблении интенсивности съема материала;
- вредное воздействие компонентов раствора на обслуживающий персонал;
- трудность утилизации отработавшего раствора;
- необходимость выполнения оснастки и оборудования из материалов, не подверженных прогрессирующему разъеданию технологическим раствором.

Точностные параметры обработанных профилей со съемом значительных припусков находятся на уровне 7 степени точности по ГОСТ1643-81, что для современных ГТД недостаточно. Точностные параметры требуется выполнять в пределах степеней точности 6-5-5, 5-4-4. Для высокоточного формообразования зубчатого венца со снятием основного припуска должна быть введена специальная операция, например, точного зубодолбления инструментальной твердоплавкой рейкой на современном станке с ЧПУ.

Отделочные методы, понижающие шероховатость поверхности должны снимать минимальный припуск, не нарушая полученных точностных параметров профиля зуба. Процесс химико-механической обработки, претендующий на роль отделочного процесса при снятии минимального припуска, но имеющий ряд существенных недостатков, может быть заменен на более приемлемый процесс зубохонингования на параллельных осях. В этом случае в схему установки (рис. 8.25) вносятся изменения. Привод реверсируемого регулируемого по оборотам вращения с помощью двигателя 6 устанавливается со стороны обрабатываемого венца 4,

находящегося в зацеплении с инструментальными колесами 2, 3, на оси которых установлены тормозные нагрузочные устройства. Для варьирования параметрами корригированных хонов, инструментальные бабки должны быть подвижными в поперечном направлении (рис. 8.23). Вместо инструментальных колес устанавливаются прямозубые зубчатые хоны 2 и 3 с положительной и отрицательной коррекцией, необходимой для исключения на профиле обрабатываемого колеса 4 зоны с нулевым скольжением. Зубчатые хоны изготавливаются путем нанесения зерна алмаза или эльбора гальваническим методом на точно отшлифованное зубчатое колесо.

Такой процесс позволяет осуществлять съем материала с профиля зуба без применения агрессивной нестабильной по свойствам технологической жидкости, вместо которой заливается керосин с добавлением масла или специальные СОТС для зубохонингования.

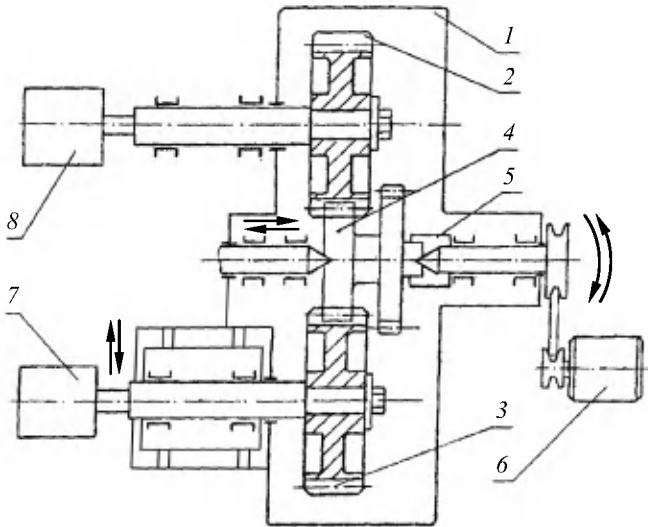


Рис. 8.25

*Схема зубохонингования на параллельных осях:*

1 — рабочая ванна; 2, 3 — корригированные прямозубые хоны; 4 — обрабатываемое зубчатое колесо; 5 — поводковая муфта; 6 — привод вращения; 7, 8 — тормозные нагрузочные устройства.

## ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

В современном машиностроении при изготовлении ответственных деталей из труднообрабатываемых высокопрочных материалов находят применение прогрессивные физико-химические методы обработки. К ним относятся электро-физико-химические и комбинированные методы, которые дополняют, а в некоторых случаях полностью заменяют традиционные процессы резания. Эти методы обеспечивают изменение формы, размеров, шероховатости и свойств обрабатываемых поверхностей заготовок и деталей под воздействием электрического тока и его разрядов, электромагнитного, оптического или электронного излучения, высокоэнергетических импульсов, магнитострикционного эффекта и плазменной струи.

Электро-физико-химические и комбинированные методы обработки (рис. 9.1) отличаются технологическими особенностями от традиционных технологий, основанных преимущественно на силовом (контактном) воздействии инструмента на заготовку.



Рис. 9.1

*Группы электро-физико-химических и комбинированных методов обработки:*

1 — электрохимическая размерная; 2 — электрохимическая отделочная; 3 — электроэрозионная; 4 — электроконтактная; 5 — плазменная; 6 — светолучевая (лазерная); 7 — электронно-лучевая; 8 — ультразвуковая; 9 — ультразвуковая отделочная; 10 — электрогидроимпульсная; 11 — анодно-механическая; 12 — электрохимическая абразивная; 13 — электрохимическая ультразвуковая; 14 — электроэрозионно-электрохимическая; 15 — электроэрозионная абразивная; 16 — магнитно-абразивная; 17 — плазменно-механическая; 18 — ультразвуковая абразивная; 19 — ультразвуковая механическая (резанием); 20 — ультразвуковая давлением.

К **основным особенностям** электрохимических, электрофизических и комбинированных методов можно отнести:

- возможность обработки материалов практически с любыми физико-механическими свойствами без приложения механических сил и непосредственного контакта рабочей поверхности инструмента с обрабатываемой поверхностью детали;
- копирование сложной формы инструмента сразу по всей поверхности заготовки при простом поступательном движении;
- минимальное влияние технологических особенностей процессов на механические свойства и эксплуатационные характеристики деталей после обработки;
- возможность выполнения отверстий с криволинейной и спиральной осью, в том числе и малых диаметров, узких пазов, канавок и других операций;
- интенсификация процессов механической обработки (резанием и давлением), сварки, пайки и других, выполняемых традиционными методами с большой трудоемкостью и низким качеством обработки;
- использование инструментов меньшей твердости и прочности по сравнению с обрабатываемым материалом, а в ряде методов вообще не требуется наличие инструмента, функции которого выполняет сфокусированный поток электронов, ионов и т. д.;
- высокая производительность обработки, большие технологические возможности изменения формы и шероховатости, сравнительно высокая точность получения размеров;
- возможность сравнительно простой механизации и автоматизации.

К **основным недостаткам** или ограничениям электрофизико-химических и комбинированных методов следует отнести:

- повышенную энергоемкость процессов по сравнению с механической обработкой;
- применение в ряде процессов более громоздкого оборудования и необходимость его размещения в отдельных помещениях, что вызвано пожарной безопасностью и специфическими требованиями безопасности работающих;
- более сложное обслуживание оборудования и оснастки в связи с образованием коррозии при применении жидких рабочих сред;
- экологические проблемы.

## 9.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

В современном машиностроении применяются материалы, обладающие разнообразными свойствами: жаропрочностью, жаростойкостью, коррозионной стойкостью. Изготовление деталей из таких материалов связано с увеличением трудоемкости обработки вследствие снижения скорости резания. Для конкретных материалов рационален тот или иной метод обработки.

Каждый конкретный метод обработки характеризуется рядом закономерностей, физико-механический механизм которых рассматривается путем постепенного усложнения:

- механическое воздействие, включая пластическое деформирование, трение, разрушение;
- взаимодействие механических и тепловых явлений;
- одновременное действие тепловых, химических, электрических, магнитных и других явлений.

Методы обработки определяют следующие **основные признаки**:

- вид энергии, подводимой к зоне обработки (тепловая, электрическая, химическая, магнитная и др.);
- способ подвода энергии, характеризующийся взаимным положением заготовки и рабочих поверхностей инструмента;
- механизм определяет основной физико-химический процесс, обеспечивающий снятие материала с заготовки;
- рабочий процесс определяет совокупность явлений, обеспечивающих при использовании данного метода обработки снятие с заготовки определенного слоя материала;
- схема формообразования характеризует закономерности относительного движения инструмента и заготовки без учета физических явлений, протекающих в зоне обработки, действующих сил, температур и активных сред.

С использованием основных признаков может быть построена классификация методов обработки, включающая класс обработки и способ обработки. Класс обработки объединяет несколько методов обработки, использующих один и тот же вид энергии, подводимой извне. Методы обработки подразделяются на две группы: группа обычных методов обработки, характеризующихся одним типом используемой энергии и одним способом ее подвода (механической, электроэрозионной, электрохимической), и группа

комбинированных методов, при которых в зону обработки подводятся два или более типов энергии и совмещаются различные способы их подвода (например плазменно-механическая обработка).

Основные характеристики классификации рабочих процессов некоторых физико-химических методов обработки приведены в таблице 9.1.

Таблица 9.1

**Основные характеристики классификации рабочих процессов физико-химических методов обработки**

Вид обработки (класс)	Способ обработки	Рабочий процесс	Технологическая среда	Энергия для обработки	Мощность (удельная), Вт/см <sup>2</sup>
Электрическая	Электроэрозионная	Эрозия в импульсных разрядах	Жидкость диэлектрическая	Тепловая	$10^4 - 10^8$
	Электрохимическая	Анодное растворение	Электродит	Химическая	$10^3 - 10^4$
	Ионнолучевая	Катодное распыление	Вакуум $10^{-2} - 10^{-4}$	Тепловая	$10^6 - 10^7$
	Электроннолучевая	Эрозия под действием потока электронов	Вакуум $10^{-4} - 10^{-6}$	Тепловая	$10^6 - 10^8$
	Светолучевая	Световая эрозия	Газ, вода, вакуум	Тепловая	$10^6 - 10^8$
Механическая	Лезвийная	Механическое деформирование	Воздух, жидкость	Механическая	$10^2$
	Абразивная	Механическое деформирование	Воздух, жидкость	Механическая	$10^2$

Продолжение табл. 9.1

Вид обработки (класс)	Способ обработки	Рабочий процесс	Технологическая среда	Энергия для обработки	Мощность (удельная), Вт/см <sup>2</sup>
Механическая	Ультразвуковая	Хрупкое разрушение при ударном воздействии	Абразивная суспензия	Механическая	$10^3 - 10^4$
Комбинированная	Анодно-механическая	Анодное растворение, электроэрозия, механическое деформирование	Электродит	Химическая, тепловая, механическая	$10^3$
	Механическая с вибрацией	Механическое деформирование с вибрациями	Воздух	Механическая	$10^2$
	Электроконтактная	Механическое удаление нагретого металла	Воздух, газ	Тепловая, механическая	$10^4$

## 9.2. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

### 9.2.1. Сущность метода ЭХО, основные понятия и определения

Все электрохимические методы обработки основаны на двух процессах: процессе электролитической диссоциации и процессе электролиза.

Процесс разложения вещества в растворах на ионы называется **электролитической диссоциацией**. Химические соединения, подвергающиеся при растворении в воде электролитической диссоциации, называются электролитами. Как правило, на практике электролитом называется сам

раствор. Электролиты являются проводниками электрического тока II рода, т. е. при прохождении через них электричества они претерпевают изменения в отличие от проводников I рода.

Процесс, имеющий место при протекании постоянного электрического тока через какой-либо электролит, называется **электролизом**. Если в ванну с электролитом погрузить два электрода — положительный (анод) и отрицательный (катод), — соединенные с источником питания, то при прохождении тока через электролит к аноду направляются отрицательно заряженные ионы (анионы), а к катоду — положительно заряженные (катионы) и могут под действием тока в раствор уходить ионы анода. Это явление называют анодным растворением, которое является основным механизмом процесса электрохимической обработки металлов.

Количественно процесс электролиза подчиняется закону Фарадея.

1. Количество выделившегося на катоде или растворенного на аноде вещества пропорционально количеству пропущенного через раствор электричества  $Q$ :

$$G \sim Q.$$

2. При пропускании одинакового количества электричества через растворы электролитов количество выделившегося или растворенного вещества пропорционально их химическим эквивалентам:

$$G \sim \varepsilon_x.$$

Объединенный закон Фарадея может быть записан в виде:

$$G = \varepsilon J \tau,$$

где  $G$  — количество растворенного вещества;  $\varepsilon$  — химический эквивалент;  $J$  — сила тока;  $\tau$  — время.

Для практических расчетов удобнее пользоваться **электрохимическим эквивалентом**, который может быть весовым и объемным. Под весовым электрохимическим эквивалентом понимают количество вещества в граммах, которое выделяется или растворяется на электроде при прохождении через электролит 1 Кл или 1 А·ч электричества.

Значения весовых электрохимических эквивалентов вычисляются по формуле

$$\varepsilon_B = A/nF,$$

где  $A$  — атомный вес вещества;  $n$  — валентность вещества;  $F$  — число Фарадея, равное 96500 Кл, или 26,8 А·ч.

Для технологических вычислений удобнее пользоваться объемным электрохимическим эквивалентом:

$$\epsilon_0 = \frac{\epsilon_v \cdot 1000}{q \cdot 60}, \frac{\text{мм}^3}{\text{А} \cdot \text{мин}},$$

где  $q$  — плотность вещества, г/см<sup>3</sup>.

Электрохимические эквиваленты сплавов определяются по соотношению составляющих сплава

$$\epsilon_{\text{спл}} = \frac{100}{\frac{p_1}{\epsilon_1} + \frac{p_2}{\epsilon_2} + \dots + \frac{p_n}{\epsilon_n}}, \frac{\text{мм}^3}{\text{А} \cdot \text{мин}},$$

где  $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$  — электрохимические эквиваленты составляющих сплава;  $p_1, p_2, \dots, p_n$  — процентное содержание компонентов в сплаве.

На рисунке 9.2 приведена типичная электролитическая ячейка, состоящая из емкости с электролитом, в которую опущены два металлических электрода на основе железа, подсоединенные к полюсам источника постоянного тока. Явления, происходящие в ячейке, рассмотрены при наиболее употребительном в процессе ЭХО электролите — поваренной соли (NaCl).

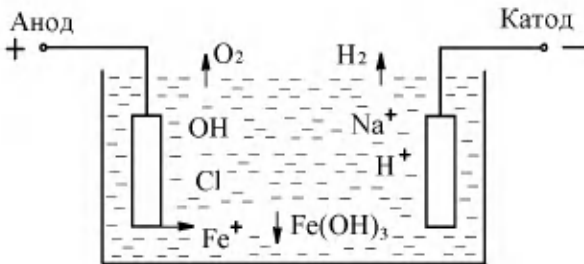


Рис. 9.2

Схема электролитической ячейки (электролит NaCl)

При использовании других электролитов общим является образование на аноде гидроокисей металлов типа  $\text{Me}(\text{OH})_n$ , где  $\text{Me}$  — любой металл, участвующий в реакции. На катоде всегда выделяется газообразный водород, а на аноде — газообразный кислород, которые могут давать взрывоопасную смесь. Состав электролита теоретически не меняется, но происходит его защелачивание, т. е. образование избыточного количества ионов  $\text{OH}$ , и расходуется вода.

На рисунке 9.3а показана электролитическая ячейка с локализованной площадью катода, находящегося на относительно малом зазоре  $a$  от анода. В данной ячейке начавшийся интенсивный процесс анодного растворения в зоне, наиболее близкой от анода, быстро будет ослабевать или совсем прекратится вследствие пассивации поверхности анода. В 1928 г. советские исследователи В. Н. Гусев и Л. П. Рожков предложили и запатентовали метод электрохимической обработки с распассивацией поверхности потоком электролита. В таком виде процесс ЭХО существует и по настоящее время и называется анодно-гидравлическим. Вариант его выполнения приведен на рисунке 9.3б. Существует также анодно-механический метод с распассивацией поверхности механическим воздействием. Типичным представителем такого метода является электроабразивное шлифование (ЭАШ).

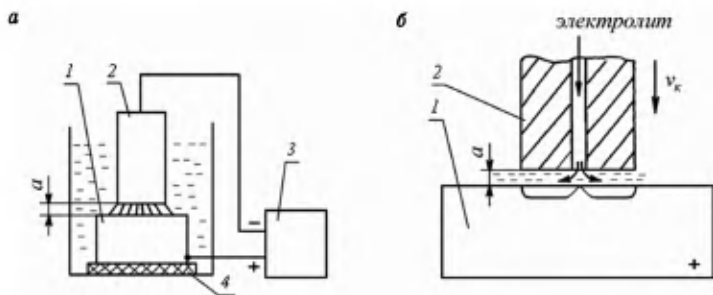


Рис. 9.3

Варианты электрохимической обработки:

$a$  — в неподвижном электролите неподвижным катодом;  $b$  — подвижным катодом с прокачкой электролита; 1 — анод; 2 — катод; 3 — источник питания; 4 — изолирующая плита.

Обработка с проточным электролитом возможна с неподвижным и подвижным катодом. В первом случае обработка будет происходить при все увеличивающемся зазоре  $a$  с понижением производительности. Этот метод применяется при снятии заусениц и электрополировании в специальных электролитах. Наиболее часто применяется метод ЭХО с подвижным катодом для поддержания определенно-го межэлектродного зазора  $a$ .

Рассмотрим межэлектродный промежуток при ЭХО с подвижным катодом и стационарным процессом анодного растворения с точки зрения падения напряжения  $U_0$ , приложенного к электродам (рис. 9.4).

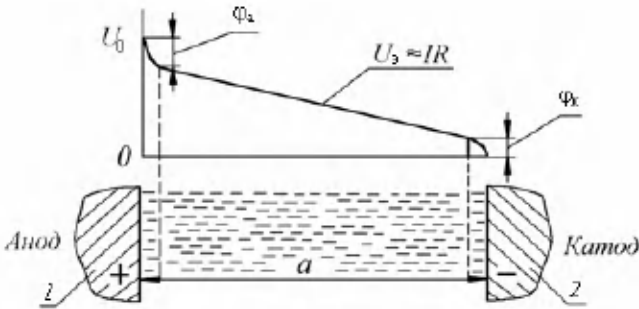


Рис. 9.4

Распределение напряжения, подведенного к электролитической ячейке с зазором  $a$ :

1 — прианодный слой; 2 — прикатодный слой.

Омическое сопротивление межэлектродного промежутка, как и любого проводника тока, вычисляется по удельному сопротивлению, протяженности и площади:

$$U_0 = \varphi_a + \rho \frac{a}{S} J + \varphi_k,$$

где  $U_0$  — приложенное напряжение;  $\varphi_a$  — падение напряжения в прианодной области, В;  $\rho$  — удельное сопротивление электролита, Ом·мм;  $a$  — межэлектродный зазор, мм;  $S$  — площадь обработки (электрода), мм<sup>2</sup>;  $J$  — сила тока, А;  $\varphi_k$  — падение напряжения в прикатодной области, В.

Решив уравнение относительно протекающего тока  $J$ , получим выражение

$$J = \frac{U_0 - \varphi_a - \varphi_k}{\rho \cdot a} S,$$

которое можно представить в виде

$$J = j \cdot S,$$

где  $j$  — выражение плотности тока.

Суммарное падение напряжения ( $\varphi_a + \varphi_k$ ) называют падением напряжения поляризации  $\varphi_n$ . В расчетах  $\varphi_n$  принимают равным 2–3 В.

Плотность тока в окончательном виде записывается:

$$j = \frac{U_0 - \varphi_n}{\rho \cdot a}, \frac{A}{\text{мм}^2}.$$

**Плотность тока**  $j$  является важнейшей характеристикой электрохимической обработки. От нее зависит производительность обработки, точность, качество поверхности, энергоемкость процесса и его коэффициент полезного действия, оцениваемый коэффициентом выхода по току  $\eta$ . По плотности тока  $j$  и объемному электрохимическому эквиваленту  $\varepsilon_0$  вычисляют линейную скорость растворения или скорость внедрения катода в анод:

$$v_k = \eta \cdot j \cdot \varepsilon_0, \frac{\text{мм}}{\text{мин}},$$

где  $\eta$  — коэффициент выхода по току.

Несмотря на кажущуюся схематическую простоту процесса ЭХО, он сопрягается с большим числом взаимосвязанных процессов: электродных, гидродинамических, тепло- и массопереноса, движения ионов в электрическом поле, электрохимических реакций в потоке электролита и др.

Основными процессами, влияющими на производительность и точность обработки, являются нагрев электролита и насыщение его продуктами анодного растворения и водородом по мере продвижения по межэлектродному промежутку. Тепло образуется за счет джоулевых потерь в межэлектродном промежутке в зависимости от протекающего тока и сопротивления. При повышении температуры удельное сопротивление электролита уменьшается. По мере движения электролита в протяженном межэлектродном промежутке повышается степень его насыщения газообразным водородом и шламом, что повышает удельное сопротивление. В итоге получается результирующее изменение по длине межэлектродного промежутка удельного сопротивления электролита и зависящей от него плотности тока. Плотность тока по мере увеличения протяженности межэлектродного промежутка падает, что неблагоприятно отражается на точности переноса формы инструмента (катода) на обработанную поверхность (анод).

Процесс ЭХО может интересовать технологов-изготовителей ответственных деталей машин в основном по трем параметрам: производительность, точность обработки, качество обработанной поверхности.

По законам Фарадея для снятия большого количества материала за единицу времени существует единственный управляемый параметр — величина рабочего тока  $J_A$ . Рабочий ток можно увеличить за счет увеличения площади обработки  $S$  или за счет увеличения плотности тока  $j$ . Увеличение площади обработки имеет свои ограничения

вследствие нагрева электролита, его загазованности и загрязнения, а также вследствие ограничения мощности источников питания технологическим током.

На скорости анодного растворения, пропорциональную плотности тока, можно влиять, увеличивая рабочее напряжение  $U_0$ , уменьшая межэлектродный зазор  $a$ , выбирая электролит с меньшим удельным сопротивлением  $\rho$ , подавая его в межэлектродный промежуток с возможно большей скоростью (до оптимальной при конкретных условиях). Уменьшение зазора до 0,05 мм связано с риском короткого замыкания, что является аварийной ситуацией. Увеличение напряжения вызывает электрическое искрение, закипание электролита и нарушение процесса. Достичь при ЭХО плотности тока выше 2,5–2,8 А/мм<sup>2</sup> без образования электрического искрения не удастся. На рисунке 9.5 приведена ориентировочная зависимость между напряжением и рабочим зазором при протекании процесса без искрения.

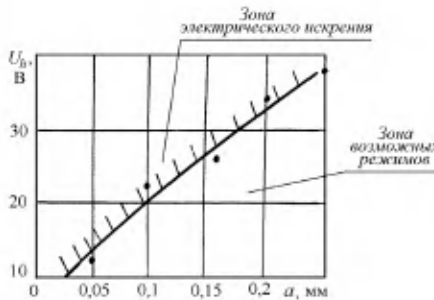


Рис. 9.5

*Ориентировочные соотношения рабочего напряжения  $U$  и межэлектродного зазора  $a$  при нормальном протекании процесса ЭХО*

Производительность процесса ЭХО зависит также от коэффициента выхода по току  $\eta$ , который в пределах от 0,8 до 1 может меняться в зависимости от температуры электролита, скорости его течения, рабочего зазора, поляризационных явлений и т. д. Все эти зависимости для разных условий обработки и материалов непостоянны и не могут быть определены аналитически.

Любой из методов обработки ставит своей целью получение более точной поверхности детали из менее точной поверхности заготовки. При ЭХО эта поверхность в идеальном случае может быть точным отображением внедряемого катода. Отклонение от формы катода является погрешностью ЭХО.

При ЭХО существуют расчетная (органическая) погрешность, присущая методу, которую избежать невозможно и можно только учитывать и по возможности компенсировать, и погрешность технологическая, ограничиваемая регулированием и строгим выдерживанием параметров процесса.

К расчетным погрешностям относятся погрешности, возникающие при обработке неплоских (фасонных) поверхностей, у которых вектор электрохимического растворения, направленный по нормали к поверхности катода, не совпадает с направлением его поступательного движения (подачи).

Наглядно проиллюстрировать в общем случае обработку фасонной поверхности проще всего при обработке методом ЭХО поверхности радиусным катодом (рис. 9.6).

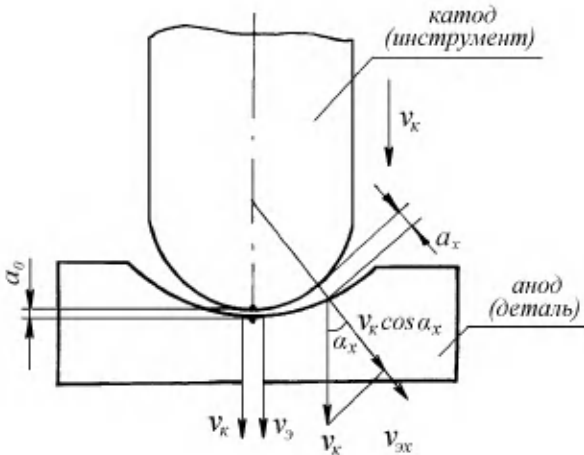


Рис. 9.6

*Схема электрохимической обработки профильной поверхности*

Только на периферийной части в одной точке вектор электрохимического растворения  $v_{\text{эx}}$  совпадает с вектором подачи  $v_k$  и процесс стационарно протекает на установившемся зазоре  $a_0$ . В остальных точках проекция вектора подачи, равная  $v_k \cos \alpha_x$  отстает от вектора растворения  $v_{\text{эx}}$  и устанавливается зазор  $a_x$ , больший, чем  $a_0$ . Чем больше угол  $\alpha$ , тем больше отклонение  $a_x$  от  $a_0$ . Получить точное отображение профильной (радиусной) поверхности катода на аноде при ЭХО теоретически невозможно.

