



для ВУЗОВ

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
МЕХАНИЧЕСКОЙ
И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ
В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ**

2-е издание, исправленное и дополненное

Под общей редакцией **В.Ф. Безъязычного**

Допущено Министерством образования и науки Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки» направления подготовки дипломированных специалистов