Под *технологической точностью* ЭХО следует подразумевать повторяемость настроенных размеров в большой партии деталей при выдерживании основных технологических размеров процесса в пределах допускаемых. Так как процесс ЭХО всегда производится на зазоре, то его величина в разных точках может являться критерием точности. При постоянстве зазора  $a$  во всех точках (полное копирование катода) точность обработанной поверхности будет наивысшей. Отклонение зазора  $\Delta a$  от базовой (расчетной) величины будет характеризовать погрешность обработки:

$$\Delta a = a_x - a_0,$$

где  $\Delta a$  — абсолютная погрешность обработки;  $a_0$  — межэлектродный базовый (стационарный) зазор;  $a_x$  — действительный зазор в любой точке.

Относительная погрешность  $\delta$  вычисляется по формуле

$$\delta = \frac{a_x - a_0}{a_0}.$$

Изменяющиеся параметры процесса ЭХО влияют на местное изменение плотности тока и, в конечном счете, на абсолютную погрешность  $\Delta a$ . Суммарная абсолютная погрешность складывается из основных составляющих:

$$\Delta a = \Delta a_{\text{эхо}} + \Delta a_u + \Delta a_p + \Delta a_v + \Delta a_n,$$

где  $\Delta a_{\text{эхо}}$  — органическая погрешность при обработке профильных поверхностей;  $\Delta a_u$  — погрешность от изменения напряжения;  $\Delta a_p$  — погрешность от изменения удельного сопротивления электролита;  $\Delta a_v$  — погрешность от неравномерной скорости потока электролита;  $\Delta a_n$  — погрешность от изменения коэффициента выхода по току.

Во многих случаях реальная точность обработки сопоставима с величиной межэлектродного зазора. Так точность профиля пера турбинных лопаток, обработанных на зазоре 0,23–0,25 мм, находится в пределах 0,2 мм, на зазоре 0,05–0,07 мм — в пределах 0,05 мм. Но без жесткой стабилизации параметров процесса ЭХО в пределах 2–4% достичь погрешности  $\Delta a$  в пределах 0,05–0,1 мм не представляется возможным.

Кроме органических и технологических погрешностей ЭХО необходимо считаться с погрешностями, возникающими из-за нежесткости системы СПИЗ, погрешностей базирования заготовок, неравномерного припуска.

Так как при ЭХО растворение материала происходит как на наиболее выступающих местах, так и во впадинах на разных межэлектродных зазорах, то для выравнивания

и копирования профиля катода требуется повышенный припуск по сравнению с механической обработкой.

На рисунке 9.7 приведена схема выравнивания поверхности заготовки с неровностями  $\Delta_{\text{заг}}$  до поверхности с неровностями  $\Delta_{\text{дет}}$  при ЭХО на фиксированном зазоре  $a_0$ . Минимальный припуск, который необходимо снять для этой цели, ориентировочно можно оценить по формуле

$$Z_{\text{min}} = a_0 \ln \frac{\Delta_{\text{заг}}}{\Delta_{\text{дет}}}$$

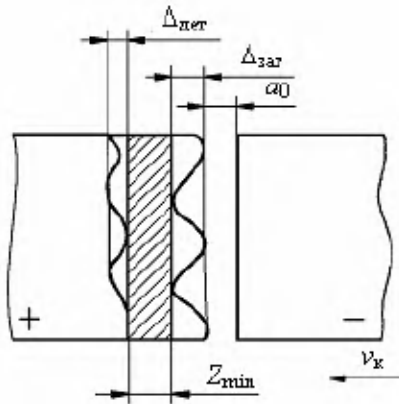


Рис. 9.7

Схема выравнивания поверхности заготовки при ЭХО

Выравнивающие свойства процесса можно оценить коэффициентом выравнивания  $K_{\text{в}}$ :

$$K_{\text{в}} = \frac{\Delta_{\text{заг}} - \Delta_{\text{дет}}}{Z_{\text{min}} + \Delta_{\text{заг}}}$$

С увеличением коэффициента выравнивания повышается точность обработки. В реальных условиях  $K_{\text{в}}$  может быть от 0,1 до 0,9 и зависит от материала обрабатываемой детали, состава электролита, плотности тока, температуры электролита и т. д.

### 9.2.2. Реализация процесса ЭХО

Для реализации процесса ЭХО необходимо на стадии проектирования техпроцесса выбрать состав электролита и оснастить рабочую установку системой подачи, термостабилизации

и очистки электролита, а также выбрать источник питания технологическим током.

*Выбор электролита* зависит от обрабатываемого материала и производится, прежде всего, с точки зрения качества поверхности.

К электролиту предъявляется ряд требований: достаточно низкое удельное сопротивление, нетоксичность, не дефицитность, невысокая стоимость, желательна минимальное коррозионное воздействие на оборудование и оснастку, образование продуктов анодного растворения в виде выпадающих в осадок гидроокисей типа  $Me(OH)_n$ , сохранение состава неизменным. Наиболее полно этим требованиям отвечают электролиты на основе поваренной соли ( $NaCl$ ) и селитры калиевой и натриевой ( $KNO_3$ ,  $NaNO_3$ ).

Применяют активизирующие добавки в виде соединений фтористого натрия  $NaF$  и бромистого калия  $KBr$ . В качестве антикоррозионной добавки чаще всего применяют нитрит натрия  $NaNO_2$ .

Постоянно загрязняющийся электролит требует очистки от продуктов анодного растворения. Допустимое загрязнение не более 10–15 г снятого материала на литр электролита. Для очистки электролитов используют следующие методы: отстаивание в баках-отстойниках большой емкости, фильтрация на специальных пресс-фильтрах, центрифугирование, флотация или электрофлотация с применением флотационных реагентов.

Расход электролита должен гарантировать отвод тепла и образующихся газов с продуктами анодного растворения. Для нормального протекания процесса ЭХО необходимо на 1 г снятого материала прокачать 2–6 л электролита. Общий расход электролита рассчитывается по интенсивности съема, причем для более высокого качества расход увеличивается. Линейная скорость электролита определяется по формуле

$$v_{эл} = \frac{Q}{0,06 \cdot S_3}, \text{ м/с,}$$

где  $Q$  — расход электролита, л/мин;  $S_3$  — площадь сечения потока электролита,  $мм^2$ .

По вычисленной скорости и расходу выбирают насос, развивающий определенное давление, которое при ЭХО выбирают в зависимости от ожидаемой плотности тока и предполагаемого зазора. Наиболее часто применяемое напряжение при ЭХО 10–12 В, но может быть и выше (до 20 В).

Мощность выбираемого источника питания зависит от обрабатываемой площади и плотности тока. К источнику питания предъявляются следующие основные требования:

- обеспечение работы в длительном режиме с номинальными параметрами при колебании напряжения в сети 1–15%;
- наличие защиты от коротких замыканий;
- высокая вероятность безотказной работы;
- стабилизация тока или напряжения в пределах 5% установленной величины при изменении сопротивления нагрузки от 10 до 100%.

В практике ЭХО широко применяются источники питания для гальванических ванн типа ВАКГ, ВАКГР (реверсивный) серии ИПП для электрохимических станков и другие. Мощность источников от 100 до 25 000 А.

Метод ЭХО нашел широкое применение при формообразовании профиля пера лопаток. Освоение методов точного литья жаропрочных сплавов исключило применение ЭХО при изготовлении турбинных лопаток, но в технологии производства компрессорных лопаток из титановых сплавов часто применяется метод ЭХО. Особенно целесообразно применять этот метод для профилирования сложной поверхности пера лопатки в опытном производстве при наличии минимума оборудования и оснастки.

Электрод изготавливают методом ЭХО с обратной полярностью, где вместо обрабатываемой детали устанавливается готовая лопатка или специально изготовленный эталон. Она является катодом при формировании профилей будущих электродов (катодов) при обработке заготовок лопаток с прямой полярностью.

На рисунке 9.8 показана схема двусторонней обработки профиля пера лопатки по спинке и корыту наклонным врезанием электродов, что обеспечивает одновременную обработку радиусной прикомлевой части лопатки. По приведенной схеме можно окончательно обработать весь профиль пера лопатки, включая переходный радиусный участок. Остается только сформировать замок от готового профиля пера.

Одной из эффективных областей применения метода ЭХО является обработка различных полостей, а также круглых и некруглых отверстий различной глубины. В этом случае электродом является стержень трубчатого сечения, через который подается электролит. Возможно применение электродов 3 типов (рис. 9.9).

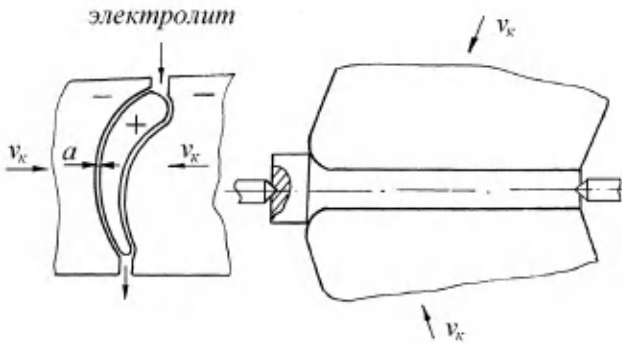


Рис. 9.8

Схема двусторонней ЭХО профиля пера лопаток с одновременной обработкой радиуса перехода к замку

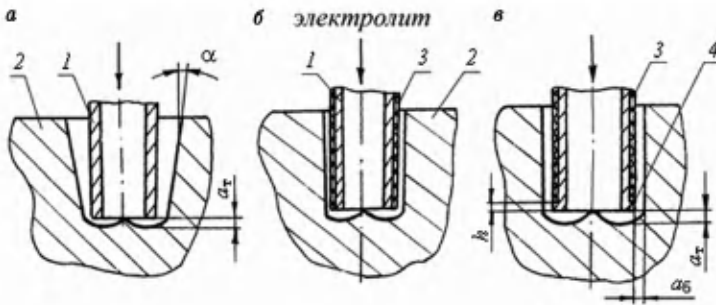


Рис. 9.9

Варианты применения конструкций электродов при обработке отверстий:

1 — металлический электрод; 2 — обрабатываемая заготовка; 3 — изоляционный слой электрода; 4 — буртик на электроде;  $h$  — высота буртика;  $a_T$  — торцевой зазор;  $a_б$  — боковой зазор.

Электрод в виде металлической трубки. В обрабатываемой полости или отверстии образуется конус с углом  $\alpha$ . Размеры обрабатываемой полости будут иметь низкую точность.

Наружная поверхность электрода полностью покрыта изолятором, рабочим участком является только торец. Обработка производится на установившемся зазоре  $a_T$ , размеры полости имеют более высокую точность. Недостатком электрода является отслаивание изоляционного слоя, прилегающего к торцу.

Электрод покрыт изоляционным слоем, примыкающим к активному поясу высотой  $h$ . Данная конструкция наиболее широко применяется на практике. Обработка идет на увеличенном по сравнению с вариантом  $b$  зазоре  $a_6$ , который может быть оценен по следующей формуле:

$$a_6 = \sqrt{2a_r h + a_r^2}, \text{ мм,}$$

где  $a_r$  — рабочий зазор, на котором производится обработка, мм;  $h$  — высота буртика электрода, мм.

В зависимости от физико-химических особенностей съема материала заготовки разновидности ЭХО объединяются в две группы. К первой группе относятся все виды ЭХО, при выполнении которых припуск с заготовки удаляется только за счет электрохимического растворения, а ко второй группе — методы обработки, в которых наряду с электрохимическим растворением удаляемого припуска осуществляется также механическое или электротермическое воздействие.

Для ЭХО в проточном электролите применяются электрохимические станки с различной степенью механизации и автоматизации, включая специальные, специализированные и общего назначения. Например, специальные станки для обработки профиля пера лопаток модели ЛЭ-198, ЭХО-2, специализированные с адаптивно-программным управлением для ЭХО в импульсно-циклическом режиме модели 4421ФЦ, 4А223ФЦ и другие.

Наряду с широко применяемой обработкой профиля лопаток и прошивкой отверстий размерная ЭХО в зависимости от перемещения электродов может осуществляться по *следующим схемам*:

- при неподвижных электродах — калибрование, контурная обработка, маркировка;
- при поступательном перемещении электрода — копирование, прошивка, протягивание, калибрование;
- при вращении электрода-катода — обработка плоских и фасонных поверхностей, отрезка, кольцевая вырезка;
- при вращении электрода-анода — обработка фасонных поверхностей (наружных и внутренних), канавок, отрезка;
- при сложном движении электрода — вырезка проволокой или стержнем.

Разработаны и применяются другие *разновидности электрохимической обработки*, к которым относятся следующие.

Электрохимическое точение выполняется при поступательном перемещении электрода-инструмента (катода) и

вращении заготовки. Съем металла с заготовки происходит за счет электрохимического растворения. Электрод-инструмент не изнашивается. Применяется для формообразования наружных, внутренних и торцевых поверхностей корпусных и тонкостенных деталей.

Электрохимическое прошивание струей электролита применяется при формообразовании отверстий диаметром 0,3–1,5 мм. Сформированная струя электролита подается через полость электрода инструмента. Съем металла происходит за счет электрохимического растворения. Электрод-инструмент не изнашивается.

Электрохимическое калибрование применяется для окончательной обработки с целью повышения точности и снижения шероховатости внутренних и наружных поверхностей деталей, имеющих резкие переходы (шлицевые валы, отверстия, зубья шестерен). Съем металла происходит за счет электрохимического растворения. Электрод-инструмент (катод) не изнашивается.

Электрохимическое снятие заусенцев осуществляется электрохимическим растворением. Электролит подается между электродом инструментом и участком заготовки, на котором имеются заусенцы. Эффективно использовать метод обработки для снятия заусенцев в труднодоступных местах, например в деталях топливной аппаратуры и арматуры.

Электрохимическое маркирование выполняется при подаче электролита между маркируемой поверхностью заготовки и рабочей поверхностью трафарета со знаками. Глубина маркировки получается до 0,2–0,3 мм. Электрод-инструмент не изнашивается.

Электрохимическое полирование осуществляется в электролите при малых плотностях тока на аноде ( $I$  менее 0,1 А/см<sup>2</sup>). Применяется для уменьшения шероховатости поверхности с приданием ей зеркального блеска, для снятия тонких слоев металла при определении остаточных напряжений, возникающих при различных видах обработки (лезвийной, абразивной и др.), при удалении наклепанного слоя после процессов резания и др.

Электрохимическое шлифование выполняется в среде электролита, обеспечивающего электрохимическое растворение металла наряду с абразивным (алмазным) воздействием на заготовку. Электрод инструмент (катод) — абразивный или алмазный круг на электропроводной связке — изнашивается незначительно. Применяется при обработке цилиндрических, плоских и фасонных поверхностей деталей из труднообрабатываемых материалов.

Электрохимическое хонингование аналогично электрохимическому шлифованию, основано на электрохимическом растворении и абразивном (алмазном) воздействии электрода-инструмента (хона) на заготовку (анод). Хон состоит из электропроводного корпуса и абразивных (алмазных) брусков на токопроводящей связке. В процессе работы хон вращается и имеет возвратно-поступательные перемещения. Электролит прокачивается между обрабатываемой поверхностью заготовки (детали) и корпусом хона. Хонингование является отделочной операцией, позволяющей получать точность до 7 квалитета и шероховатость поверхности  $Ra = 0,3$  мкм и менее. Метод применяется в основном для обработки внутренних цилиндрических поверхностей.

Электрохимическое суперфиниширование выполняется при неподвижном катоде и вращающейся детали (аноде), с которой контактируют колеблющийся и перемещающийся вдоль оси детали абразивный (алмазный) брусок. Электролит поступает в межэлектродный зазор. В результате анодного растворения, прежде всего на вершинах микронеровностей образуется рыхлая пленка, удаляемая бруском. Электрод-инструмент (катод) практически не изнашивается, а притир (брусок) изнашивается незначительно. Метод применяется при обработке труднообрабатываемых вязких материалов.

Кроме рассмотренных разновидностей электрохимических методов обработки на практике применяются другие методы ЭХО, например электроэрозионно-электрохимическая, электрохимическая жидкостно-абразивная, электрохимическая ультразвуковая.

### 9.2.3. Электрохимическое шлифование

Под электрохимическим шлифованием в общем случае понимают электрохимическую обработку быстровращающимся круглым инструментом-катодом, увлекающим под действием скоростного напора и сил смачивания пленку электролита в зону обработки. Инструмент (катод) может содержать в своем составе зерна абразива (алмаза), в этом случае процесс называют **электроабразивным шлифованием**. По всем выходным параметрам этот метод превосходит обработку гладким вращающимся токопроводящим катодом.

Токопроводящий абразивный круг можно рассматривать как токопроводящий диск, к которому применимы законы электрохимической обработки, и одновременно как абразивный режущий инструмент, к которому применимы законы абразивного шлифования. Совмещение этих

свойств вносит новый эффект как в протекание процесса ЭХО, интенсифицируя его за счет активной распассивации поверхности, так и в процесс абразивного резания, облегчая его и не давая кругу засаливаться.

В отличие от обычного абразивного круга токопроводящий круг при электроабразивном шлифовании воздействует на поверхность не только при непосредственном контактировании, но и в зазорах, заполненных электролитом. На рисунке 9.10 приведена общая схема метода обработки.

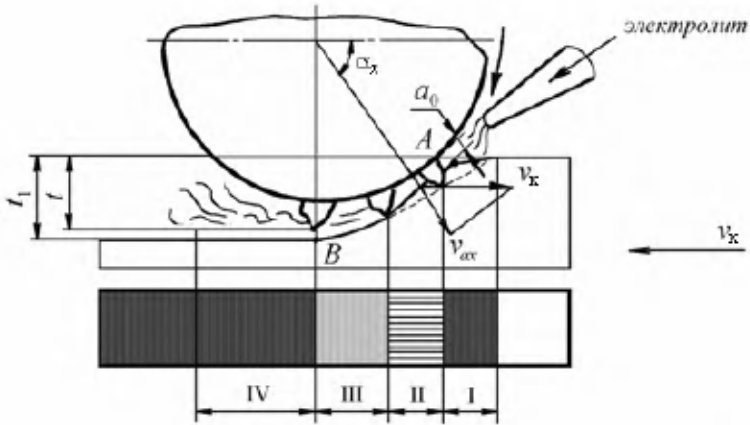


Рис. 9.10

*Схема контакта токопроводящего абразивного круга при глубинном электроабразивном шлифовании:*

$v_k$  — скорость подачи катода;  $v_{ax}$  — скорость электрохимического растворения в произвольной точке;  $\alpha_x$  — угол между векторами  $v_k$  и  $v_{ax}$ ;  $a_0$  — начальный зазор;  $t$  — установленный припуск;  $t_1$  — реально снятый припуск;  $AB$  — зона термического контакта; I–IV — зоны воздействия токопроводящего круга на поверхность.

Как и для общего случая ЭХО круглым подвижным электродом величину межэлектродного зазора по нормали к инструменту в любой точке можно записать

$$a_x = a_0 + v_{ax}\tau - v_k \cos \alpha_x \tau,$$

где  $a_x$  — текущий межэлектродный зазор;  $a_0$  — начальный межэлектродный зазор;  $v_{ax}$  — скорость электрохимического растворения в произвольной точке зоны контакта;  $\tau$  — время;  $v_k$  — скорость движения катода;  $\alpha_x$  — угол в произвольной точке зоны контакта между направлением движения катода и вектором электрохимического растворения.

Продифференцировав по времени, получим скорость изменения зазора:

$$\frac{da_x}{d\tau} = v_{ax} - v_k \cos \alpha_x.$$

Из этого выражения видно, что по мере увеличения угла  $\alpha_x$  скорость изменения зазора возрастает, а это приводит к тому, что в зоне контакта круга с обрабатываемой поверхностью от начального зазора  $a_0$  в точке  $A$  образуется клиновидный зазор, увеличивающийся к точке  $B$ .

Воздействие токопроводящего круга на обрабатываемую поверхность можно разделить на четыре зоны (рис. 9.10).

I — зона электрохимического растворения до точки  $A$  — начала теоретического контакта;

II — зона совместного абразивного и электрохимического воздействия до зазора, равного выступанию абразивного зерна над связкой;

III — зона электрохимического растворения в пределах теоретического контакта до точки  $B$  на зазорах, больших, чем выступание зерна над связкой;

IV — зона электрохимического растворения за пределами теоретического контакта  $AB$  круга с поверхностью на все увеличивающемся зазоре с интенсивностью, зависящей от радиуса круга.

Общая картина воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность с выделением 4-х зон подтверждается экспериментально путем мгновенного прерывания процесса шлифования. В результате съема материала за счет электрохимического растворения в зонах III-IV в общем случае при электроабразивном шлифовании снятый реально припуск  $t_1$  всегда больше установленного  $t$ .

Процесс со съемом повышенного припуска  $t$  (глубинное электроабразивное шлифование) по точностным возможностям и качеству поверхностного слоя мало отличается от традиционного ЭХО. Применение абразивного токопроводящего круга дает возможность улучшить выходные параметры процесса путем применения режимов чистового электроабразивного шлифования.

Переход от глубинного к чистовому шлифованию в некоторой степени условен. Он характеризуется, прежде всего, таким режимом, при котором весь клиновидный зазор в теоретической зоне контакта  $AB$  уместается в пределах выступания абразивного зерна над связкой. При этом, касание зернами абразива распространяется практически до точки  $B$  теоретического контакта, т. е. зона III отсутствует (рис. 9.11).

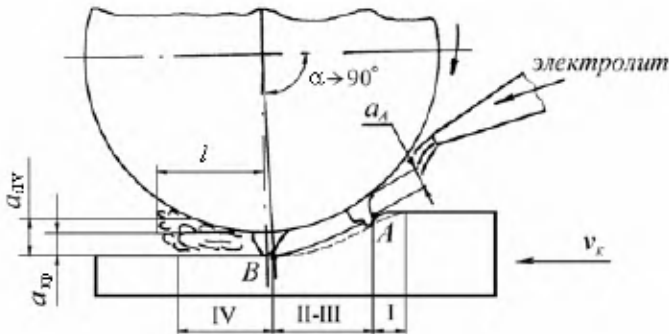


Рис. 9.11

Схема чистового ЭАШ:

$a_A$  — начальный зазор в точке A;  $a_{кр}$  — зазор в окрестности точки B, равный выступанию зерна над связкой;  $\alpha \rightarrow 90^\circ$  — угол близкий к  $90^\circ$  в окрестности точки B;  $a_{IV}$  — произвольный зазор в пределах зоны IV.

Выступание абразивного круга над связкой  $a_{кр}$  является характеристикой применяемого инструмента. Эта величина экспериментально определяется достаточно точно при шлифовании образца с заранее заданной глубиной  $t$ , т. е. с известным углом  $\alpha_A$  в точке A начала контакта и точно замеренной величиной подачи  $v_k$ , установленной на грани касания зернами абразива в точке A. Это касание легко фиксируется по ваттметру в цепи вращения круга.

Закономерности плоского электроабразивного шлифования периферией круга можно распространить на *сложные профильные поверхности*. К профильной относится поверхность, нормаль к которой составляет угол  $\beta$ , лежащий в пределах  $90^\circ > \beta > 0$ . На рисунке 9.12 приведены примеры профильных поверхностей. К ним могут относиться наклонные, радиусные и более сложные, например, эвольвентные поверхности.

Зону контакта любого участка профильной поверхности, нормаль к которому составляет угол  $\beta$  с осью вращения, можно рассматривать как образованную с кругом другого радиуса, называемого эквивалентным и вычисляемым с достаточной для практики точностью по формуле

$$R_{э\text{кв}} = \frac{R}{\sin \beta},$$

где  $R$  — истинный радиус круга в рассматриваемом сечении;  $\beta$  — угол нормали к профилю с осью вращения.

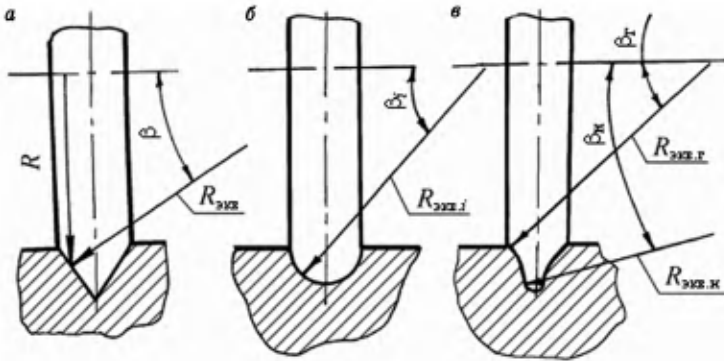


Рис. 9.12

Виды профильных поверхностей:

*a* — наклонная; *б* — радиусная; *в* — эвольвентная;  $R_{\text{экв}}$  — радиус эквивалентного круга в нормальной к профилю плоскости, под воздействием которого формируется зона контакта.

Скорость вращения круга и его износостойкость определяются истинным радиусом круга  $R$ , а протяженность зоны контакта и ее воздействие на все четыре зоны при электроабразивном шлифовании — эквивалентным радиусом круга  $R_{\text{экв}}$ , который может быть вычислен на любом участке профильной поверхности. При чистовом шлифовании дополнительное растворение материала в зоне IV зависит от эквивалентных радиусов в отдельных сечениях профиля и возрастает с их увеличением. Это создает органическую погрешность при электроабразивном шлифовании профильных поверхностей, которая увеличивается при нежестком оборудовании, требующем применения выживающих проходов без радиального врезания круга.

Устранить возникающую при обработке погрешность профильных поверхностей возможно за счет снятия части припуска при значительно пониженном напряжении или при выключенном технологическом токе. При этом токопроводящие абразивные круги должны удовлетворять ряду особых требований с точки зрения обеспечения качества поверхностного слоя. Наиболее полно этим требованиям отвечают токопроводящие абразивные круги на органической связке с крупночешуйчатым графитом в качестве токопроводящего компонента.

Рассмотренный метод электроабразивного шлифования является классическим с точки зрения совмещения двух процессов и полного использования электрохимического растворения для съема части материала.

Существуют другие методы электроабразивного шлифования, в которых основной съем материала производится за счет абразивного резания, а наложение электрического тока только поддерживает режущую поверхность круга в оптимальном режущем состоянии, не давая ему засаливаться.

Это, прежде всего, методы **электроалмазного шлифования** титановых сплавов специальными алмазными кругами на жестких металлических связках типа М5-9. Наложение электрического тока прямой (деталь является анодом) или обратной (круг является анодом) полярности позволяет алмазным зернам полностью изнашиваться, а не выкрашиваться из связки, благодаря чему достигается наивысшая стойкость инструмента при обработке титанового сплава. Для реализации процесса помимо наличия специальных токопроводящих кругов на металлических или органических связках, необходимо иметь составляющие для осуществления процесса ЭХО: источник постоянного тока с регулируемым напряжением в пределах 5–20 В, электролит и систему его подачи в зону обработки, а также систему отвода и очистки электролита от продуктов анодного растворения, систему защиты от брызг и паров электролита.

В качестве источника питания применяются источники постоянного тока для гальванических ванн типа ВАКТ 12/6-60, ВАКТР 12/6-1500 и другие.

Электролитами при электроабразивном шлифовании чаще всего являются неагрессивные растворы калиевой и натриевой селитры (10–15%  $\text{KNO}_3$  или  $\text{NaNO}_3$ ) с добавкой 0,5% нитрита натрия в качестве антикоррозионного компонента. Применяются и более сложные составы.

Требования к станку для электроабразивного шлифования:

- рабочий стол должен иметь широкий диапазон подач от 10–200 мм/мин — при глубинном шлифовании до 1–5 м/мин — при чистовом шлифовании;
- плита для закрепления детали и подшипники шпинделя электрически изолированы от массы станка;
- к детали и токопроводящему кругу подводиться технологический ток с помощью специальных токопроводов;
- зона обработки должна быть оборудована отсосной вентиляцией и надежным ограждением от разбрызгивания электролита;
- на столе станка устанавливается приспособление для правки круга вращающимся алмазным роликом или другим методом.

На рисунке 9.13 показана схема станка для плоского электроабразивного шлифования.

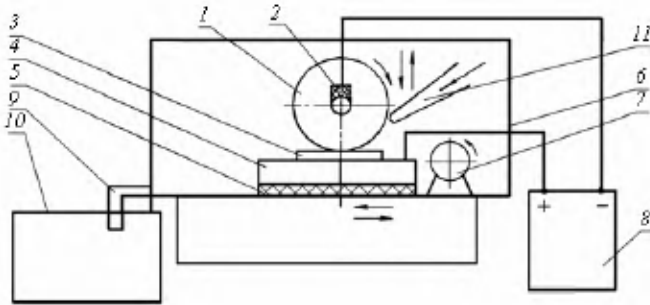


Рис. 9.13

*Схема станка для плоского и профильного шлифования:*

1 — токопроводящий круг; 2 — токоподвод; 3 — обрабатываемая заготовка; 4 — магнитная плита; 5 — изолирующая плита; 6 — ограждение; 7 — правящий ролик; 8 — источник питания; 9 — слив электролита; 10 — бак электролита; 11 — подвод электролита.

Требования к станку сформулированы применительно к специальным токопроводящим кругам на органической связке, заправляемым по сложному профилю обычными средствами для правки абразивных кругов, например, алмазными профильными правящими роликами.

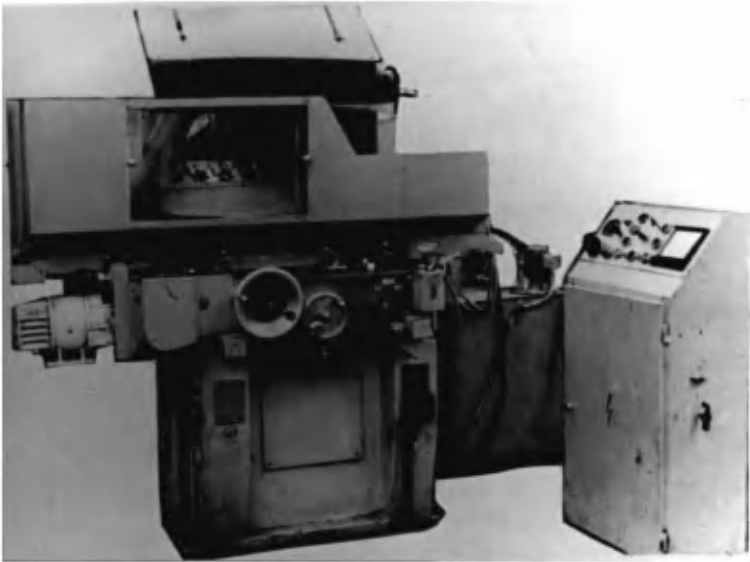
Станок должен работать как в режиме глубинного шлифования на медленных подачах двача стола, так и чистового на повышенных скоростях движения стола (маятниковое шлифование).

Подобное оборудование промышленность не выпускает. В НПО «Сатурн» разработана модернизация плоскошлифовальных, круглошлифовальных, внутришлифовальных, токарно-лобовых и токарно-карусельных станков для условий электроабразивного шлифования различных поверхностей. На рисунке 9.14 приведен общий вид модернизированного для электроабразивного шлифования плоских и профильных поверхностей плоскошлифовального станка модели ЗГ-71.

К наиболее эффективным случаям применения электроабразивного шлифования можно отнести:

- обработку поверхностей без образования остаточных напряжений и наклепа;
- профильную обработку тонкостенных деталей без образования заусениц (рис. 9.15а);

- чистовую обработку сотовых уплотнений авиационных двигателей без образования заусениц (рис. 9.15б);
- электроалмазную обработку поверхностей компрессорных лопаток из титановых сплавов (рис. 9.15в);
- электроалмазную резку различных материалов (рис. 9.15г);
- высококачественную заточку лезвийного инструмента;
- обработку торцевых, радиусных, наружных и внутренних поверхностей на ответственных деталях ГТД из сверхтруднообрабатываемых лезвийными методами и всеми видами обычного шлифования материалов, особенно в условиях пониженной жесткости.



**Рис. 9.14**

*Общий вид станка для электроабразивного шлифования плоских и профильных поверхностей (модернизация шлифования плоскошлифовального станка ЗГ-71)*

**К основным недостаткам процесса можно отнести:**

- усложнение конструктивных элементов систем и узлов станка, необходимость изготовления их, а также оснастки, в антикоррозионном исполнении;
- сложность систем очистки электролитов от шлама, а также поддержания его оптимального состава;

- неблагоприятное воздействие на обслуживающий персонал электролита, особенно распыленного быстровращающимся инструментом.

Все процессы электроабразивного шлифования, в том числе правки круга, должны быть максимально автоматизированы и протекать с минимальным соприкосновением обслуживающего персонала с рабочей средой. Дальнейшее развитие процесса связано с применением систем ЧПУ.

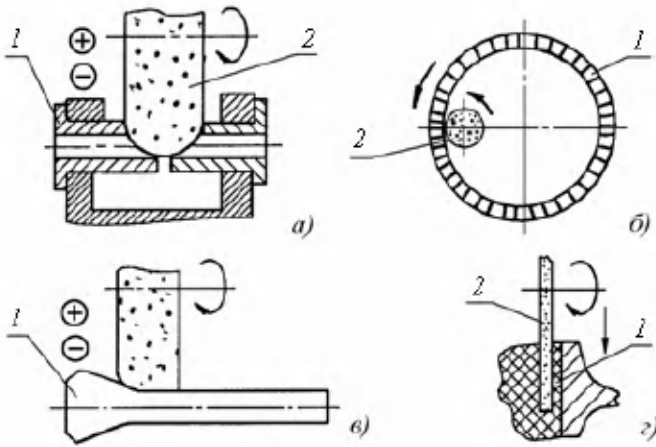


Рис. 9.15

*Эффективные случаи применения электроабразивного шлифования:*

1 — обрабатываемая заготовка; 2 — токопроводящий абразивный (алмазный) круг.

### 9.3. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА

При электроэрозионной обработке удаление материала производится импульсными разрядами той или иной мощности за счет выбрасывания расплавленного материала и образования отдельных лунок (кратеров). Сам по себе электрический разряд — явление очень сложное и может проявляться в разных формах.

Электроэрозионная обработка производится в диэлектрической среде, в которой происходит электрический пробой. Можно проследить образование искрового разряда на электродах между которыми находится ионизированный с помощью рентгеновских лучей воздух, становящийся проводником тока, величина которого зависит от разности потенциалов.

Типичная вольтамперная характеристика электрического разряда может быть представлена следующим образом (рис. 9.16).

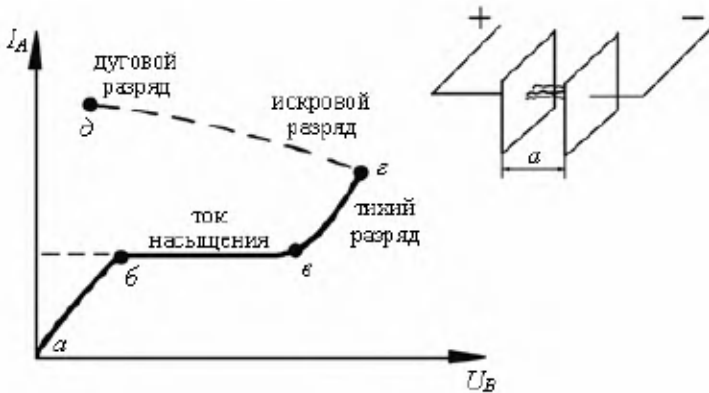


Рис. 9.16

*Вольтамперная характеристика искрового разряда*

На участке  $a-b$  с увеличением напряжения пропорционально увеличивается величина тока. На участке  $b-в$  в протекании тока участвуют все ионы, а скорость образования ионов становится неизменной. Стадия тихого разряда после точки  $в$  связана с быстрым увеличением скорости образования новых ионов, где появляется свечение и своеобразный шум.

После точки  $г$  возникает искровой разряд, сопровождаемый тепловым и звуковым эффектом.

Если мощность источника невелика, то разряд приводит к падению напряжения и его увеличению до образования новой искры. Если мощность достаточна, то искровой разряд может перейти в устойчивый дуговой при низком напряжении с выделением большого количества тепла (точка  $д$ ). Температура при искровом разряде достигает значения  $10000^{\circ}\text{C}$  и поэтому способна разрушить любой материал. Нечто подобное происходит при бесконтактных электроэрозионных методах обработки с ионизацией и пробоем диэлектрической жидкости (масло, керосин, дистиллированная вода) между электродами находящимися на гарантированном зазоре  $a$ .

Электроэрозионная обработка подразделяется на электроконтактную, анодно-механическую, электроимпульсную, электроискровую, высокочастотную, электроэрозионную.

Методы перечислены от самых грубых до высокоточных чистовых производительностью от 1 000 000 мм<sup>3</sup> до 0,1 мм<sup>3</sup> и Ra = 0,32–0,16 мкм. Они отличаются способами генерации импульсов. При электроконтактной и анодно-механической обработке генерация импульсов осуществляется за счет возникновения кратковременных контактов между инструментом и деталью.

### 9.3.1. Механизм образования эрозионной лунки

Разряды в межэлектродном промежутке могут быть 2-х разновидностей.

Капли расплавленного материала и его пары беспрепятственно удаляются из зоны разрядов. Съем материала происходит в основном за счет тепла в канале разряда, проникновение тепла в глубь материала незначительно.

После разряда электроды замыкаются выплавленным из них материалом, который был выброшен из зоны разряда. Подобный вариант может быть при малом зазоре. При следующем импульсе мостики замыкания разрушаются и процесс продолжается дальше.

На рисунке 9.17 схематически показано возникновение единичного разряда. Средняя величина межэлектродного промежутка зависит от величины напряжения и мощности разрядов. Обработка производится при сравнительно небольшом напряжении (не более 250–300 В).

На рисунке 9.18 показаны реальные эрозионные лунки от единичного разряда.

На малых зазорах воздух имеет большую электрическую прочность, чем масло. Загрязнение рабочей жидкости приводит к увеличению рабочего зазора. Эффект эрозии зависит от параметров единичных импульсов, которые характеризуются величиной напряжения тока и частоты.

Энергия импульса является одной из важных характеристик, так как она определяет эффект эрозии и шероховатость.

$$W_n = \frac{I_{cp} \cdot U_{cp}}{f},$$

где  $I_{cp}$  — средняя величина тока;  $U_{cp}$  — средняя величина напряжения;  $f$  — частота импульсов.

Скважность  $q = T/\tau_n$ , где  $T$  — период следования импульсов,  $\tau_n$  — продолжительность непосредственного протекания тока в импульсе.

Протекание импульсов напряжения и вызываемых импульсов рабочего тока в рабочем зазоре при ЭЭО приведено на рисунке 9.19.

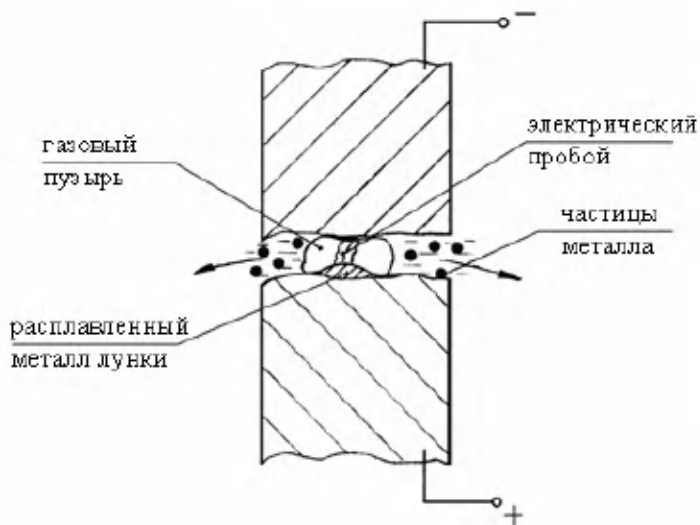


Рис. 9.17

*Схема единичного разряда*

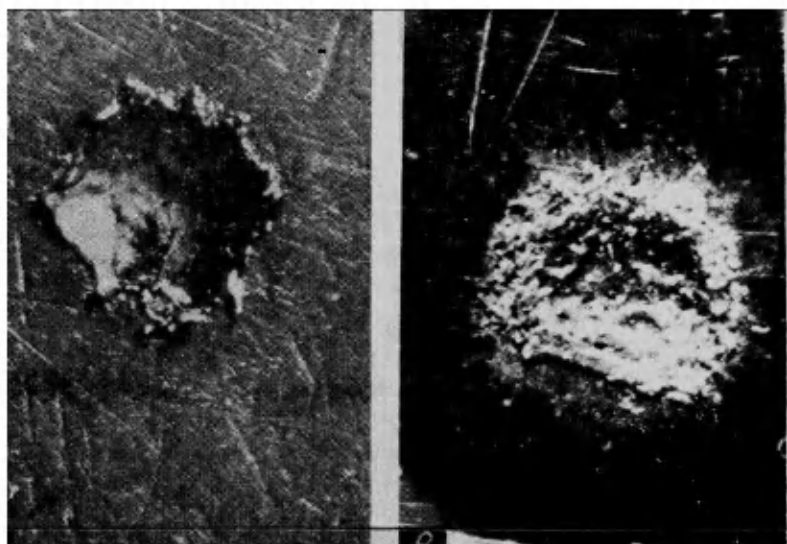


Рис. 9.18

*Электроэрозионные лунки от мощного единичного разряда ( $\times 20$ )*

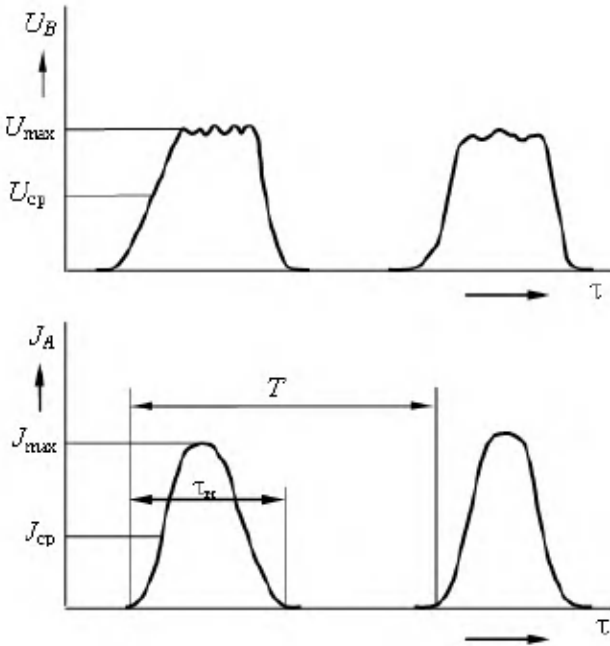


Рис. 9.19

*Импульсы напряжения и тока при электроэрозионной обработке*

Для RC-генератора (рис. 9.20) энергия импульсных разрядов при постоянном напряжении ( $U = 100$  В) легко регулируется емкостью конденсатора  $Z$ , изменяя рабочий ток  $I_{\max}$  и продолжительность импульса  $\tau_{\text{и}} = 4$  мкс. Изменение энергии импульса приводит к изменению размеров лунки и объема выброшенного расплавленного материала. Так, при емкости конденсатора 1 мкФ  $I_{\max} = 40\text{--}60$  А,  $\tau_{\text{и}} = 4$  мкс. При этом глубина единичной лунки (рис. 9.17) равна 0,015 мм, диаметр лунки равен 0,1 мм, объем лунки — 0,00008 мм<sup>3</sup>. При емкости конденсатора 2000 мкФ —  $I_{\max} = 1400\text{--}1800$  А,  $\tau_{\text{и}} = 240$  мкс, глубина лунки — 0,05 мм, диаметр — 2,0 мм, объем лунки — 0,1 мм<sup>3</sup>.

Обрабатываемость различных материалов можно оценить критерием Л. С. Палатника

$$\Pi = C \cdot \gamma \cdot \lambda \cdot T_{\text{пл}}^2,$$

где  $C$  — теплоемкость;  $\gamma$  — плотность;  $\lambda$  — теплопроводность;  $T_{\text{пл}}$  — температура плавления (все величины относятся к обрабатываемому материалу).

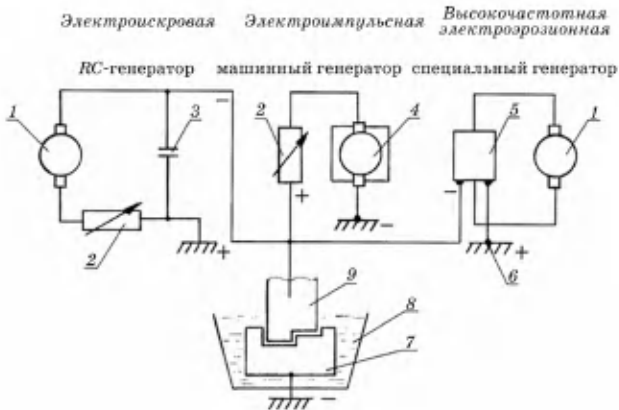


Рис. 9.20

Схемы методов электроэрозионной обработки:

- 1 — генератор постоянного напряжения; 2 — регулируемое сопротивление; 3 — конденсатор; 4 — машинный генератор импульсов; 5 — специальный высокочастотный генератор; 6 — подключение полярности детали; 7 — обрабатываемая деталь; 8 — рабочая ванна с диэлектрической жидкостью; 9 — электрод; TTTT — полярность обрабатываемой детали.

Относительная обрабатываемость материалов приведена в таблице 9.2.

Таблица 9.2

### Относительная обрабатываемость различных материалов

Обрабатываемые материалы	Относительная обрабатываемость
Стали низколегированные	1,0–1,1
Чугуны	0,6–1,0
Стали жаропрочные	1,3–2,7
Сталь нержавеющая 1X18H9T	1,2–1,3
Твердые сплавы	0,009–0,330
Алюминиевые сплавы	1,3–1,6

Методы электроэрозионной обработки отличаются применяемыми генераторами импульсов и полярностью электродов (рис. 9.20).

RC-генераторы являются наиболее простыми, надежными и широко применяются в электроэрозионных станках, которые до сих пор не вытеснены более совершенными и современными станками со специальными высокоточными электронными генераторами.

Параметры применяемых методов электроэрозионной обработки приведены в таблице 9.3.

Таблица 9.3

**Основные параметры применяемых методов  
электроэрозионной обработки**

Параметры	Метод электроэрозионной обработки		
	Электроимпульсная	Электроискровая	Высокочастотная электроэрозионная
$\tau_{и}$ , мкс	$10^2-10^3$	$10-10^2$	$10^{-1}-10$
$U_{\max}$ , В	20-100	150-350	10-250
$f$ , кГц	0,1-8	8-500	22-1760
$W_{и}$ , Дж	50-5	$10-5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}-10^{-5}$

По своей сути электроэрозионная обработка связана с повторяющимися электроэрозионными разрядами (импульсами), имеющими на определенном зазоре «а» определенную мощность (количество энергии), зависящую от пробойного напряжения  $U_{пр}$  и частоту  $f$ . Зазор «а» задается таким, чтобы необходимое пробойное напряжение источника питания, было меньше напряжения источника питания  $U_{ист}$ .

На рисунке 9.21 приведена диаграмма заряда конденсатора RC-генератора и возникновения периодических пробойных импульсов.

Нарастание напряжения на конденсаторе по времени  $U_{ci}$  описывается достаточно простой зависимостью:

$$U_{ci} = U_{ист} \left( 1 - e^{-\frac{\tau_i}{RC}} \right),$$

где  $U_{ист}$  — напряжение источника питания, В;  $e$  — основание натуральных логарифмов;  $\tau_i$  — время от начала зарядки, с;  $R$  — величина токоограничивающего сопротивления, Ом;  $C$  — емкость конденсатора, мкФ.

Энергия, запасенная конденсатором и затраченная на единичный импульс равна:

$$W_{конт} = W_{имп} = \frac{CU_{кр}^2}{2}, \text{ Дж.}$$

Производительность процесса электроэрозионной обработки зависит не только от энергии единичных импульсов, но также от частоты их следования и может быть оптимизирована.

Для RC-генератора при известных параметрах процесса частоты следования импульсов  $f_{и}$  определяется по формуле

$$f_{и} = \frac{1}{R \cdot C \cdot \ln \frac{U_{ист}}{U_{ист} - U_{поб}}}, \text{ Гц.}$$

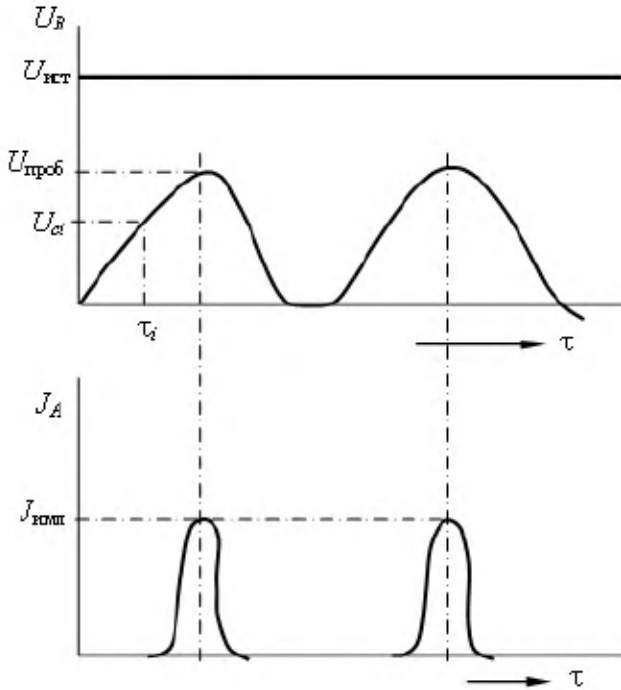


Рис. 9.21

*Динамика заряда кондуктора RC-генератора и возникновения пробойного единичного импульса*

### 9.3.2. Регулирование межэлектродного промежутка

Величина межэлектродного промежутка  $a$  как параметр регулирования не используется, т. к. измерения его в процессе обработки затруднительно. Выбирают такие параметры, которые косвенно отражают зазор. Это напряжение (среднее или амплитудное) или ток, проходящий через промежуток. Простыми и надежными являются электромеханические регуляторы, выполненные по мостовой схеме (рис. 9.22).

Одним из плеч моста является переменное сопротивление искрового промежутка  $a$ , вызывающего то или иное направление вращения серводвигателя, поддерживающего установленный параметр межэлектродного промежутка  $a$ . Применяются также для чистовых точных операций более совершенные электронные регуляторы межэлектродного промежутка.

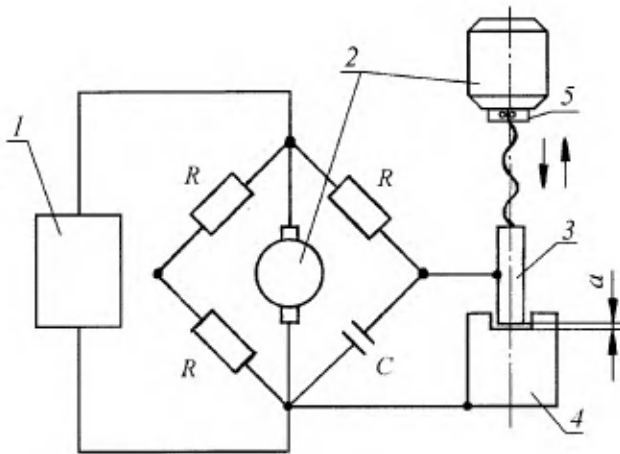


Рис. 9.22

*Мостовая схема поддержания установленного параметра межэлектродного промежутка  $a$ :*

1 — источник; 2 — двигатель электропривода; 3 — электрод; 4 — обрабатываемая заготовка; 5 — шаровинтовая пара.

Применение в современном станкостроении линейных двигателей для придания движения рабочим элементам станков внесло революционные изменения в технику приводов, повысив динамику, скорости движения, ускорения, упростив конструктивно. Особенно продуктивным стало применение линейных двигателей в электроэрозионных станках, где постоянное реверсирование исправления движения электрода требуется для поддержания рабочего зазора. Незначительное изменение оптимального рабочего зазора в сторону его увеличения или уменьшения резко повышает количество неэффективных импульсов, делая их или холостыми (ослабленными) при увеличении зазора, или близкими к короткозамкнутому с затрудненным удалением продуктов разрушения и газов при уменьшении.

Каким бы совершенным и современным не был задающий блок регулятор параметров межэлектродного промежутка, решающее значение в поддержании его оптимального значения оказывает исполнительный орган — двигатель электрода. Применяемые традиционные приводы с

шариковой парой 5 (рис. 9.22), даже при их идеальном исполнении обладают низкой динамикой, инерционностью и наличием мертвых ходов при реверсе, образуя зону нечувствительности (рис. 9.23).

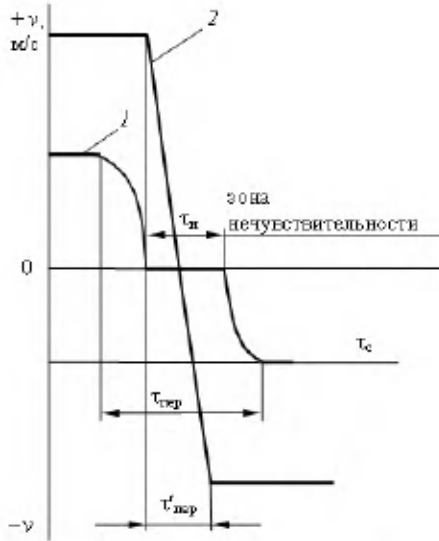


Рис. 9.23

*Сравнительная динамика движения реверса электродов при электроэрозионной обработке с разными приводами:*

1 – традиционный с шариковой парой; 2 – привод с линейными двигателями.

Применение линейных двигателей для привода движения электрода кардинально меняет ситуацию. Линейный двигатель, состоящий из двух элементов — плоского электромагнитного статора и плоского магнитного подвижного элемента (ротора), которые не имеют никаких промежуточных передельных звеньев, разделением воздушным промежутком с минимальными силами трения только в направляющих подвижного ротора. В таком приводе заданные регулирующие движения электрода реализуются без люфтов, мертвых ходов, неравномерного движения и без наличия зоны нечувствительности (рис. 9.23). Время  $t_{\text{пер}}$  перехода с одного направления движения на другое (реверс) в линейном приводе по сравнению с приводом с шариковой парой резко сокращается. На прошивочных операциях линейные приводы обеспечивают принципиально новый способ

удаления продуктов эрозии из зоны обработки путем применения быстрых (100 мм/с) с ускорением до  $2G$  движений электрода при повышенной амплитуде наподобие поршня, выталкивающего из зоны жидкость с продуктами износа.

В результате при обработке глубоких полостей процесс идет устойчиво без падения производительности. В целом, применение линейных двигателей на прошивочных операциях увеличивает производительность электроэрозионной обработки более чем в 2 раза с одновременным повышением точности формы обрабатываемых полостей.

### 9.3.3. Прецизионная обработка непрофилированным электродом-проволокой

Электроэрозионная обработка деталей сложной формы тонкой медной, латунной и вольфрамовой проволокой (рис. 9.24) в последние десятилетия интенсивно развивалась и в настоящее время широко применяется из-за ряда преимуществ:

- высокой точности;
- оптимального качества поверхностного слоя;
- возможности обработки деталей любой сложности из любого труднообрабатываемого материала.

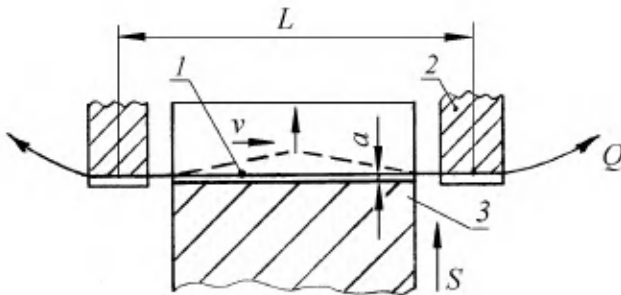


Рис. 9.24

*Схема обработки непрофилированной подвижной проволокой:*

1 — электрод-проволока; 2 — направляющая; 3 — обрабатываемая заготовка;

$L$  — расстояние между направляющими;  $S$  — рабочая подача при вырезании;

$Q$  — натяжение проволоки;  $v$  — скорость движения проволоки.

Точность обработки проволокой зависит от толщины обрабатываемых деталей (расстояния между направляющими

пазами проволоки) и толщины самой проволоки. В настоящее время возможна обработка деталей толщиной  $H = 200$  мм и даже до  $H = 500$  мм.

**Основная погрешность** обработки возникает от колебания проволоки под воздействием силы от электрических разрядов. Амплитуда колебаний зависит от толщины проволоки, силы натяжения  $Q$  и расстояния между направляющими пазами  $L$  (рис. 9.25).

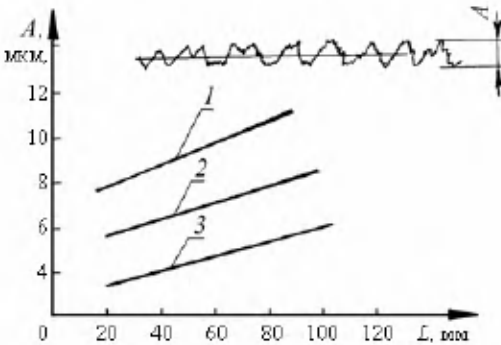


Рис. 9.25

Амплитуда колебания проволоки в зависимости от различных условий обработки и материала проволоки:

- 1 — Cu 0,1 мм,  $Q = 80$  г,  $v = 12$  мм/с; 2 — Cu 0,1 мм,  $Q = 120$  г,  $v = 12,5$  мм/с;  
3 — W (ВА-3) 0,03 мм,  $Q = 60$  г,  $v = 7$  мм/с.

Амплитуда колебаний  $A$  вольфрамовой (ВА-3) проволоки  $\varnothing 0,015$  мм составляет 0,002–0,004 мм,  $\varnothing 0,03$ –0,004–0,009 мм. Уменьшение погрешностей достигается точным изготовлением направляющих пазов, выбором меньшего диаметра проволоки с оптимальным натяжением, уменьшением скорости движения проволоки и уменьшением расстояния между направляющими пазами.

В настоящее время может применяться проволока с  $\varnothing 0,005$ –0,010 мм. Разрывная сила для  $\varnothing 0,005$  мм — 4,5 г,  $\varnothing 0,1$  — 24 г. Особые требования предъявляются к натяжному механизму с электромагнитным торможением.

Точность обработки на современных вырезных станках достигается в пределах 1–2 мкм.

Применение линейных двигателей на проволочных вырезных станках продвинуло метод электроэрозионной обработки в область нанотехнологий. Специальные аэростатические направляющие и сверхточные датчики линейных

перемещений позволили фирме «Содин» (Япония) на станке EXC-100L достичь дискретности подач 10 нм (0,01 мкм), шероховатости  $Ra = 0,03$  мкм, точности профильной обработки в пределах 0,5 мкм. Применение линейных двигателей на проволочных вырезных операциях в среднем повышает производительность не менее чем в 2 раза, существенно повышая точность.

На представленном ниже рисунке 9.26 приведен общий вид участка обработки деталей на электроэрозионных станках на ОАО «НПО «Сатурн», целью создания которого является:

- выполнение обработки тонкостенных поверхностей деталей без деформирования стенок (сотовые уплотнения);
- обеспечение возможности выполнения обработки фасонных поверхностей на деталях турбины из высокопрочных материалов;
- возможность прошивки отверстий в пяти координатах за одну установку детали;
- выполнение фасонной вырезки сложнопрофильных деталей;
- обеспечение разрезки кольцевых деталей вместо фрезерования.



**Рис. 9.26**

*Общий вид участка обработки деталей на электроэрозионных станках*

В настоящее время внедрены следующие технологические процессы:

- обработка диаметральных торцевых и уплотнительных канавок в блоках лопаток СА;
- прошивка отверстий и пазов;
- вырезка фасонных поверхностей (проволокой);
- разрезка кольцевых деталей на секторы толщиной реза 0,3 мм;
- обработка сотовых уплотнений в кольцевых деталях.

На рисунках 9.27–9.40 приведены общие виды станков для электроэрозионной обработки и примеры обрабатываемых на них деталей.



**Рис. 9.27**

*Общий вид высокоскоростного сверлильного электроэрозионного станка с ЧПУ (с глобусным столом) ES024*

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Размеры стола (длина x ширина x высота), мм	800 x 959 x 60
Перемещение по оси X, мм	300
Перемещение по оси Y, мм	250
Перемещение по оси W, мм (ось направляющей)	250
Перемещение по оси Z, мм (ось следящего устройства)	250
Диаметр глобусного стола, мм	180
Максимальный диаметр электрода, мм	0,05 .. 2,0
Максимальное число оборотов, об/мин	2000

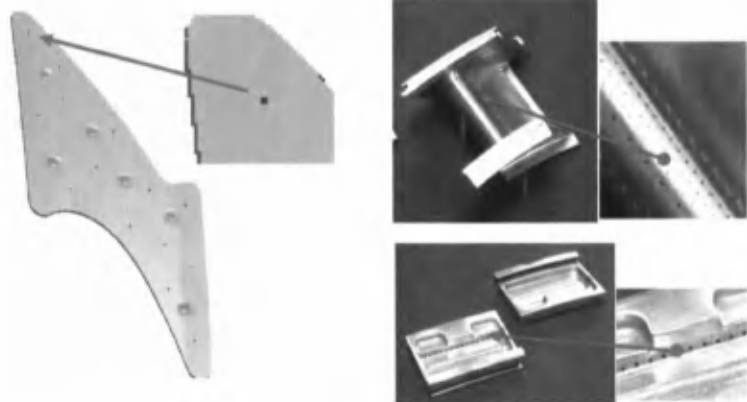


Рис. 9.28

*Примеры обрабатываемых деталей и поверхностей*



**Рис. 9.29**

*Общий вид электроэрозионного станка для проволочной резки FA 10VM*

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Максимальные размеры обрабатываемой детали (длина x ширина x высота), мм	800 x 600 x 215
Максимальный вес обрабатываемой детали, кг	500
Размеры стола (длина x ширина), мм	590 x 514
Величина хода по осям (X x Y)	350 x 250
Величина хода по осям U V	$\pm 32$ x $\pm 32$
Максимальный угол обрабатываемого конуса	$\pm 15^\circ/100$ мм
Диаметр проволоки, мм	от 0,2 до 0,36

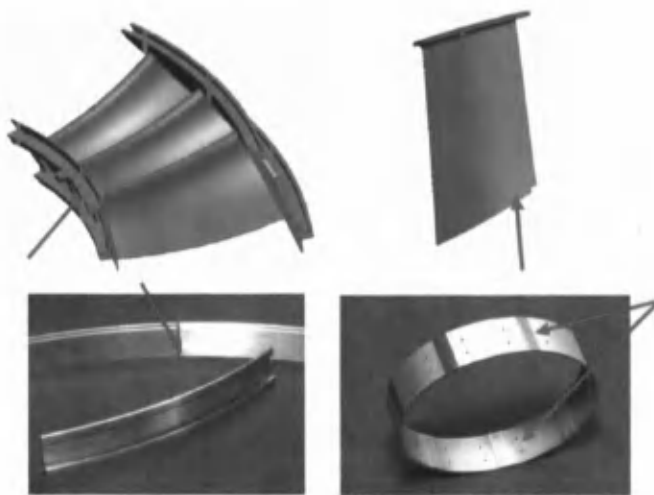


Рис. 9.30

*Примеры обрабатываемых деталей и поверхностей*



**Рис. 9.31**

*Общий вид электроэрозионного станка для проволочной резки FA 30VM*

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Максимальные размеры обрабатываемой детали (длина x ширина x высота), мм	1030 x 1000 x 345
Максимальный вес обрабатываемой детали, кг	3000
Размеры стола (длина x ширина), мм	1110x 875
Величина хода по осям (X x Y)	750 x 500
Величина хода по осям U V	$\pm 75 \times \pm 75$
Максимальный угол обрабатываемого конуса	$\pm 15^\circ / 260$ мм
Диаметр проволоки, мм	от 0,2 до 0,36

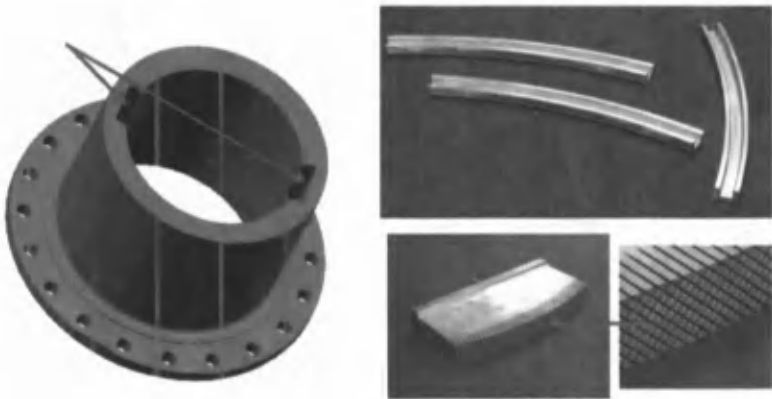


Рис. 9.32

*Примеры обрабатываемых деталей и поверхностей*



**Рис. 9.33**

*Общий вид электроэрозионного прошивочного станка с ЧПУ EA 12E*

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Максимальные размеры обрабатываемой детали мм (ширина x длина x высота)	800 x 550 x 250
Максимальный вес обрабатываемой детали, кг	700
Размеры стола, мм	700 x 500
Диапазон перемещений стола вправо влево, мм	400
Диапазон перемещений стола вперед назад, мм	300
Перемещение по оси Z, мм	300

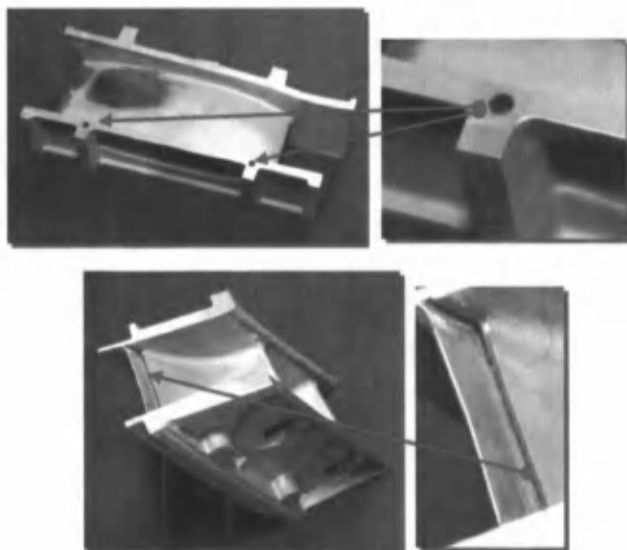
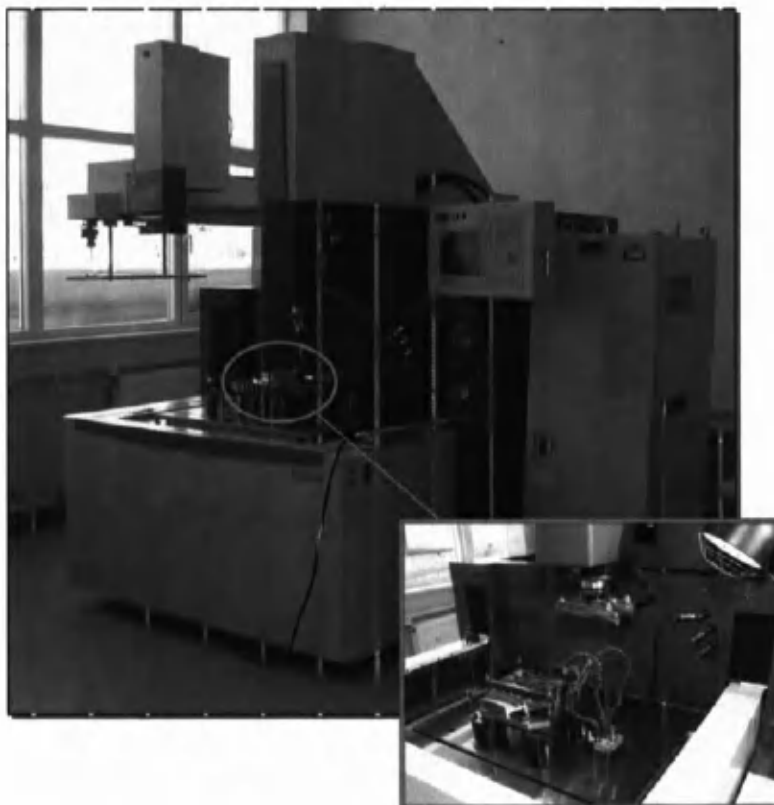


Рис. 9.34

*Примеры обрабатываемых деталей и поверхностей*



**Рис. 9.35**

*Общий вид электроэрозионного прошивочного станка с ЧПУ EA 22ME*

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Максимальные размеры обрабатываемой детали, мм (ширина x длина x высота)	950 x 680 x 300
Максимальный вес обрабатываемой детали, кг	1000
Размеры стола, мм	8500 x 600
Диапазон перемещений стола вправо/влево, мм	500
Диапазон перемещений стола вперед/назад, мм	400
Перемещение по оси Z, мм	350

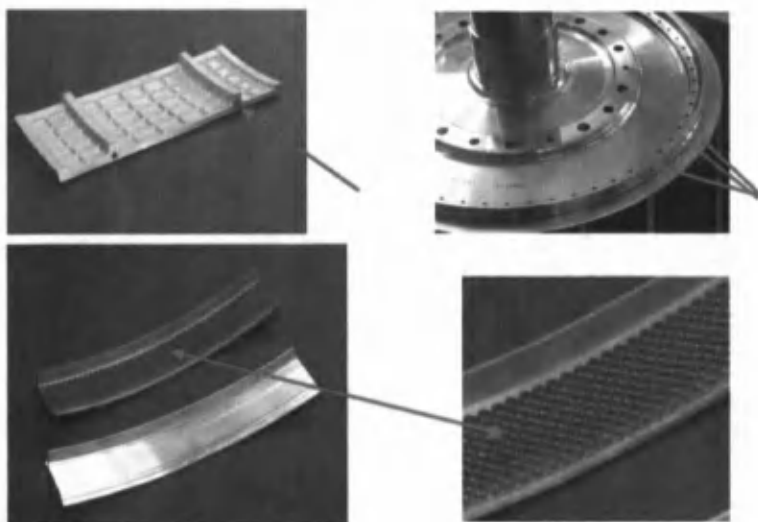
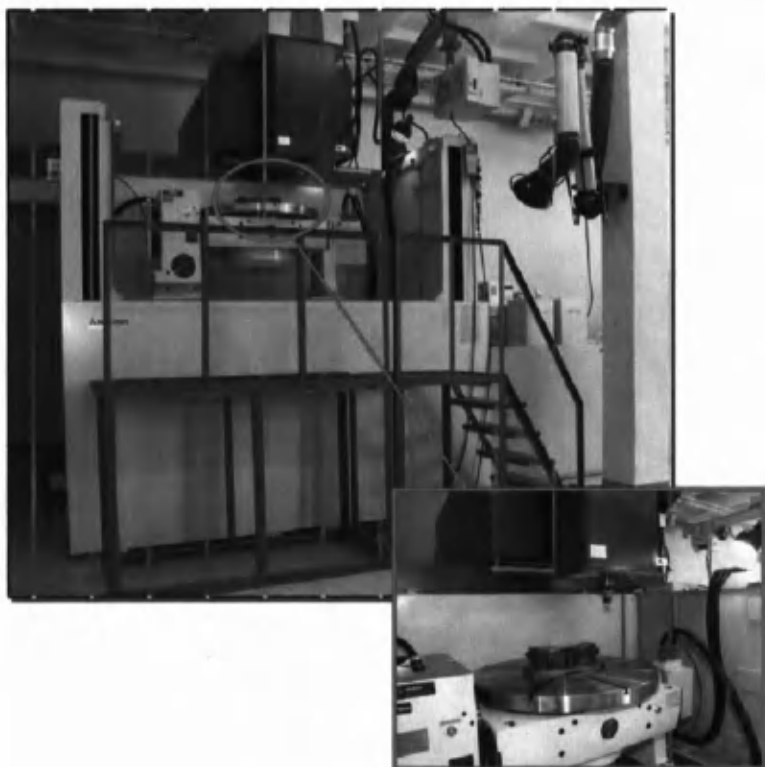


Рис. 9.36

*Примеры обрабатываемых деталей и поверхностей*



**Рис. 9.37**

*Общий вид электроэрозионного прошивочного станка с ЧПУ  
(с глубоким столом) EA 50*

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Максимальные размеры обрабатываемой детали, мм (ширина x длина x высота)	2400 x 1500 x 1150
Максимальный вес обрабатываемой детали, кг	5000
Размеры стола, мм	2000 x 1350
Диапазон перемещений стола вправо/влево, мм	1500 (2000)
Диапазон перемещений стола вперед/назад, мм	600
Перемещение по оси Z, мм	600
Диаметр глобусного стола, мм	1000
Максимальный вес обрабатываемой детали на глобусном столе кг	500



Рис. 9.38

*Примеры обрабатываемых деталей и поверхностей*



**Рис. 9.39**

*Общий вид электроэрозионного прошивочного станка с ЧПУ EA 40*

### ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Максимальные размеры обрабатываемой детали мм (ширина x длина x высота)	1500 x 1000 x 400
Максимальный вес обрабатываемой детали, кг	3000
Размеры стола, мм	400 x 950
Диапазон перемещений стола вправо влево, мм	1000
Диапазон перемещений стола вперед назад, мм	600
Перемещение по оси Z, мм	450

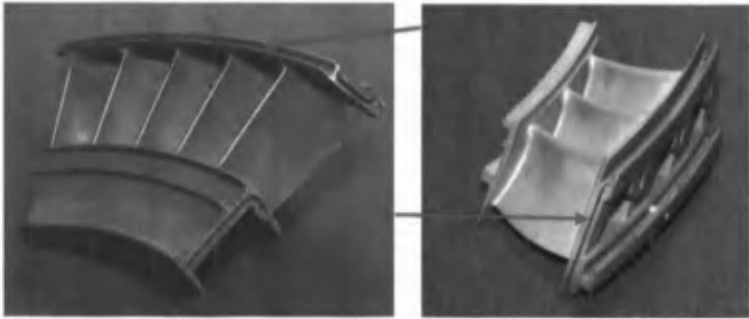


Рис. 9.40

*Примеры обрабатываемых деталей и поверхностей*

## 9.4. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА

Ультразвуковая обработка основана на использовании ультразвуковых колебаний, обеспечивающих разрушение обрабатываемого материала заготовки абразивными или алмазными зернами под ударами инструмента, колеблющегося с ультразвуковой частотой (свыше 16 кГц) и интенсивностью более 10 Вт/см<sup>2</sup>.

Ультразвуковая обработка включает группу технологических процессов, осуществляемых различными методами

(механическими, химическими и др.), выполняемыми при обязательном воздействии на заготовку, инструмент или среду, в которой происходит обработка, механических колебаний ультразвуковой частоты. Источником ультразвука служат магнитострикционные преобразователи, возбуждаемые от ультразвукового генератора.

*Процессы, выполняемые с воздействием ультразвуковых колебаний*, можно классифицировать по технологическим особенностям.

1. Ультразвуковая абразивная обработка осуществляется с использованием свободных (незакрепленных) абразивных зерен, а также инструментами (кругами, брусками) из абразива или алмаза.

2. Ультразвуковая комбинированная обработка включает процессы ультразвуковой механической обработки резанием и электрохимической ультразвуковой обработки. Для этих процессов характерно интенсифицирующее дополнительное воздействие ультразвуковых колебаний, а их основой является соответственно обработка резанием или электрохимическая обработка.

3. Ультразвуковая очистка, осуществляемая непосредственно при выполнении технологической операции очистки заготовок и деталей от загрязнений, окалины и т. д., а также абразивных кругов от шлама непосредственно в процессе шлифования. Процесс ультразвуковой очистки основан преимущественно на кавитации и акустических течениях. Например, при изготовлении деталей ГТД из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов типа ЖС6К, ЖС6УВИ успешно применяется очистка шлифовального круга от шлама при подаче СОТС через поры круга. В качестве источника ультразвуковых колебаний используют, например, установку УЗУ-025 с пьезокерамическими преобразователями ПП 01/18 с частотой колебаний 18,7 кГц и амплитудой колебаний  $A = 5$  мкм.

Применение комбинированного охлаждения при шлифовании лопаток турбины из сплава ЖС6УВИ напорной струей, а также на торец круга с наложением ультразвуковых колебаний обеспечивает очистку круга от шлама и повышает качественные показатели процесса: снижение силы резания на 10–35%, уменьшение шероховатости шлифованной поверхности на 23–27%, создание наиболее благоприятных остаточных напряжений и увеличение коэффициента шлифования в 2,6 раза.

Ультразвуковая интенсификация также применяется в металлургических (теплообменные процессы в расплавах)

и гальванических (меднения, никелировании, серебрении и т. п.) процессах, в соединениях (металлизации, пайке, сварке).

Ультразвуковые колебания применяются: при сверлении отверстий различной формы; формообразовании различных поверхностей из закаленных сталей, жаропрочных и титановых сплавов; нарезании резьбы, например метчиками с малыми сечениями среза с обеспечением повышения стойкости и исключения поломок инструмента; при лезвийной обработке с вынужденными колебаниями малой амплитуды ( $A = 3-10$  мкм) инструмента или заготовки.

Схема ультразвуковой обработки приведена на рисунке 9.41.

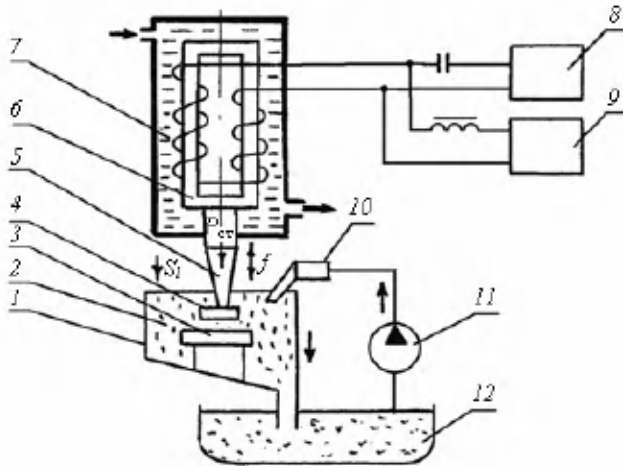


Рис. 9.41

Схема ультразвуковой обработки

В процессе обработки инструмент-пуансон 4, колеблющийся с ультразвуковой частотой, ударяет по зернам абразива 2, находящимся на обрабатываемой поверхности заготовки 3, помещенной в ванну 1. При ударах абразивные зерна скалывают частицы материала заготовки. Инструмент закреплен на волноводе 5, который установлен и закреплен в магнитострикционном сердечнике 6, помещенном в кожухе 7, через который пропускается вода для охлаждения сердечника. Возбуждение колебаний сердечника магнитострикционного преобразователя обеспечивается генератором ультразвуковой частоты 8 и источником 9.

постоянного тока 9. Абразивная суспензия с помощью насоса 11 прокачивается из емкости 12 через патрубок 10 в ванну 1.

При ультразвуковой обработке главным движением являются колебания инструмента. Подача инструмента  $S$  может быть вертикальной, продольной или поперечной в зависимости от вида обработки. Волновод с инструментом может воздействовать на заготовку с небольшой статической силой  $P_{ст} = 30-200$  Н.

Сердечник изготавливается из магнитострикционных материалов (никель, железоникелевые, железокобальтовые, железоалюминиевые и др.). Материал инструмента выбирается в зависимости от обрабатываемого материала. Он может изготавливаться из твердого сплава, закаленных сталей и других материалов.

Точность обработки ультразвуковым методом зависит от величины зерна и материала абразива и соответствует 9-6 квалитетам, шероховатость обработанной поверхности  $Ra = 1,6-0,025$  мкм.

Ультразвуковое оборудование для механической обработки может быть стационарным (станки) и переносным. Переносные устройства имеют мощность до 20-50 Вт и применяются для ультразвукового клеймения, гравирования, сверления отверстий малого диаметра.

На рисунке 9.42 приведена схема ультразвукового станка. Он содержит станину 1, координатный стол 2 для закрепления заготовки 3, акустическую головку 5, включающую ультразвуковой преобразователь 6 и рабочий инструмент 4, механизм подачи акустической головки и создания статической нагрузки инструмента на заготовку 8, источник питания (ультразвуковой генератор) 7, систему принудительной подачи и сброса абразивной суспензии 9.

Механизм подачи колебательной системы в ультразвуковых станках служит для создания статической нагрузки инструмента на заготовку и для поддержания этой нагрузки при обработке. Небольшая сила трения и высокая точность определяют качество механизма подачи. Механизм подачи должен также обеспечивать безударный подвод инструмента к заготовке и возможность реагирования силы подачи.

Инструмент обычно изготавливается из среднеуглеродистых конструкционных и низколегированных сталей типа сталь 45, сталь 40Х, сталь 65Г. Повышение твердости инструмента снижает износ.

Относительный износ инструмента при ультразвуковой обработке различных материалов обратно пропорционален их обрабатываемости. При обработке стекла стальным инструментом износ последнего порядка 1–2%.

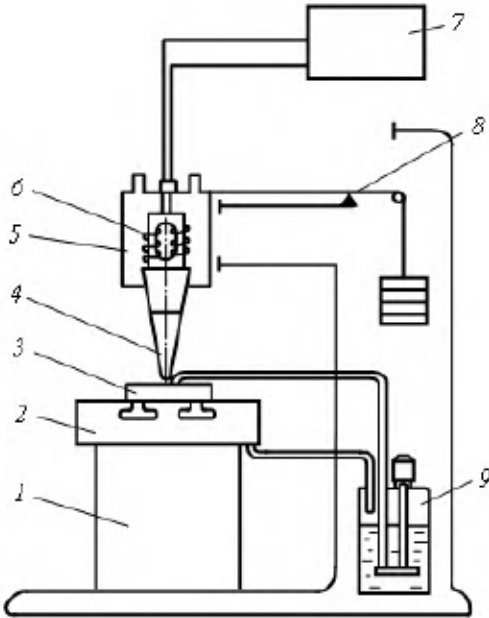


Рис. 9.42

*Принципиальная схема ультразвукового станка*

## 9.5. ЛУЧЕВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Лучевые методы обработки основаны на снятии обрабатываемого материала под воздействием сфокусированных лучей, имеющих высокую плотность энергии до  $10^6$ – $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. К лучевым методам обработки относят электронно-лучевую, светолучевую (лазерную) и плазменную обработку.

**Электронно-лучевая обработка** основана на воздействии сформированного пучка электронов, кинетическая энергия которого, преобразуясь в рабочей зоне в тепловую, вызывает нагрев, плавление или испарение обрабатываемого материала. Электронно-лучевым методом можно обрабатывать электропроводящие и неэлектропроводящие материалы с различными механическими свойствами.

Электронно-лучевая обработка применяется в следующих технологических процессах: локальный переплав (получение высокой скорости кристаллизации металла), плавка (получение особо чистых металлов), сварка, размерная обработка и др.

Основное применение электронно-лучевой обработки в авиадвигателестроении находит при перфорировании охлаждаемых лопаток, дефлекторов, экранов камер сгорания, прорезки узких щелей, пазов, канавок, сквозных и глухих отверстий и других элементов деталей.

При **светолучевой (лазерной) обработке** воздействие на материал оказывает сфокусированное полихроматическое (светолучевая обработка) или монохроматическое (лазерная обработка) излучение.

К процессам светолучевой обработки относятся разрезка и вырезка заготовок, легирование, упрочнение, сварка, пайка, маркировка и др.

Перспективными направлениями применения лазерной технологии являются:

- комбинированные методы лазерно-ультразвуковой и лазерно-механической обработки;
- лазерная шликерная наплавка и легирование, направленные на повышение износостойкости и долговечности ответственных элементов лопаток компрессора и турбины, например антивибрационных полок лопаток компрессора и бандажных полок лопаток турбины;
- лазерная дефектоскопия ответственных деталей, например лопатки ротора турбины и компрессора, деталей турбостартера, трубопроводов взамен трудоемкого люминесцентного метода контроля.

На рисунке 9.43 приведены принципиальные схемы твердотельного и газового лазеров.

В твердотельном лазере (рис. 9.43а) стержень 2 из рабочего вещества (синтетического рубина, иттрий-алюминиевого граната или неодимового стекла) помещен между зеркалами 1 и 3. Зеркало 1 отражает все лучи, а зеркало 3 полупрозрачно.

Лазерная обработка материалов относится к тепловой, так как происходит кратковременный локальный нагрев материала до очень высоких температур за счет сосредоточения значительной энергии на малой площади поверхности заготовки для интенсивного нагрева, плавления или испарения. В упрощенном виде на рисунке 9.44 показана начальная фаза воздействия сфокусированного пучка

лазерного излучения с материалом заготовки. При этом имеет место целый ряд физических процессов, определяющих результат лазерной обработки.

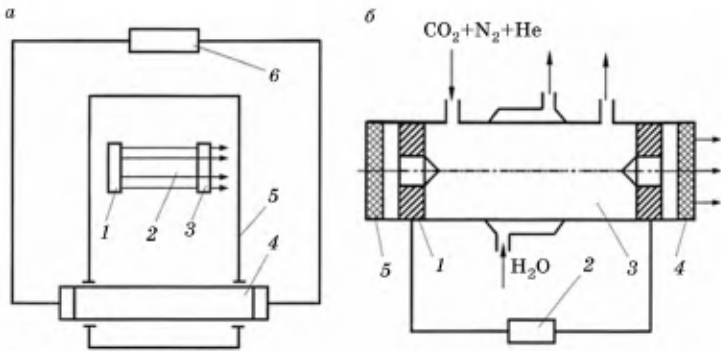


Рис. 9.43

Принципиальные схемы лазеров:

*a* — твердотельного; *b* — газового. Твердотельный лазер: 1 — отражающее зеркало; 2 — стержень (синтетический рубин, неодимовое стекло и др.); 3 — полупрозрачное стекло; 4 — лампа-вспышка; 5 — отражающий кожух; 6 — высоковольтный конденсатор. Газовый лазер: 1 — электрод; 2 — источник питания (конденсатор); 3 — газоразрядная трубка; 4 — оптический элемент, пропускающий инфракрасное лазерное излучение; 5 — отражающее стекло.

Для реализации лазерной технологии созданы различные лазерно-технологические системы с твердотельными и газовыми излучателями (генераторами). В качестве рабочего вещества, обеспечивающего генерацию излучения, применяют: у первых — твердые тела, у вторых — отдельные газы или их смеси.

Лазерно-технологические системы могут работать в импульсном (одиночными импульсами), импульсно-периодическом (непрерывными сериями импульсов) и непрерывном режимах и представляют комплекс, включающий лазер, формирующий рабочий инструмент, пригодный для обработки различных материалов и осуществления разнородных процессов, и устройство для программного перемещения луча или заготовки.

Структурная схема лазерно-технологической системы показана на рисунке 9.45. Она состоит из следующих основных узлов: лазера 1, энергетического канала 3 (оптическая система для транспортировки и формирования лазерного излучения), рабочего стола 8, узла управления рабочими органами системы 9, источника энергетического питания 10.

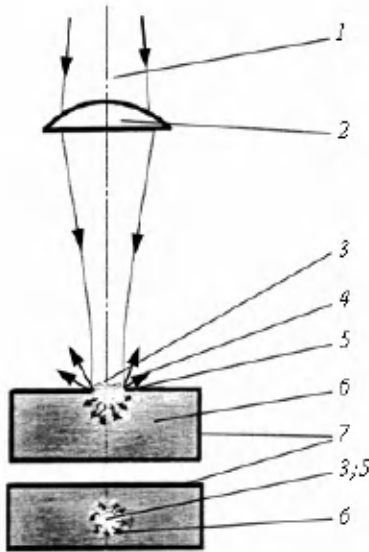


Рис. 9.44

*Начальная фаза воздействия сфокусированного пучка лазерного излучения на материалы:*

1 — лазерное излучение; 2 — фокусирующая линза; 3 — пятно воздействия сфокусированного пучка лазерного излучения на материал; 4 — испарение материала; 5 — плавление материала; 6 — тепловое воздействие; 7 — заготовка.

Основными особенностями и преимуществами лазерной технологии являются:

- отсутствие контакта инструмента и детали;
- универсальность обработки по материалам и номенклатуре;
- значительное уменьшение деформации;
- локальная обработка труднообрабатываемых мест;
- наплавка поверхностей с высоким коэффициентом использования наплавочного материала;
- возможность замены высоколегированных дорогостоящих материалов менее дорогостоящими;
- возможность лазерного излучения проходить через некоторые материалы без значительного поглощения энергии;
- отсутствие вакуума и радиации в зоне обработки;
- простота управления режимами обработки;
- возможность полной автоматизации процесса обработки.

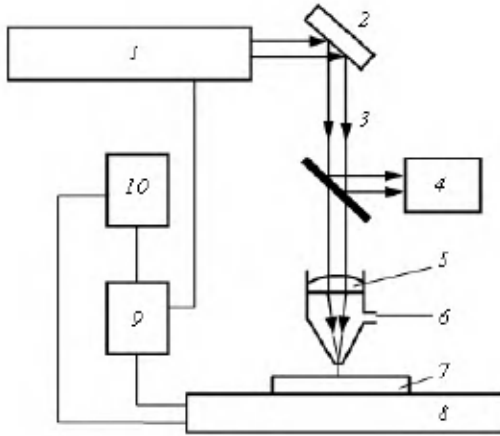


Рис. 9.45

*Структурная схема лазерной технологической системы, предназначенной для обработки материалов:*

- 1 — излучатель; 2 — отклоняющее зеркало; 3 — энергетический канал; 4 — средства наблюдения; 5 — оптическая фокусирующая система; 6 — вспомогательный технологический газ; 7 — обрабатываемая заготовка; 8 — предметный стол; 9 — узел управления; 10 — источник энергетического питания.

К недостаткам лазерной технологии можно отнести необходимость нанесения поглощающих покрытий при некоторых видах обработки материалов, имеющих большую отражательную способность.

Классификация основных методов лазерной обработки приведена на рисунке 9.46.

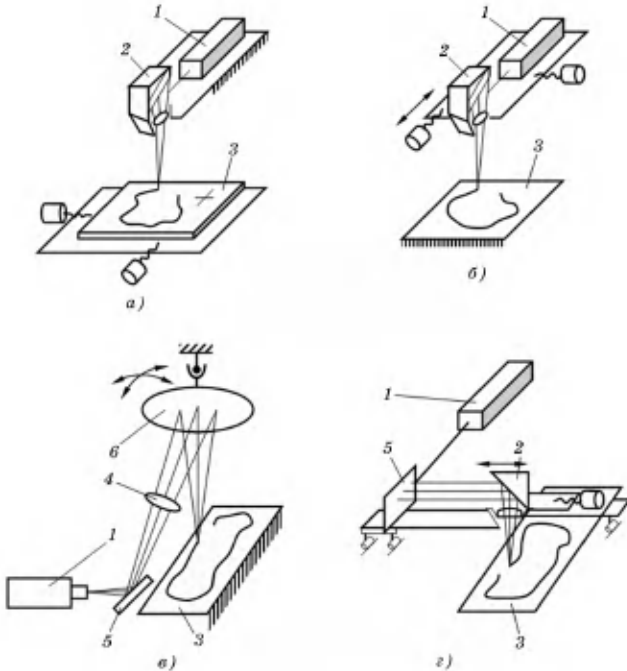


Рис. 9.46

*Классификация методов лазерной обработки по технологическому признаку:*

- 1 — термическая обработка; 2 — сварка; 3 — наплавка; 4 — резка; 5 — поверхностное легирование; 6 — обработка отверстий; 7 — маркировка.

Для резки материалов могут быть применены различные схемы взаимного расположения и перемещения лазера, фокусирующей системы и заготовки. Некоторые из них показаны на рисунке 9.47. Все указанные варианты позволяют производить программную обработку.



**Рис. 9.47**

*Схемы подвода пучка лазерного излучения к обрабатываемой поверхности:*

1 — излучатель; 2 — режущая головка с отклоняющим зеркалом и собирающей линзой; 3 — заготовка; 4 — линза (оптическая система); 5 — отклоняющее зеркало; 6 — поворотное фокусирующее зеркало.

При обработке по схеме 9.47а — сфокусированный пучок лазерного излучения неподвижен по отношению к заготовке. Необходимая конфигурация реза получается за счет движения заготовки 3, установленной на координатном столе.

При работе по схемам 9.47б, в, г заданная конфигурация реза получается за счет перемещения сфокусированного лазерного излучения, заготовка неподвижна.

Схема *б* осуществима, например, при совместном перемещении излучателя *1* и режущей головки *2* в поперечном направлении и движении последней параллельно оси луча излучателя в продольном направлении. Здесь определенную сложность представляет подвод к излучателю средств, обеспечивающих его нормальное функционирование. Например, необходимо подвести электропитание к лампам накачки и охлаждающую среду для терморегулирования, а в случае  $\text{CO}_2$ -лазера — электропитание к разрядным электродам, смесь газов, охлаждающую среду и систему вакуумирования. Если учесть, что излучатель  $\text{CO}_2$ -лазера имеет значительные габаритные размеры, то практически исключается возможность применения подобных излучателей в рассматриваемой схеме.

При обработке по схеме 9.47*в* — перемещение сфокусированного пучка лазерного излучения осуществляется за счет поворота зеркала *б*, подвешенного на кардане. В этом случае положение зеркала *б* относительно поверхности обработки *3* выбирается значительно больше половины максимального размера стола. В противном случае пучок излучения будет скользить по поверхности обработки. Кроме того, кромки реза получаются неперпендикулярными к поверхности обработки, а являются частью сферы с центром, совпадающим с центром вращения зеркала *б*. Естественно, в этом случае размеры обработки более ограничены, чем при работе с применением других схем.

При обработке по схеме 9.47*г* — заданная конфигурация реза получается за счет перемещения сфокусированного пучка лазерного излучения в двух взаимно перпендикулярных направлениях за счет продольного движения траверсы с режущей головкой *2* и поперечного перемещения режущей головки по траверсе. Излучатель *1* и заготовка *3* неподвижны. На траверсе установлено отклоняющее зеркало *5*, направляющее пучок излучения от излучателя *1* к режущей головке *2* при любом положении траверсы относительно излучателя.

При упрочнении лазерами заданной поверхности возможно применение различных технологических схем. На рисунке 9.48 показаны некоторые способы подвода сфокусированного лазерного излучения к упрочняемой поверхности.

На рисунке 9.49 приведен лазерный технологический комплекс, имеющий устройство перекрытия лазерного излучения, обеспечивающее получение деталей типа прокладок (рис. 9.50), как с отверстиями, так и без отверстий. Таким же путем можно получить заготовки профильных шаблонов, скоб и других инструментов.

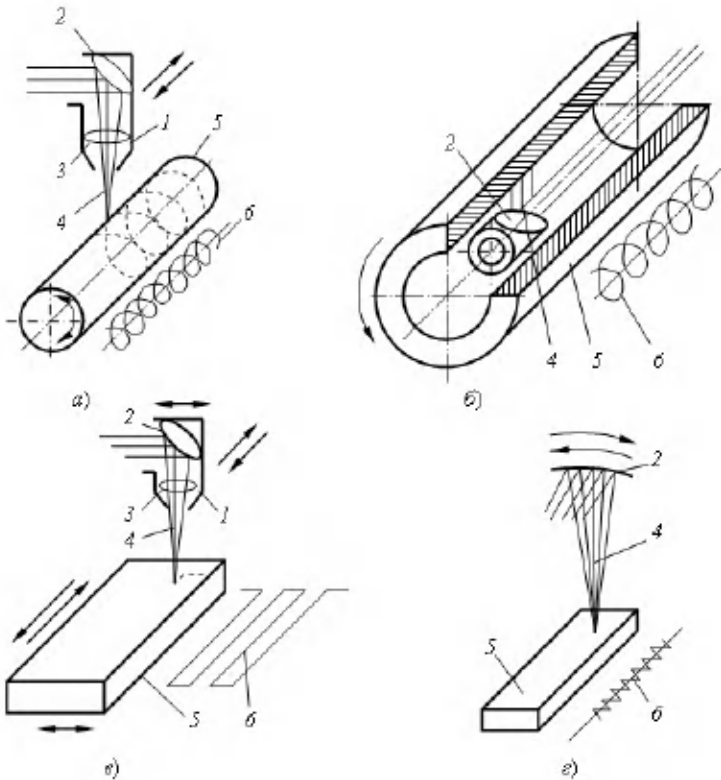


Рис. 9.48

*Примеры подвода пучка лазерного излучения к упрочняемой поверхности:*

1 — фокусирующее устройство; 2 — отклоняющее зеркало; 3 — фокусирующая линза; 4 — пучок лазерного излучения; 5 — обрабатываемая заготовка; 6 — траектория движения.

Компоновочные схемы лазеров многообразны и зависят от их типа и области применения. Наиболее распространенные в машиностроении лазерно-технологические системы для резки материалов можно подразделить на две группы: 1) для резки плоских листовых материалов; 2) для вырезки различных элементов в теле листовых объемных изделий. В первом случае применяются двухкоординатные, а во втором — многокоординатные системы, обеспечивающие требуемое взаимное перемещение режущего лазерного луча и обрабатываемого изделия.

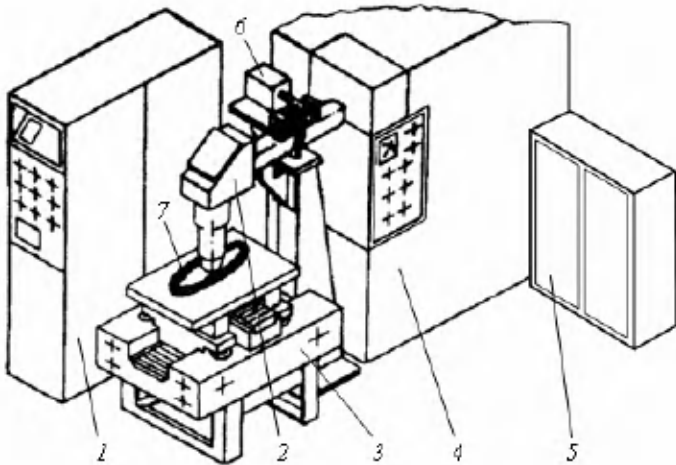


Рис. 9.49

*Лазерный технологический комплекс:*

1 — устройство ЧПУ; 2 — система транспортировки излучения; 3 — координатный стол; 4 — лазерная  $\text{CO}_2$  установка; 5 — шкаф для баллонов с газом; 6 — устройство перекрытия луча; 7 — обрабатываемая заготовка.



Рис. 9.50

*Прокладки из композиционных материалов, обработанные на лазерном технологическом комплексе:*

а, б — прокладки из композиционных материалов; в, г — заготовки шаблонов; д — заготовка измерительной скобы; ж, з — прокладки из армированных композиционных материалов.

При всех методах обработки (для более полного использования энергии лазерного луча) необходимо осуществлять нормальное падение луча на обрабатываемую поверхность заготовки. Одновременно требуется сохранение расстояния от фокусирующей линзы до поверхности изделия.

Местоположение режущей части лазерного излучения на поверхности заготовки в данный момент времени для первой группы лазерно-технологических систем (положения  $X$  и  $Y$ ) может быть задано узлами:

- перемещения луча относительно неподвижной заготовки;
- относительного перемещения луча и обрабатываемой заготовки;
- перемещения заготовки относительно неподвижного луча.

Естественно, указанные способы имеют свои преимущества и недостатки. Выбор способа производится с учетом точности обработки, габаритов обрабатываемых изделий, методов их крепления и т. д.

На рисунке 9.51 показаны два вида компоновок лазерно-технологических систем на базе  $CO_2$ -лазеров, предназначенных для резки листовых материалов. Первая — консольного типа, на которой смонтирован энергетический канал с режущей головкой (рис. 9.51а). Координатный стол расположен под ней. При такой компоновке режущая головка (режущий лазерный луч) по отношению к обрабатываемой поверхности заготовки неподвижна. Непрерывная резка осуществляется за счет перемещения заготовки, расположенной на координатном столе, по осям  $X$  и  $Y$  относительно луча по заданной программе.



**Рис. 9.51**

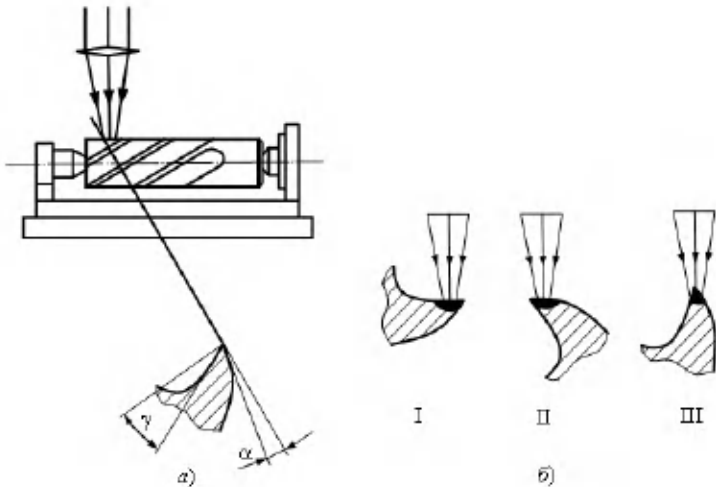
*Общие виды лазерно-технологических систем с различными компоновками, предназначенными для резки листовых материалов:*

*а — «Uscad-500» фирмы Озонт-лазер (Болгария); б — «Surecut» фирмы Quantum Laser (Англия).*

Вторая компоновка — портального типа (рис. 9.51б). В этом случае заготовка устанавливается на стол, перемещающийся по оси  $X$  — вдоль оси лазерно-технологической системы. Режущая головка смонтирована на узле портала. Узел с режущей головкой передвигается по направляющим портала по оси  $Y$  — поперек оси системы. Непрерывная резка осуществляется за счет взаимного перемещения стола с заготовкой по оси  $X$  и режущего луча по оси  $Y$  по принятой программе.

Лазерно-технологические системы для пространственно-профильной резки применяются для обработки объемных изделий, полученных после листовой штамповки и других подобных операций. При лазерной резке таких деталей необходимо, чтобы режущий лазерный луч падал на поверхность обработки перпендикулярно и на заданном расстоянии от линзы. Для этого необходимо многоосевое управление соответствующими узлами технологической системы. На практике используются трех- и пятикоординатные роботизированные системы.

Схема лазерной обработки концевых фрез из инструментальной стали Р6М5, широко применяемой при обработке деталей из труднообрабатываемых материалов, например стали 12Х18Н10Т, титановых сплавов и др. материалов, приведена на рисунке 9.52.



**Рис. 9.52**

*Схемы упрочнения (I, II, III) концевых фрез (а)  
и динамика их износа (б)*

Повышение микротвердости поверхностного слоя некоторых конструкционных и инструментальных материалов после лазерного упрочнения на установке «Квант-18» показано в таблице 9.4. Перед упрочнением образцы подвергались термической обработке с обеспечением твердости HRC = 52–56. Упрочнение производилось на воздухе с использованием пятна закалки (3×11 мм).

Таблица 9.4

**Изменение микротвердости упрочненного слоя после лазерной обработки конструкционных и инструментальных материалов**

Марка стали	Энергия излучения, Дж	Глубина упрочненного слоя, мкм	Микротвердость, МПа	
			исходная	упрочненного слоя
45	71	160	5600	8900
ШХ15	69	150	7080	9340
X12M	66	140	7540	9760
У8	70	160	7080	10 230
ХВГ	67	150	7300	9760

## 9.6. КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Комбинированные методы включают различные сочетания воздействий, оказывающих влияние на процесс обработки, способствуя значительному повышению производительности. К комбинированным методам обработки относятся электроэрозионно-электрохимическая, анодно-абразивная, магнитно-абразивная и др.

**Электроэрозионно-электрохимическая** обработка основана на сочетании двух процессов — электроэрозионного разрушения и электрохимического растворения. Схема обработки с двумя источниками питания показана на рисунке 9.53.

Процесс электроэрозионно-электрохимической обработки может быть осуществлен и с одним источником питания при использовании режимов электроэрозионной обработки и электрохимической обработки последовательно или совместно путем изменения напряжения и рабочей подачи.

Физическая сущность процесса состоит в локальном интенсивном электроэрозионном разрушении, усиливаемом протеканием искрового разряда в электропроводной среде (электролит), в противоположность диэлектрической среде при обычной электроэрозионной обработке, и анодное растворение по всей поверхности.

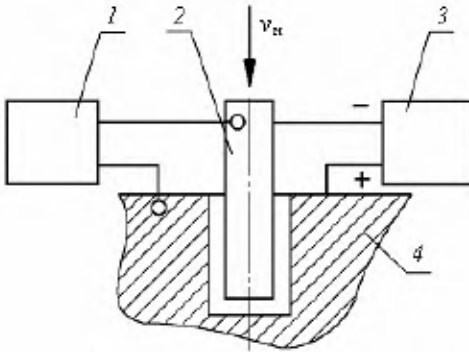


Рис. 9.53

Схема электроэрозионно-химической обработки:

1 — генератор импульсов; 2 — электрод-инструмент; 3 — генератор постоянного напряжения; 4 — обрабатываемая заготовка.

Высокая производительность обеспечивается путем ввода в межэлектродный промежуток большой мощности, реализуемой электроэрозионными разрядами на грани горения дуги, а повышение качества поверхности достигается дополнительной обработкой в режиме электрохимической обработки неподвижным электродом.

Скорость прошивки отверстий при электроэрозионной обработке может быть 2 мм/мин, при электрохимической обработке — 5 мм/мин, электроэрозионно-электрохимической обработке — 5–100 мм/мин. При этом методе обработки скорость прошивки ограничивается началом касания электродом поверхности и контактного грубого оплавления или коротким замыканием.

Максимальная скорость прошивки обеспечивается при  $I_p = (0,4-0,6)I_{кз}$ , где  $I_p$  — рабочий ток процесса,  $I_{кз}$  — ток короткого замыкания. При этом плотность тока достигает значений  $j = 10 \text{ А/мм}^2$  при рабочем напряжении  $U = 100 \text{ В}$ .

Ввиду высокой производительности и более низкой точности, чем при ЭХО, метод электроэрозионно-электрохимической обработки эффективен при обработке различных поверхностей пониженной точности, неглубоких отверстий, пазов, щелей, углублений различной формы на различных деталях.

**Магнитно-абразивная обработка** осуществляется при движении заготовки и абразивных зерен относительно друг друга в магнитном поле. Сущность магнитно-абразивной обработки заключается в удалении припуска абразивным

способом с созданием магнитного поля непосредственно в зоне резания. Магнитное поле создает электрические токи в поверхностном слое движущейся заготовки, и ее поверхность приобретает электрическую заряженность. Для обработки применяют магнитно-абразивные порошки, обладающие магнитными и абразивными свойствами. Инструмент из магнитно-абразивного порошка позволяет производить обработку поверхностей сложной формы без фасонных полюсов при простой кинематике процесса (рис. 9.54а). Обработка может осуществляться с размещением магнитного порошка на поверхности магнитного индуктора и в рабочем зазоре (рис. 9.54б).

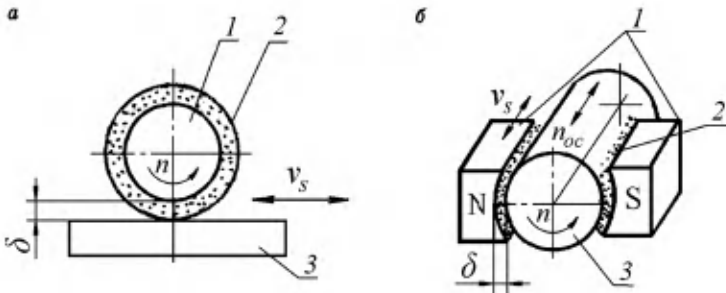


Рис. 9.54

Схема магнитно-абразивной обработки:

1 — магнитный индуктор; 2 — магнитный порошок; 3 — обрабатываемая заготовка.

Заготовке, магнитному индуктору или порошку сообщают рабочие движения: главное движение  $n$ , которое определяет скорость резания  $v$ ; движение подачи  $v_s$ ; движение осцилляции  $n_{ос}$ , обеспечивающее получение пересекающихся траекторий зерен порошка на обрабатываемой поверхности и способствующее перемешиванию зерен в рабочем зазоре.

**Магнитно-абразивная** обработка может применяться для снятия заусенцев, скругления острых кромок, упрочнения поверхностей, полирования режущей части инструментов и рабочих элементов деталей, хонингования отверстий и обеспечивает повышение твердости обработанных поверхностей.

В тонком поверхностном слое (до 5 мкм) формируются остаточные напряжения сжатия. На отделочных операциях шероховатость обработанных поверхностей достигает значения  $Ra = 0,02-0,08$  мкм. Такие параметры качества поверхностного слоя рабочих поверхностей

деталей обеспечивают повышение износостойкости и контактной долговечности.

Магнитно-абразивная обработка выполняется на специализированных металлорежущих станках.

**Электроконтактная** обработка как одна из разновидностей электроэрозионных методов обработки материалов применяется для изготовления деталей из труднообрабатываемых токопроводящих материалов. Этот метод можно использовать для выполнения разрезных операций, точения, фрезерования, шлифования деталей, обдирки слитков и т. д.

Технологические характеристики электроконтактной обработки (производительность, точность обработки, качество обработанной поверхности, обрабатываемость различных материалов и пр.) определяются режимами обработки (электрическими параметрами процесса), теми условиями (в частности, средой), в которых происходит обработка, свойствами обрабатываемых материалов и т. д. При электроконтактной обработке многие технологические характеристики определяются количеством тепловой энергии, выделяемой в межэлектродном зазоре. Так как при этой обработке реализуется механический метод генерирования импульсов, то в зоне контакта двух токоподводящих поверхностей выделяется тепло как из-за повышенного электрического сопротивления, так и благодаря электрическому разряду. Первый вид тепловыделения преобладает при малых напряжениях. При напряжениях выше 10–20 В возникает разрушение материала вследствие электроэрозионных явлений (дуговых разрядов). Электроды при этой обработке могут питаться от источников постоянного и переменного тока.

В зависимости от среды, в которой протекает процесс, различают электроконтактную обработку двух видов: в воздухе и в жидкости (воде). В первом случае в зону обработки можно подвести большие мощности (до 300–500 кВт) при токе до 15 000–20 000 А. Однако в этих условиях образуется дефектный слой значительной толщины. Толщина дефектного слоя значительно снижается при обработке в жидкости. Вода способствует повышению качества обработанной поверхности, лучшему охлаждению заготовки и инструмента, уменьшает приваривание выплавляемого металла к поверхности заготовки. Обработка в воде ведется при сравнительно небольших мощностях (до 50–70 кВт) и токах (до 2000 – 3000 А), при невысокой производительности. Применяется в основном для грубой

(черновой) обработки металлов, хотя при некоторых режимах качество обработанной поверхности довольно высокое.

Обработку в воздухе применяют в тех случаях, когда нужна высокая производительность и любое качество обработанной поверхности (например, разрезание слитков). Эффективность съема металла при электроконтактной обработке зависит от теплофизических свойств обрабатываемого материала. Лучше всего поддаются обработке жаропрочные стали. Данные сравнительной обрабатываемости различных материалов приведены в таблице 9.5.

Таблица 9.5

**Обрабатываемость различных материалов  
при электроконтактной обработке**

Материал	Обрабатываемость
Ст 45	1
1X18H12T	1,5
Г13Л	1,52
2X13	1,53
X18	1,56
X25H13T	1,6
ЭИ437	1,8

В качестве инструмента для электроконтактной обработки в большинстве операций применяют профильные диски. Металл с заготовки удаляется слоями, ширина которых равна толщине диска или его подаче на проход, а толщина — глубине врезания. В зависимости от мощности источника питания дисковым инструментом можно удалять слой металла сечением 6–7 см<sup>2</sup> и более.

Инструментами при наружном и плоском электроконтактном шлифовании служат диски из серого чугуна (например, марки СЧ 18), для внутреннего шлифования — круги из меди или другого эрозиянностойкого материала. Чтобы уменьшить износ инструментов, им сообщают повышенные скорости вращения (до 40–60 м/сек). При этом относительный износ дисковых электродов, например, из углеродистых конструкционных сталей при работе в жидкости составляет всего 3–5% (сила тока 2000 А), а в воздухе 0,8–1,2% (сила тока до 15 000 А).

Охлаждение электрода-инструмента можно улучшить, обдувая его воздухом, или с помощью жидкости, подаваемой на диск (наружное охлаждение), или прокачиваемой

через его внутренние каналы (внутреннее охлаждение). В качестве охлаждающей жидкости можно использовать воду, 1–3%-ную эмульсию, минеральные масла и их смеси.

При использовании дисковых электродов-инструментов 2 рабочая поверхность может быть или гладкой, или с небольшими выступами (рис. 9.55а, б). Улучшенными вариантами дискового электрода-инструмента является инструмент, профиль которого изготовлен по спирали Архимеда (рис. 9.55в), и диск с одним зубом и небольшим выступом (рис. 9.55г). Чтобы с инструмента удалить наплывы расплавленного материала заготовки 1, можно применить калибрующий резец 3 (рис. 9.55г).

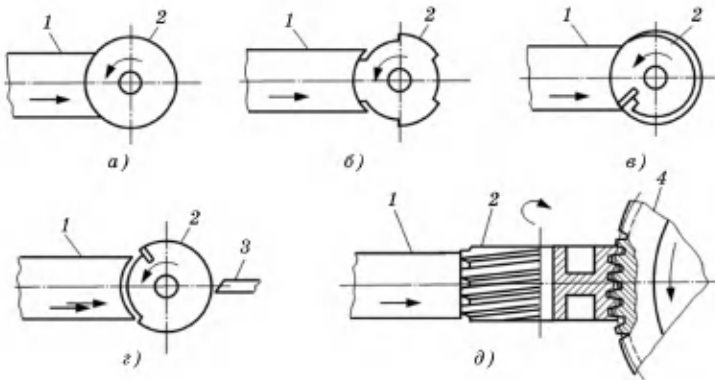


Рис. 9.55

*Схемы электроконтактной обработки различными электродами-инструментами*

При электроконтактной обработке в качестве инструмента можно использовать диск (рис. 9.55д), выполненный в виде однозаходного червяка. Для удаления металла, налипшего на рабочую поверхность, инструмент периодически входит в контакт с сопряженным калибрующим зубчатым колесом 4.

Применение дисков с широким зубом и винтовыми зубьями вследствие улучшения условий удаления металла из зоны обработки позволяет значительно увеличить подачу. В результате этого производительность обработки этими дисками по сравнению с производительностью обработки гладкими дисками возрастет на 30% при одновременном улучшении качества обработанной поверхности.

Электроконтактную обработку применяют для резки, точения, шлифования, обдирки слитков, выглаживания

поверхностей, заточки режущих инструментов и т. п. Схемы некоторых операций показаны на рисунке 9.56.

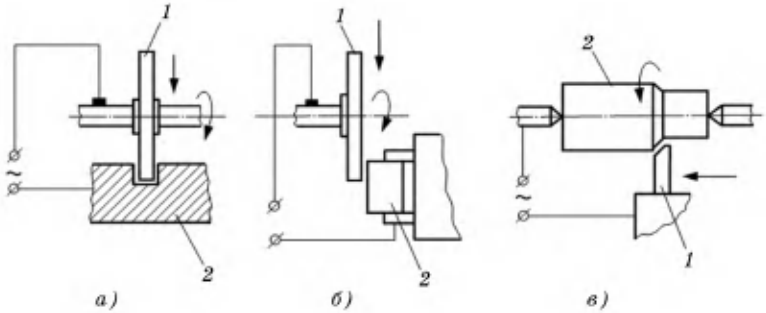


Рис. 9.56

Схемы электроконтактной обработки:

*a* — резка; *б* — шлифование; *в* — точение; 1 — инструмент; 2 — заготовка.

**Технологическое применение плазмы** эффективно при обработке металлов (при обработке резанием высокопрочных металлов и сплавов перед резцом 1 устанавливается плазматрон 3, нагревающий узкую зону обрабатываемого материала 2 (рис. 9.57)). При нагреве прочность обрабатываемого материала снижается, а пластичность повышается, что облегчает условия резания.

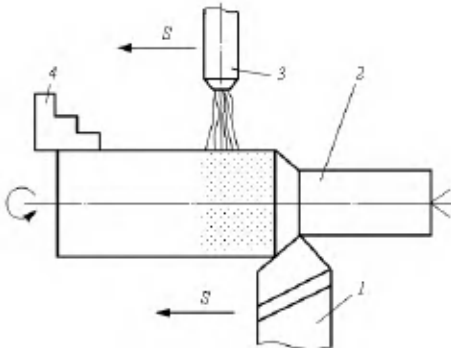


Рис. 9.57

Схема плазменно-механического точения труднообрабатываемых материалов:

1 — резец; 2 — обрабатываемая заготовка; 3 — плазменная горелка; 4 — зажимной элемент приспособления.

Такой способ применяется при обработке жаропрочных сталей, сплавов на основе вольфрама и молибдена, что повышает производительность в 6–8 раз при уменьшении износа резов в 5–6 раз.

## 9.7. СОВМЕЩЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Внедрение прогрессивных нелезвийных методов обработки и формообразования деталей вместе с тем не снижает значимости совершенствуемых методов механической и абразивной обработки, поскольку требования к точности и качеству поверхностного слоя повышаются и не всегда могут быть обеспечены другими методами и способами. Дальнейшее совершенствование важнейших окончательных (отделочных) технологических процессов изготовления ответственных деталей с использованием механической обработки может быть осуществлено различными путями, в том числе применением совмещенных методов и способов лезвийно-упрочняющей, отделочно-упрочняющей и других видов обработки.

Примером совмещенных методов обработки является **лезвийно-упрочняющая обработка**. Этот метод обработки реализуется за счет совмещения отделочно-упрочняющей обработки с операциями предшествующей механической обработки (точение, шлифование и др.) или за счет применения новых схем обработки. Процесс лезвийно-упрочняющей обработки осуществляется с небольшими глубинами и подачами, что обеспечивает уменьшение шероховатости поверхности перед обкатыванием. В качестве режущих элементов применяются резцы из синтетических материалов. Схемы совмещенной лезвийно-упрочняющей обработки показаны на рисунке 9.58.

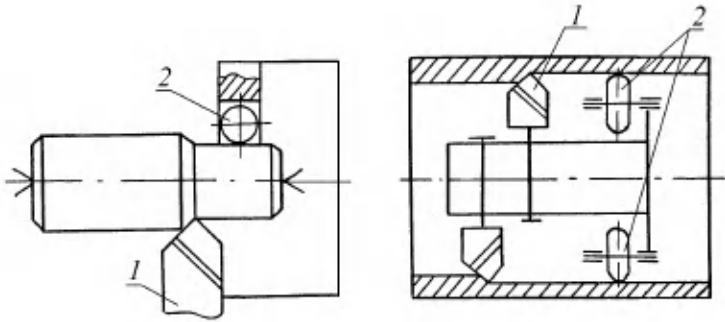
Лезвийно-упрочняющая обработка осуществляется точением и алмазным выглаживанием, фрезерованием и обкатыванием плоских поверхностей и т. д.

Применительно к лезвийной обработке может быть электроконтактное точение, электроконтактное фрезерование, электроконтактное шлифование, электроконтактное сверление и другие методы обработки.

Точение с опережающим пластическим деформированием обрабатываемого материала выполняется с целью снижения его пластичности, а следовательно, уменьшения силы и температуры резания (рис. 9.59).

Сущность комбинированного метода обработки резанием с вибрациями (рис. 9.60) состоит в том, что на принятую схему обработки накладываются колебательные движения режущего

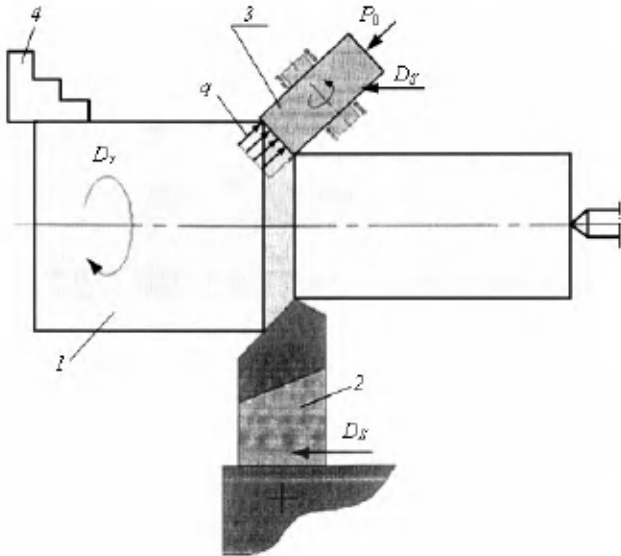
инструмента. Это позволяет при обработке пластичных материалов получать дробление стружки. Вибрационная обработка возможна также при сверлении (рис. 9.61).



**Рис. 9.58**

*Схемы лезвийно-упрочняющей обработки:*

1 — режущий инструмент; 2 — упрочняющий инструмент.



**Рис. 9.59**

*Схема точения с опережающим пластическим деформированием:*

1 — заготовка; 2 — режущий инструмент; 3 — упрочняющее устройство (ролик);  
4 — зажимной элемент приспособления.

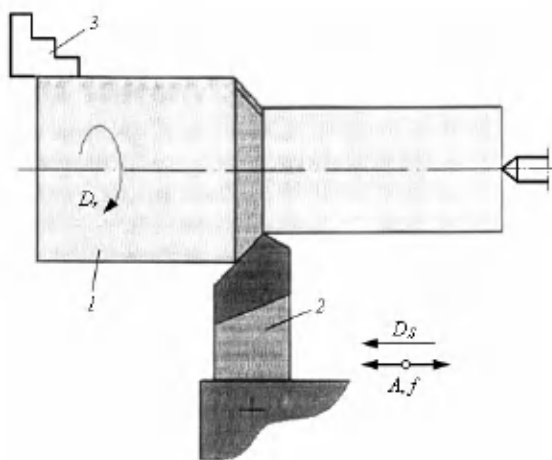


Рис. 9.60

Схема вибрационного точения:

$A$  — амплитуда колебаний;  $f$  — частота колебаний (до 50 Гц); 1 — заготовка; 2 — резец; 3 — зажимной элемент.

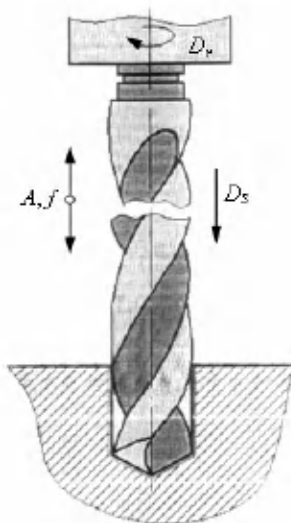
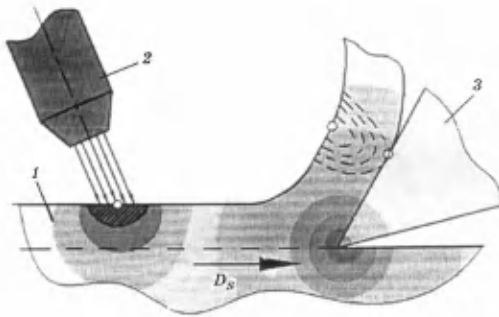


Рис. 9.61

Схема вибрационного сверления:

$A$  — амплитуда колебаний;  $f$  — частота колебаний (до 50 Гц).

Обработка резанием с подогревом производится для снижения прочностных свойств труднообрабатываемых материалов (рис. 9.62). Могут использоваться различные источники подогрева. Снижение прочностных свойств обрабатываемого материала улучшает обрабатываемость.

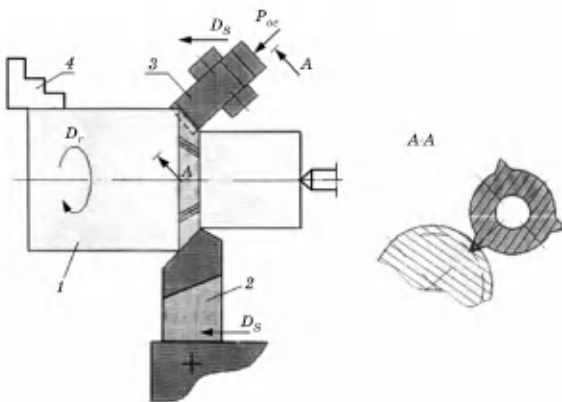


**Рис. 9.62**

*Схема резания с нагревом плазменной струей:*

1 — заготовка; 2 — источник тепла; 3 — резец;  $D_s$  — движение подачи.

Дробление стружки может также выполняться с помощью накатных роликов с зубьями, которые наносят на поверхности заготовки насечки, в результате чего стружка разделяется на элементы заданной длины (рис. 9.63).



**Рис. 9.63**

*Схема точения со стружкодроблением: A — амплитуда колебаний:*

1 — заготовка; 2 — резец; 3 — зубчатый ролик; 4 — зажимной элемент приспособления;  $D_s$  — движение подачи;  $P_{oc}$  — сила прижима ролика.

Оценивая общее состояние работ в области электрических и комбинированных методов обработки следует отметить, что в последние годы удалось избавиться от многих недостатков ранее применяемых процессов (недостаточной точности, высокой энергоемкости, дороговизны инструментов, ограниченный по производительности, шероховатости и др.).

Например, в настоящее время электроэрозионный метод обработки позволяет получить погрешность в пределах нескольких микрон при шероховатости 0,02–0,03 мкм, электрохимический метод обработки на импульсном токе имеет точность в пределах 20–30 мкм, комбинированные методы дают значительно более высокие технологические показатели по сравнению с традиционными приемами.

Успехи в развитии новых методов обработки, в расширении зоны их практического применения связаны с достижениями в области создания оборудования, генераторов, средств автоматизации, электродов-инструментов.

Анализ современной литературы показывает, что в области создания механической части станков для электрической и комбинированной обработки достигнуты положительные результаты, главные из которых следующие:

1. Повышены жесткость и точность позиционирования станков, обеспечена высокая равномерность хода шпинделя.

2. Применена система многокоординатных перемещений. Так швейцарская фирма АЖИКУТ выпускает станки с 6 координатами.

3. Применены датчики конечного положения инструмента, позволяющие автоматически выставить начальное положение инструмента независимо от его износа и положения детали.

4. Созданы устройства для автоматической смены инструментов. Так в системах управления современных станков имеется до 40 команд в памяти на смену инструмента.

5. Расширены технологические возможности оборудования за счет увеличения габаритов столов, числа степеней свободы перемещения электродов, локальной подачи рабочей жидкости и др.

6. Улучшена экологическая обстановка в зоне работы станка (за счет локализации рабочей зоны, нейтрализации и отсоса газов из ванны и др.).

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Высокая нагрузочная способность и долговечность поверхностей в значительной степени определяются качеством поверхностного слоя деталей. При этом *растягивающие остаточные напряжения* практически всегда понижают усталостную прочность и долговечность. *Сжимающие остаточные напряжения* при умеренной рабочей температуре положительно влияют на прочностные свойства поверхностей.

Одним из технологических путей повышения работоспособности и долговечности ответственных деталей является поверхностное упрочнение **методами пластического деформирования** (методы ППД). Поверхностное упрочнение за счет создания стабильных напряжений сжатия повышает выносливость деталей при малоцикловом нагружении по сравнению с исходной после механической обработки в 2–2,5 раза, а в ряде случаев и более. Особенно благоприятно упрочнение сказывается на деталях из титановых сплавов, где повышение выносливости в малоцикловой области нагружения достигает 4–8 раз.

Усталостная прочность упрочненных поверхностей, работающих при знакопеременной нагрузке, также повышается несмотря на то, что уровень остаточных напряжений при такой нагрузке в процессе эксплуатации резко снижается. Вступает в действие другой эффект упрочняющих и отделочных методов обработки, заключающийся в уничтожении острых кромок и надрезов поверхности, обеспечении благоприятного микрорельефа и улучшения шероховатости. *Долговечность работы упрочненных высокопрочных сталей* в агрессивной среде увеличивается в 6–7 раз.

В настоящее время разработаны и наиболее широко применяются в машиностроении *методы упрочнения поверхностно-пластическим деформированием и отделочно-упрочняющие методы*.

*Вибрационные методы*, к которым относится виброшлифование, виброполирование, виброупрочнение с помощью рабочих тел, ускоряемых вибрационными силами. К этим методам можно отнести также ультразвуковое упрочнение.

*Струйно-ударные методы*, при которых рабочие тела в виде шаров, песка, чугуновой или стальной дробы ускоряются воздушной или жидкостной струей, а также кинетической энергией вращающегося барабана.

*Отделочно-упрочняющие методы* пластического деформирования твердым инструментом. Инструмент может быть статическим (раскатник, алмазный выглаживатель, деформирующая протяжка и т. д.) и динамическим (вращающийся диск с упрочняющими шайбами, шариками, металлические вращающиеся щетки и т. д.).

*Отделочно-упрочняющая обработка методом вращения в кипящем абразивном слое* (турбоабразивная обработка).

Любые методы ППД по данным отечественных исследователей целесообразно применять для деталей, работающих в диапазоне температур от окружающей среды до: из жаропрочных сплавов — 750°C; из титановых сплавов — 450°C; из конструкционных сталей — 300°C; из алюминиевых сплавов — 160°C; из магниевых сплавов — 200°C.

## 10.1. ВИБРАЦИОННЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ППД

*Сущность метода* заключается в том, что рабочей среде, состоящей из металлических или абразивных частиц (гранул), сообщаются относительно обрабатываемых поверхностей деталей механические колебания, создающие значительные ускорения (до (10–15)g).

*Объемная вибрационная обработка* происходит в результате многочисленных микроударов и относительного скольжения рабочей среды по поверхности обрабатываемой детали. Энергия рабочей среды, передаваемая на обрабатываемую поверхность, в наибольшей степени зависит от амплитуды колебания и частоты вращения вибратора.

По сравнению с другими методами упрочнения объемный вибрационный метод обладает ограниченными энергетическими возможностями и в силу этого недостаточной интенсивностью обработки и продолжительным временем упрочнения. Но большая универсальность метода, его высокие технологические возможности, одновременная обработка большого количества однородных или разнородных деталей, возможность полной автоматизации обработки предопределили его широкое применение в авиадвигателестроении.

*Установки для объемного виброупрочнения* отличаются формой рабочей камеры. Наибольшее распространение получили *рабочие камеры с прямолинейной и тороидно-винтовой формой* (рис. 10.1).

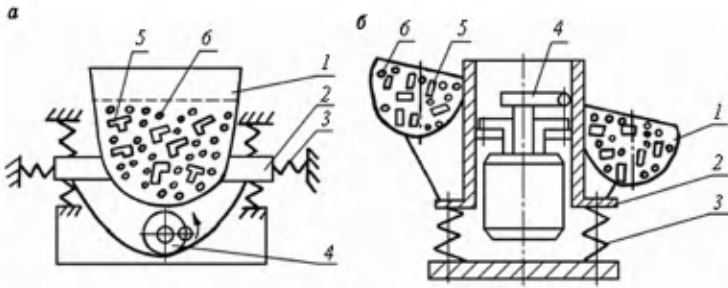


Рис. 10.1

Схемы установок для объемного виброупрочнения с рабочими камерами:

*а* — цилиндрической формы; *б* — тороидальной формы; 1 — рабочая камера; 2 — платформа; 3 — упругая подвеска; 4 — вибратор; 5 — обрабатываемая заготовка; 6 — наполнитель.

*Тороидно-винтовая рабочая камера* является наиболее удачной, так как позволяет автоматизировать весь процесс обработки, включая загрузку, выгрузку, сортировку деталей и их отделение от технологической среды. Детали поступают в нижнюю часть тороидной камеры и проходят под действием вибрационных сил в процессе обработки в верхнюю часть, где отделяются от гранул, которые возвращаются в рабочую камеру, и поступают на транспортер для дальнейшей обработки или очистки и упаковки. Наибольших успехов по созданию линий по виброобработке достигла фирма «Реслер» (Германия).

Вся навеска в рабочей камере разделяется по объему на рабочую среду и детали в соотношении от 2:1 до 5:1 и более, в зависимости от жесткости деталей и требуемых параметров шероховатости.

*При виброупрочнении* детали находятся под слоем упрочняющей среды (шарики или гранулы) и вся навеска вместе с рабочей камерой совершает вынужденные колебания в одной из плоскостей.

*При ультразвуковом упрочнении* в качестве рабочих тел используются твердые стальные шарики правильной формы, которым придается кинетическая энергия посредством волновода — концентратора от ультразвукового генератора. На рисунке 10.2 показана ультразвуковая установка для упрочнения пера компрессорных лопаток.

Преобразователь ультразвуковых импульсов в колебания передает механическую энергию через волновод и стенки цилиндрической камеры на стальные шарики.

После взаимодействия с колеблющейся в резонансном режиме стенкой камеры шарики приобретают скорость, равную колебательной скорости стенки, и ударяют по поверхности лопаток, установленных в специальном приспособлении на расчетном расстоянии от поверхности камеры.

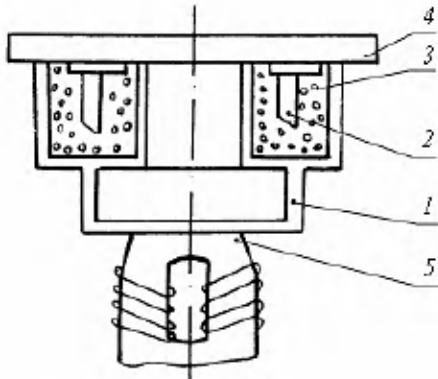


Рис. 10.2

Схема ультразвуковой установки для виброупрочнения:

- 1 — волновод; 2 — обрабатываемая заготовка; 3 — дробь; 4 — приспособление;  
5 — магнитостриктор.

## 10.2. СТРУЙНО-УДАРНЫЕ МЕТОДЫ ППД

При дробеструйном (пневмодинамическом) методе упрочнения в качестве рабочего тела используется стальная или чугунная дробь, источником кинетической энергии является струя сжатого воздуха. Метод применим для упрочнения внутренних и наружных поверхностей деталей сложной формы, например профилей зубьев зубчатых колес. Можно обрабатывать элементы крупногабаритных деталей. При данном методе существует возможность широкого варьирования режимами обработки путем изменения кинетической энергии движущегося потока дроби и времени воздействия на упрочняемую поверхность.

При дробеструйном упрочнении профилей зубьев зубчатого колеса монтируется на оправку с изоляцией поверхностей, не подлежащих упрочнению. Оправку устанавливают в рабочую зону дробеструйной установки на определенном расстоянии от сопла, через которое на поверхности зубьев направляется дробевоздушная смесь (рис. 10.3). Оправка с упрочняемой шестерней вращается с заданной скоростью.

Глубина и степень деформационного упрочнения определяется, прежде всего, скоростью полета дроби и временем обработки, а также исходным фазовым составом поверхности. Так с возрастанием скорости дроби с 54 м/с до 80 м/с глубина упрочнения увеличивается с 0,1 мм до 0,15–0,20 мм. Особенно быстро идет увеличение глубины упрочнения в течение первых 1,5–5 мин.

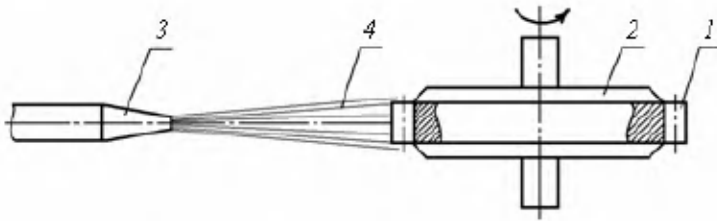


Рис. 10.3

Схема дробеструйного упрочнения зубчатого колеса:

1 — зубчатое колесо; 2 — защитное устройство; 3 — сопло; 4 — дробевоздушная смесь.

**Дробеметный метод** от вышеописанного отличается тем, что источником кинетической энергии является вращающийся ротор дробеметной установки.

**Гидродробеструйная обработка** характеризуется использованием стальной дроби или шариков, которым придается кинетическая энергия струей жидкости. Обеспечивается, кроме упрочнения, шероховатость обрабатываемой поверхности в пределах  $Ra = 1-1,25$ . При более высокой исходной шероховатости происходит ее ухудшение. Метод часто применяют для обработки пера компрессорных лопаток. Лопатки закрепляются во вращающемся приспособлении с частотой 0,2–0,25 об/с (рис. 10.4). Сопла-эжекторы движутся возвратно-поступательно относительно детали. Рабочая смесь состоит из шаров диаметром 1,5–2 мм и трансформаторного масла. Расход рабочих тел, масла, давление и время обработки устанавливаются в зависимости от материала и конфигурации детали.

Сама установка для гидродробеструйного упрочнения, имеющая системы сбора и возврата шаров, насосную систему, изнашивающиеся сопла и т. д., достаточно сложна конструктивно и требует к себе внимания при обслуживании.

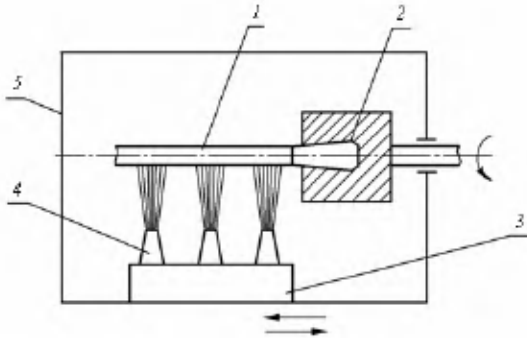


Рис. 10.4

Схема гидродробеструйной обработки:

- 1 — обрабатываемая заготовка; 2 — приспособление; 3 — подвижная каретка;  
4 — сопло; 5 — рабочая камера.

### 10.3. АЛМАЗНОЕ ВЫГЛАЖИВАНИЕ

Эффективным методом отделочно-упрочняющей обработки является выглаживание твердым инструментом, особенно алмазным. Кристалл алмаза заправляется по сфере с радиусом 1–3 мм. Благодаря высоким физико-механическим свойствам алмаза — твердости, теплопроводности, износостойкости, низкому коэффициенту трения (0,04–0,08) — алмазное выглаживание при простой схеме и умеренных энергетических затратах позволяет получить высокие показатели упрочняемой поверхности.

Процесс может быть осуществлен на токарных, сверлильных или расточных станках с помощью алмазного выглаживателя, представляющего из себя кристалл алмаза весом 0,4–0,8 карата, заправленного по радиусу и установленного в тарированной подпружиненной оправке.

Шероховатость поверхности под алмазное выглаживание может быть в широких пределах:  $R_a = 2,5\text{--}0,16$  мкм. Режимы выглаживания также достаточно широки. Скорость  $v = 1\text{--}5$  м/с, подача  $S = 0,02\text{--}0,1$  мм/об, радиальная сила  $P_y = 200\text{--}350$  Н, число проходов  $n = 1\text{--}2$ . Применяется СОТС на основе масел.

На рисунке 10.5 приведена схема алмазного выглаживания. Алмазный наконечник воздействует на исходные микровыступы, сжимая их в сторону подачи с образованием наплыва  $N$  и затем нового микрорельефа с шагом волн, равным рабочей подаче.

Высота неровностей значительно уменьшается по сравнению с исходной и может достигать  $Ra = 0,16-0,02$  мкм с большим заполнением профиля и увеличенной опорной поверхностью. После алмазного выравнивания поверхностные слои значительно упрочняются и в них создаются сжимающие остаточные напряжения высокого стабильного уровня независимо от исходных остаточных напряжений.

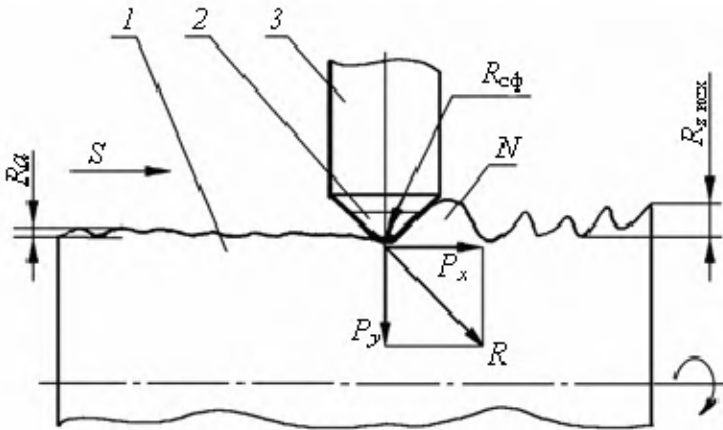


Рис. 10.5

Схема алмазного выравнивания:

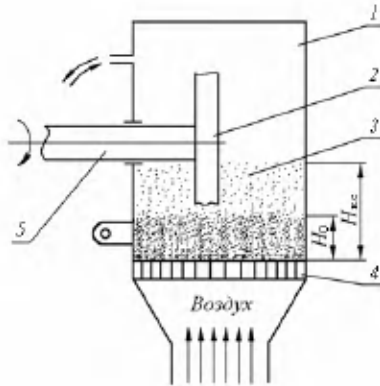
- 1 — обрабатываемая заготовка; 2 — алмаз; 3 — оправка с регулируемым усилием;  
N — наплыв материала в процессе выравнивания.

## 10.4. ТУРБОАБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

Сущность процесса турбоабразивной обработки заключается в помещении обрабатываемой поверхности в воздушно-абразивную смесь, называемую кипящим абразивным слоем, и создании значительных относительных скоростей между абразивными зернами и обрабатываемой поверхностью путем вращения деталей в кипящем абразивном слое.

Установка для турбоабразивной обработки (рис. 10.6) состоит из герметичной рабочей камеры 1, на дне которой находится пористая абразивная плита 4, продуваемая мощным потоком воздуха, превращающим насыпной слой абразива высотой  $H_0$  в кипящий абразивный слой 3 высотой  $H_{к.с} = (1,4-1,6)H_0$ . Обрабатываемая деталь 2 устанавливается непосредственно на вращающийся шпиндель 5

или на планшайбу после поворота передней стенки рабочей камеры в направлении, указанном стрелкой. Ось шпинделя может быть, как горизонтальной, так и вертикальной. Абразивные зерна в кипящем слое вращаются и линейно перемещаются со скоростью  $0,1-0,5$  м/с. Они способны производить съем слабой интенсивности в пределах  $0,02-0,03$  мкм/мин. При вращении деталей со скоростью  $20-25$  м/с съем с поверхности резко повышается и достигает  $1-1,5$  мкм/мин, что повышает производительность турбоабразивной обработки.



**Рис. 10.6**

*Схема турбоабразивной обработки:*

1 — рабочая камера; 2 — обрабатываемая заготовка; 3 — взвешенные абразивные зерна; 4 — пористая керамическая плита.

С повышением зернистости применяемого абразива съем также повышается. Оптимальной является зернистость  $40-63$ . В процессе обработки поверхностей абразивное зерно измельчается, а также уменьшается острота его кромок, что снижает съем материала. Для обработки сплошных поверхностей типа дисков рекомендуется применять абразивные зерна из карбида кремния зеленого 63С. При обработке деталей с прерывистыми поверхностями, например лопаток в планшайбе, необходимо использовать абразивные материалы с большой прочностью и ударной вязкостью, такие как электрокорунд циркониевый 38А, электрокорунд хромтитанистый 94А.

Турбоабразивная обработка вследствие специфики образования поверхностного микрорельефа при отсутствии тепловыделений путем механического ударного воздействия

улучшает все параметры качества поверхностного слоя. Микрорельеф имеет однородный характер. Отношение параметров шероховатости  $R_{\max}/Ra$  составляет величину 8,0–8,5 (при шлифовании 11–12). Микронеровности характеризуются большими радиусами округления выступов и малыми углами наклона боковых сторон. Это приводит к тому, что после турбоабразивной обработки поверхности имеют большую контактную жесткость, меньше концентраторов напряжений и большое сцепление с различными покрытиями. В зависимости от зернистости применяемого абразива в пределах от 16 до 63 на вязких материалах может быть получена шероховатость поверхности с параметрами  $Ra$  от 0,2–0,3 мкм до 0,6–1,0 мкм. На закаленных материалах возможно получение более низкой шероховатости.

Остаточные напряжения после турбоабразивной обработки во всех случаях только сжимающие. Уровень на обрабатываемой поверхности исходных растягивающих остаточных напряжений может быть снижен или растягивающие напряжения переведены в сжимающие.

Кроме получения высоких параметров качества в поверхностном слое турбоабразивная обработка является прогрессивным технологическим процессом, позволяющим механизировать и автоматизировать трудоемкие ручные операции скругления острых кромок, снятия заусенцев, подготовки поверхностей под нанесение покрытий. Одной из наиболее эффективных областей применения этого технологического процесса в авиационном двигателестроении является *финишная обработка рабочих дисков турбин и компрессоров ГТД*.

# ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ В ТЕХПРОЦЕССАХ НА ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ЕГО ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ

## 11.1. ВИДЫ ДЕФЕКТОВ. ПРИЧИНЫ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

Отказы изделий машиностроения в эксплуатации и при испытаниях вследствие неудовлетворительной работы и поломки отдельных деталей не всегда просто квалифицировать по четко выявленным причинам. Чаще всего это сочетание конструкторско-технологических причин. Недостатки конструкции могут быть усилены технологическими отклонениями в неблагоприятную сторону.

Дефекты и разрушение деталей вследствие **конструктивных недостатков** следующие:

1) *недостаточная долговечность деталей*, под которой подразумеваются такие конструктивные недоработки, которые могут приводить детали к поломке даже при нормальных условиях работы. При недостаточной усталостной прочности должно неизбежно произойти разрушение детали после какого-то срока службы. Для данных деталей должен быть установлен ограниченный срок службы (ресурс) или проведены мероприятия по повышению прочности. Недостаточная статическая прочность проявляется в том, что разрушение деталей в эксплуатации происходит под действием однократно приложенной нагрузки с образованием статических трещин. Дефект может проявляться в узлах крепления нагруженных элементов;

2) *недостаточная контактная выносливость деталей*, которая проявляется чаще всего на зубчатых колесах и нагруженных подшипниках. Методами борьбы с контактными разрушениями являются: повышение контактной прочности (замена материала), уменьшение контактных напряжений путем снижения рабочих нагрузок, повышение угла зацепления, модуля, замена подшипников на более работоспособные;

3) *недостаточная износостойкость деталей*, связанная с постепенным изменением размеров в процессе работы, вызванная действием усилий на поверхности трения. Характерным примером является износ контактных площадок бандажных полок турбинных лопаток и антивибрационных полок компрессорных лопаток.

Введение наплавов или пластин повышенной твердости и износостойкости замедляет износ или исключает его в пределах ресурса лопаток;

4) *недостаточная коррозионная стойкость*, которая наблюдается на турбинных лопатках, на деталях из алюминиевых сплавов (дисках, корпусах, лопатках). Происходит межкристаллитное разрушение на большую глубину (0,1–0,2 мм). Введение антикоррозионного анодирования поверхностей деталей из алюминиевых сплавов, алитирования рабочих поверхностей турбинных лопаток позволяет повысить коррозионную стойкость в газовой среде;

5) *коробление деталей в процессе работы*, происходящее вследствие релаксации остаточных напряжений под действием температур и знакопеременных напряжений. Значительным короблениям могут подвергаться лопатки (увод кромок), изготовленные с большими остаточными напряжениями, подвергнутые рихтовке после вальцевания;

6) *наличие резко выраженного концентратора напряжений*. Такими концентраторами являются различного рода выточки, облегчающие отверстия, масляные каналы, острые непритупленные кромки.

Неправильно заданные технические условия, приводящие к технологическим дефектам, могут быть отнесены к группе конструктивных дефектов. Так повышенный слой цементации на тонких деталях может приводить к хрупким трещинам. Кроме того, к **конструктивным дефектам** можно отнести:

- неравномерное нагружение деталей;
- неудачное сочетание металлов;
- нарушение правильного сопряжения деталей;
- неправильный выбор типа подшипников;
- неудовлетворительные условия смазки;
- неправильное установление допусков.

Под дефектами и разрушениями деталей вследствие **производственно-технологических недостатков** подразумеваются дефекты изготовления, сборки и ремонта деталей. Все производственно-технологические недостатки, приводящие к поломкам, можно разделить на четыре основные группы: дефекты металла после литья, дефекты обработки, включая пластическую деформацию давлением и механическую обработку, дефекты термической обработки, дефекты сборки.

1. *Дефекты плавки и литья*: усадочные и газовые раковины и рыхлоты, неметаллические включения, структурная неоднородность, литейные напряжения.

*Газовые раковины* или газовые пузыри (газовые поры) возникают при литье, если плохо удаляется воздух или газ из формы. В случае группового расположения раковин образуются пористость и рыхлоты, которые нарушают плотность металла и снижают его качество.

*Неметаллические включения* в металлах и сплавах неизбежны при любом из существующих в настоящее время металлургических способах производства. Удастся снизить, но не полностью исключить, содержание включений. Включения могут быть в виде простых и сложных окислов, сульфидов, силикатов, нитридов. Даже в небольшом количестве включения могут оказать отрицательное влияние на механические свойства.

2. *Дефекты пластической деформации, связанные с дефектами литого материала* (рис. 11.1).

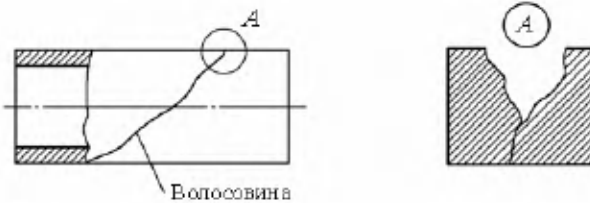


Рис. 11.1

*Дефект пластической деформации*

*Волосовины* — это дефекты деталей, главным образом стальных, прошедших обработку давлением. Образуются вследствие раскатки подкорковых газовых пузырей или скоплений неметаллических включений. Это наиболее часто встречающийся дефект пластической деформации, приводящий к разрушению.

*Расслоением* называют дефект, возникающий при обработке под давлением (прокатке) и представляющий собой остатки неудаленной и несварившейся при обработке давлением усадочной раковины или усадочной рыхлости слитка.

*Заков* представляет собой дефект, возникающий при ковке или штамповке деталей, когда усадочная раковина или рыхлота сваривается не в глубине слитка, а на поверхности.

*Надрывом* в процессе холодного деформирования называют образование складок и трещин материала, которые могут вызвать поломку детали.

3. *Дефекты термической обработки.* Термическая обработка — совокупность нагрева, выдержки при определенной

температуре и охлаждения, в результате чего меняются внутреннее строение металла или сплава и его свойства. Удаление шлифованием упрочненного слоя может стать причиной разрушения на поверхностях деталей, подверженных азотированию, цианированию как по причине разупрочнения, так и образования растягивающих остаточных напряжений, которые залегают на некоторой глубине от поверхностного слоя.

4. *Дефекты сборки* приводят к нарушению нормальной работы деталей и узлов, их перегрузке и разрушению. Типичными дефектами сборки являются:

- *тугая посадка сопряженных деталей*, особенно подшипников, что, приводит к деформации внутренних или наружных колец, к быстрому их выходу из строя;
- *свободная посадка*, что может являться причиной дополнительных нагрузок, не предусмотренных при нормальной посадке;
- *недопрессовка* — нарушает правильность сопряжения деталей;
- *чрезмерная затяжка* — одна из причин образования монтажных трещин;
- *несоосность, сборка с перекосом* — дефекты, которые является причиной поломки различных деталей (резьбовых соединений, зубчатых зацеплений, подшипниковых узлов);
- *неправильно отрегулированные зазоры*. Такие дефекты могут привести к заклиниванию и поломке зубчатых зацеплений, пар трения;
- *вмятины и забоины*, появляющиеся при неаккуратной сборке и разборке, которые являются концентраторами напряжений, приводящих к поломкам.

## **11.2. РОЛЬ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ В ФОРМИРОВАНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА**

Установлено, что различное физическое состояние поверхностного слоя изменяет предел усталости значительно ощутимее, чем изменение микрогеометрии. Наличие структурных неоднородностей вызывает появление локальных концентраторов напряжений. В связи с этим, исследование микроструктуры поверхностного слоя после различных технологических процессов является весьма важным для прогнозирования долговечности деталей машин. Микроструктура поверхностного слоя исследуется в поперечном

(нормальном) сечении или на наклонных микрошлифах. Просматривается и снимается микроструктура с помощью металлографического микроскопа и фотокамеры.

Для электронно-микроскопических исследований микроструктура исследуемой поверхности копируется на пленку (реплику). Получают ее путем напыления в вакууме пленки алюминия, затем угольной пленки, которая в дальнейшем отделяется от алюминиевой и исследуется на электронном микроскопе предварительно оттененная хромовым покрытием. Исходная микроструктура материала при его обработке может изменяться от воздействия силовых или тепловых факторов, действующих в зоне контакта детали с инструментом.

При обработке со значительной *деформацией* микроструктура поверхностного слоя значительно отличается от структуры исходного материала. Наблюдается большое количество линий сдвигов, искажение формы зерен (рис. 11.2).



Рис. 11.2

Микроструктура поверхностного слоя:

а — исходная структура; б — структура после деформации.

Наименьшая степень пластической деформации и искажение структуры наблюдаются при резании на оптимальных скоростях. Так, по данным А. Д. Макарова, при точении сплава ХН77ТЮР при  $v = 32$  м/мин ( $S = 0,08$  мм/об) плотность дислокации составляет величину  $10 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>, а при скорости 18 м/мин — величину  $45 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Жаропрочные сплавы на никелевой основе, такие как ЖС6К, ЭП220 и другие, имеют в своей структуре упрочняющую интерметаллидную так называемую  $\gamma'$ -фазу, которая представляет из себя большое количество вкрапленных включений типа  $Ni_3(AlTi)$ , хорошо видимых на *электронно-микроскопических фотографиях* (рис. 11.3).

Под влиянием механической обработки  $\gamma'$ -фаза претерпевает существенные изменения формы: *измельчение, разрушение, растворение*. Степень изменения зависит от

действующей в зоне резания температуры. При точении с низкой температурой, не превышающей  $550^{\circ}\text{C}$ , изменение связано в основном с силовым воздействием. Интерметаллидная  $\gamma'$ -фаза имеет раздробленный и вытянутый в направлении действующей силы характер. При действии высоких температур и при высоких степенях пластической деформации  $\gamma'$ -фаза может быть локально растворена и разрушена.

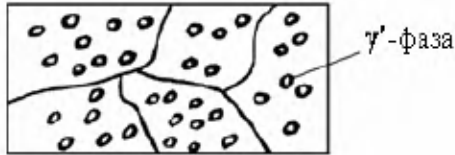


Рис. 11.3

Интерметаллидная  $\gamma'$ -фаза

При шлифовании выделяющееся тепло воздействует на поверхностный слой детали, изменяя его микроструктуру. *Тепловой режим при шлифовании характеризуется следующими особенностями:*

- поверхностные слои металла нагреваются со скоростью  $2000^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ;
- температура поверхности достигает  $800\text{--}1300^{\circ}\text{C}$ ;
- продолжительность воздействия высоких температур незначительна;
- поверхностные слои охлаждаются со скоростью порядка  $1000^{\circ}\text{C}/\text{с}$ .

Эти особенности теплового режима неизбежно приводят к структурным и фазовым изменениям в поверхностном слое (прижогам).

По характеру структуры *прижоги* подразделяются на:

- *прижоги отпуска*: вторичные структуры состоят из трооститно-сорбитной или трооститно-мартенситной структур, свойственных отпуску при нагреве, не превышающем критической точки  $A_{C1}$ ;
- *прижоги закалки с отпуском*: вторичные структуры закалки над слоем отпущенного металла, постепенно переходящего в структуру исходного материала. При этом температура превышает точку  $A_{C1}$ .

Структурные и фазовые превращения в поверхностных слоях неизбежно связаны с изменением удельного объема металла. Это является причиной образования растягивающих остаточных напряжений.

Прижоги отпуска (образование трооститно-сорбитной структуры) всегда сопровождаются растягивающими напряжениями, которые могут приводить к образованию трещин. Появление прижогов сопровождается ощутимым колебанием микротвердости в различных участках поверхности. Микротвердость вторично закаленного слоя составляет 9000–11 000 МПа, а на участках исходной структуры она находится в пределах 7800–8000 МПа. Падение микротвердости в местах прижога зависит от глубины отпущенного слоя. Чем глубже слой, тем значительнее уменьшение твердости.

Глубина структурных изменений и твердость отпущенного слоя сталях взаимосвязаны (рис. 11.4). По известной глубине структурных изменений можно определить твердость на поверхности и наоборот: по результатам измерения твердости можно судить о глубине отпущенного слоя.

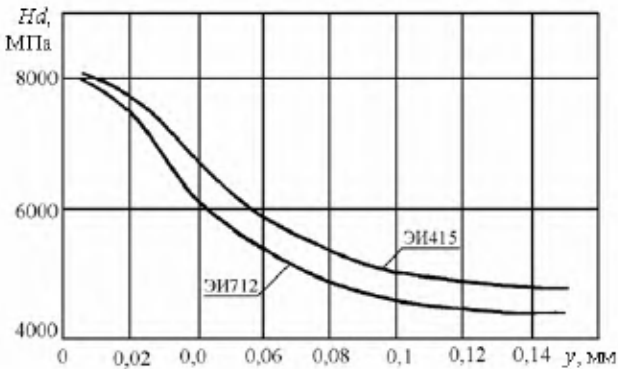


Рис. 11.4

*Зависимость микротвердости от глубины структурных изменений материала детали*

Однако методы микроструктурного анализа и замера микротвердости являются лабораторными и требуют разрушения детали, что неприменимо в производственных условиях. Эти методы применяются для аттестации технологических процессов.

Для обнаружения структурных изменений в поверхностных слоях в цеховых условиях применяются методы неразрушающего контроля, которые основаны на разной реакции структурно-измененных и исходных участков на воздействия химикатами или электромагнитными полями. Наибольшее применение получили методы травления, как

достаточно простые и универсальные, основанные на свойстве трооститно-сорбитной структуры лучше поддаваться химическому воздействию и выявляться в виде темных полос в прижженных участках. Вторично закаленный слой не травится и его наличие по всей поверхности скрывает подповерхностные прижоги отпуска и дефекты.

Существуют два метода травления — кислотный и бескислотный. Последний метод травления в надсернокислом аммонии более чувствителен к выявлению прижогов малой интенсивности и является предпочтительным.

### 11.3. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Обеспечение требуемых эксплуатационных свойств деталей авиационных двигателей может осуществляться непосредственно путем назначения условий обработки. Это возможно на основе изучения, анализа взаимосвязи технологических условий обработки и эксплуатационных свойств деталей.

Как видно на рисунке 11.5, наибольшая усталостная прочность  $\sigma_{-1}$  наблюдается при оптимальной скорости резания, обеспечивающей при других условиях минимум высоты неровностей на обработанной поверхности Rz. При этом под оптимальной скоростью резания  $v_0$  понимается скорость резания, при которой обеспечивается минимум износа режущего инструмента.

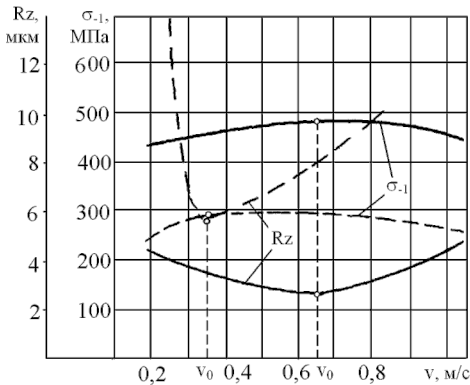


Рис. 11.5

Влияние скорости резания  $v$  на усталостную прочность  $\sigma_{-1}$ :

$S = 0,2$  мм/об,  $t = 1$  мм,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ ,  $r = 1$  мм; при обработке ХН73МВТЮ  $\gamma = 10^\circ$ ; при обработке ВТ9  $\gamma = 0^\circ$  (--- ХН73МВТЮ, — ВТ9-ВК8).

При обработке на оптимальной скорости резания обеспечивается максимальная прочность на разрыв  $\sigma_B$  (рис. 11.6), а также минимальное сближение или максимальная жесткость контактирующих поверхностей (рис. 11.7).

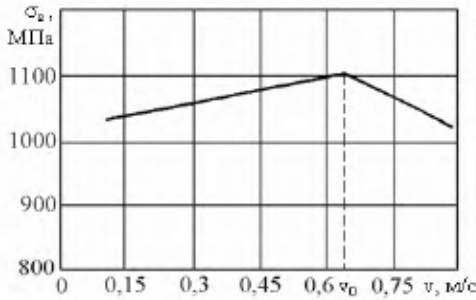


Рис. 11.6

Зависимость прочности на разрыв  $\sigma_B$  от скорости резания  $v$ :

обрабатываемый материал ВТ9, инструмент из ВК8; условия обработки те же, что и для усталостных испытаний.

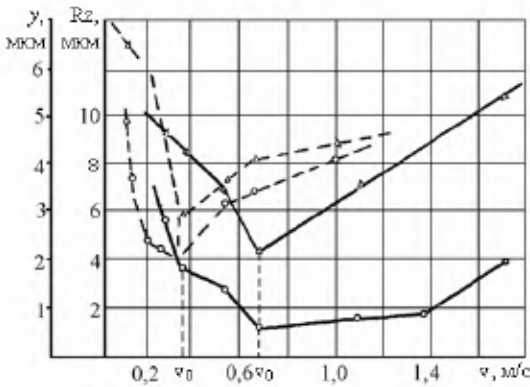


Рис. 11.7

Зависимость сближения контактирующих поверхностей  $y$  от скорости резания  $v$  при их обработке:

$\alpha = 10^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ ,  $r = 1$  мм,  $S = 0,2$  мм/об (резец из ВК8);

$\begin{matrix} \text{---}\circ\text{---} & y \\ \text{---}\Delta\text{---} & Rz \end{matrix} \left. \vphantom{\begin{matrix} \text{---}\circ\text{---} \\ \text{---}\Delta\text{---} \end{matrix}} \right\} \text{обрабатываемый материал}$

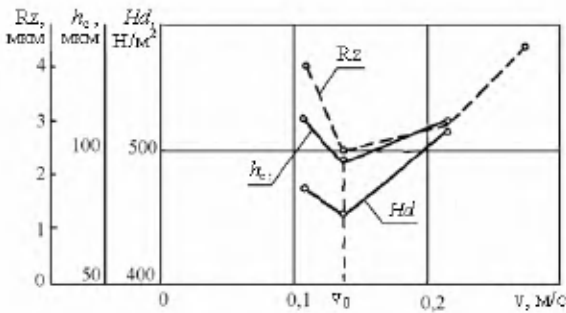
ВТ9,  $\gamma = 0^\circ$ ;

ХН73МВТЮ,  $\gamma = 10^\circ$ .

Это объясняется тем, что при оптимальной скорости резания обеспечивается минимальное или минимально стабилизированное значение параметров шероховатости и наклепа (рис. 11.8).

Оптимальные режимы резания обеспечивают максимальную стабильность показателей качества поверхностного слоя. При обработке диска из жаропрочного сплава ХН73МБТЮ получена следующая картина распределения неровностей по полотну диска (рис. 11.9). Наибольшая их стабильность наблюдается при обработке с постоянной температурой резания (линия 2). Однако следует отметить, что различные оптимальные сочетания технологических условий обработки обеспечивают различные значения параметров качества поверхностного слоя, а следовательно, и эксплуатационных свойств (рис. 11.10).

Таким образом, для обеспечения требуемого качества поверхностного слоя необходимо определить требуемое оптимальное сочетание технологических условий обработки.



**Рис. 11.8**

*Зависимость характеристик качества обработанной поверхности от скорости резания при фрезеровании сплава ЭП99 цилиндрической фрезой из Р18:*

$S = 0,08$  мм/об;  $t = 1$  мм;  $\alpha = \gamma = 10^\circ$ ;  $Rz$  — высота микронеровностей;  $h_c$  — глубина наклепа;  $Hd$  — микротвердость поверхности.

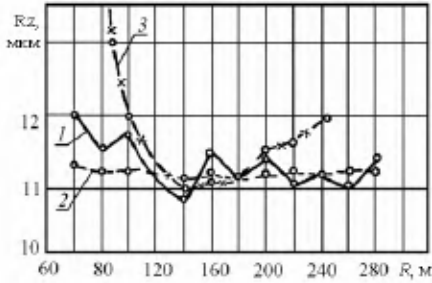


Рис. 11.9

Высота неровностей при обработке на различных режимах:

1 —  $v = 0,35$  м/с — const; 2 —  $\theta = 750^\circ$  — const; 3 —  $n = 370$  об/мин — const (резец из ВК8:  $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ ,  $\gamma = 0$ ,  $r = 1$  мм,  $S = 0,2$  мм/об,  $t = 1$  мм).

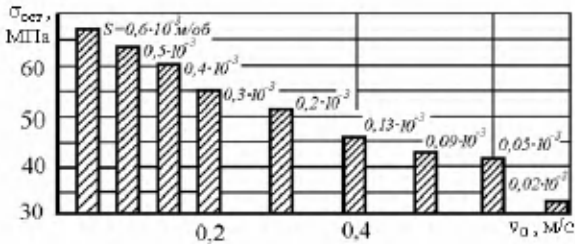


Рис. 11.10

Изменение максимума остаточных напряжений в поверхностном слое при различных оптимальных сочетаниях скорости резания и подачи:

обрабатываемый материал ХН73МВТЮ; резец из ВК8:  $t = 1$  мм,  $\rho_1 = 20 \cdot 10^{-6}$  м,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ .

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников, К. С. Технологические основы обеспечения качества машин / К. С. Колесников, Г. Ф. Баландин, А. М. Дальский ; под общ. ред. А. С. Проникова. — М. : Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана: Машиностроение, 1994. — 444 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1. / под ред. А. Г. Суслова ; А. М. Дальского. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 2001. — 944 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2. / под ред. А. Г. Суслова ; А. М. Дальского. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 2001. — 855 с.
4. Панов, А. А. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм [и др.] ; под общ. ред. А. А. Панова. — М. : Машиностроение, 2004. — 784 с.
5. Справочник токаря-универсала / под ред. М. Г. Шеметова ; В. Ф. Безъязычного. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 2007. — 576 с.
6. Бердников, Л. Н. Справочник фрезеровщика / Л. Н. Бердников, В. Ф. Безъязычный, В. Н. Крылов [и др.] ; под ред. В. Ф. Безъязычного. — М. : Машиностроение, 2010. — 272 с.
7. Смоленцев, В. П. Комбинированные методы обработки / В. П. Смоленцев, А. И. Болдырев, А. В. Кузовкин [и др.] ; под ред. В. П. Смоленцева. — Воронеж : ВГТУ, 1996. — 168 с.
8. Технологические методы упрочнения деталей машин: учеб. пособие / под ред. А. В. Киричека. — М. : Машиностроение-1, 2009. — 296 с.
9. Бржозовский, Б. М. Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении: учеб. пособие / Б. М. Бржозовский, Н. В. Бекренев. — Саратов : Саратов. гос. тех. ун-т, 2009. — 348 с.
10. Бабичев, А. П. Вибрационная механохимия в процессах отделочно-упрочняющей обработки и покрытий деталей / А. П. Бабичев, П. Д. Мотренко, В. В. Иванов [и др.] ; под ред. А. П. Бабичева. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2012. — 256 с.
11. Третьяков, А. Ф. Курс лекций по дисциплине «Технология конструкционных материалов» : учеб. пособие. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. — 276 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	<b>3</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	<b>5</b>
1.1. Основные понятия, определения и элементы процесса резания .....	5
1.2. Инструментальные материалы для изготовления режущих инструментов .....	12
1.2.1. <i>Инструментальные стали</i> .....	13
1.2.2. <i>Твердые сплавы</i> .....	15
1.2.3. <i>Минералокерамика</i> .....	16
1.2.4. <i>Сверхтвердые материалы</i> .....	17
1.3. Процесс стружкообразования при резании материалов .....	18
1.4. Силы резания .....	22
1.5. Нарост и его характеристики. Влияние нароста на процесс резания .....	26
1.6. Тепловые процессы при резании металлов .....	29
1.7. Износ инструмента .....	34
1.8. Смазочно-охлаждающие технологические среды при резании материалов .....	35
1.9. Качество обработанной поверхности при резании .....	38
1.10. Обрабатываемость материалов резанием .....	40
<b>ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ</b> .....	<b>48</b>
2.1. Классификация и основные техничко-экономические характеристики станков .....	48
2.2. Кинематика и структуры металлорежущих станков .....	61
2.3. Основные узлы и механизмы металлорежущих станков .....	74
2.4. Принципы управления металлорежущими станками .....	89
2.5. Конструкция и характеристика работы основных групп металлорежущих станков.....	96
2.5.1. <i>Токарные станки</i> .....	96
2.5.2. <i>Фрезерные станки</i> .....	131
2.5.3. <i>Сверлильные и расточные станки</i> .....	141

2.5.4. Шлифовальные станки .....	145
2.5.5. Зубообрабатывающие станки .....	151
2.5.6. Протяжные станки .....	155

### **ГЛАВА 3. ОБРАБОТКА НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ .....** 158

3.1. Обработка наружных поверхностей тел вращения точением .....	159
3.2. Фрезерование наружных поверхностей тел вращения .....	163
3.3. Протягивание наружных поверхностей тел вращения .....	163
3.4. Шлифование наружных поверхностей тел вращения .....	164
3.4.1. Обработка шлифовальными кругами .....	164
3.4.2. Ленточное шлифование .....	167
3.5. Отделочные методы обработки наружных поверхностей тел вращения .....	167
3.6. Упрочняющие методы обработки наружных поверхностей тел вращения .....	170

### **ГЛАВА 4. ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ .....** 173

4.1. Виды отверстий и методы их получения .....	173
4.2. Обработка отверстий сверлением, зенкерованием, развертыванием .....	174
4.2.1. Назначение и основные типы сверл, зенкеров и разверток .....	177
4.2.2. Обработка отверстий комбинированным инструментом .....	184
4.3. Растачивание отверстий .....	185
4.4. Протягивание отверстий .....	188
4.5. Обработка отверстий абразивным инструментом .....	192
4.5.1. Шлифование отверстий .....	192
4.5.2. Отделочные методы абразивной обработки .....	196
4.6. Обработка глубоких отверстий .....	200
4.7. Обработка отверстий в труднообрабатываемых материалах физико-химическими методами .....	218

### **ГЛАВА 5. ОБРАБОТКА ПЛОСКИХ И ЛИНЕЙЧАТЫХ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ .....** 220

5.1. Обработка плоских поверхностей строганием и долблением .....	220
---	-----

5.2. Обработка плоских поверхностей фрезерованием .....	225
5.3. Обработка плоских поверхностей протягиванием .....	229
5.4. Обработка плоских поверхностей шлифованием.....	233
5.5. Обработка плоских поверхностей притиркой, полированием и шабрением .....	235
<b>ГЛАВА 6. ОБРАБОТКА ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ .....</b>	<b>240</b>
6.1. Обработка конических поверхностей .....	241
6.2. Обработка сферических поверхностей .....	244
6.3. Обработка поверхностей вращения произвольного профиля.....	246
6.4. Обработка линейчатых фасонных поверхностей.....	249
6.5. Обработка сложных пространственных поверхностей.....	252
<b>ГЛАВА 7. ОБРАБОТКА РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ .....</b>	<b>269</b>
7.1. Виды резьб .....	269
7.2. Нарезание резьбы резцами и гребенками .....	269
7.3. Вихревое нарезание резьбы .....	271
7.4. Нарезание резьбы метчиками и плашками.....	273
7.5. Фрезерование резьбы .....	275
7.6. Шлифование резьбы .....	276
7.7. Накатывание резьбы.....	277
<b>ГЛАВА 8. ОБРАБОТКА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ШЛИЦЕВ.....</b>	<b>280</b>
8.1. Основные виды зубчатых передач и их назначение .....	280
8.2. Особенности авиационных зубчатых передач.....	281
8.3. Методы обработки зубчатых колес .....	283
8.3.1. Общие вопросы технологии .....	283
8.3.2. Методы формообразования поверхностей зубьев зубчатых колес .....	284
8.4. Изготовление цилиндрических зубчатых колес.....	287
8.4.1. Методы предварительного формообразования цилиндрических зубчатых колес.....	287

8.4.2. Методы чистовой обработки цилиндрических зубчатых колес .....	294
8.4.3. Особенности обработки конических зубчатых колес.....	303
8.5. Обработка шлицевых соединений.....	309
8.6. Прогрессивные и специальные методы чистовой обработки зубчатых колес .....	312
8.6.1. Профильное шлифование наружных и внутренних венцов методом копирования однослойным эльборовым инструментом .....	312
8.6.2. Глубинное шлифование эвольвентных зубчатых колес со специальной формой зуба .....	314
8.6.3. Зубохонингование зубчатыми хонами с внутренним зацеплением .....	318
8.6.4. Методы обработки профилей зубьев закрытых венцов двухвенцовых цилиндрических зубчатых колес.....	319

## **ГЛАВА 9. ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ..... 323**

9.1. Классификация физико-химических методов обработки .....	325
9.2. Электрохимические методы обработки.....	327
9.2.1. Сущность метода ЭХО, основные понятия и определения .....	327
9.2.2. Реализация процесса ЭХО .....	336
9.2.3. Электрохимическое шлифование.....	342
9.3. Электроэрозионная обработка .....	350
9.3.1. Механизм образования эрозионной лунки.....	352
9.3.2. Регулирование межэлектродного промежутка.....	357
9.3.3. Прецизионная обработка непрофилированным электродом-проволокой .....	360
9.4. Ультразвуковая обработка.....	376
9.5. Лучевые методы обработки .....	380
9.6. Комбинированные методы обработки.....	391
9.7. Совмещенные методы обработки .....	398

## **ГЛАВА 10. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ ..... 403**

10.1. Вибрационный метод обработки ППД .....	404
10.2. Струйно-ударные методы ППД.....	406
10.3. Алмазное выглаживание .....	408
10.4. Турбоабразивная обработка.....	409

<b>ГЛАВА 11. ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ В ТЕХПРОЦЕССАХ НА ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ЕГО ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ.....</b>	<b>412</b>
11.1. Виды дефектов. Причины их возникновения....	412
11.2. Роль технологии изготовления в формировании механических свойств и структуры материала.....	415
11.3. Влияние технологических условий обработки на эксплуатационные свойства деталей машин .....	419
<b>СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>423</b>

*Вячеслав Феоктистович БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ,  
Владимир Николаевич КРЫЛОВ,  
Юрий Касперович ЧАРКОВСКИЙ,  
Евгений Васильевич ШИЛКОВ*

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ  
И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

*Учебное пособие*

*Издание третье, переработанное*

Зав. редакцией  
инженерно-технической литературы *Т. Ф. Гаврильева*  
Ответственный редактор *С. В. Макаров*  
Верстка *Е. С. Крюков*  
Выпускающие *Н. А. Крылова, О. В. Шилкова*

ЛР № 065466 от 21.10.97  
Гигиенический сертификат 78.01.10.953.П.1028  
от 14.04.2016 г., выдан ЦГСЭН в СПб

**Издательство «ЛАНЬ»**  
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com;  
196105, Санкт-Петербург, пр. Юрия Гагарина, 1, лит. А.  
Тел.: (812) 412-92-72, 336-25-09.  
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 26.04.16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108<sup>1/32</sup>.  
Печать офсетная. Усл. п. л. 22,68. Тираж 100 экз.

Заказ № 115-16.

Отпечатано в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета  
в ПАО «Т8 Издательские технологии».  
109316, г. Москва, Волгоградский пр., д. 42, к. 5.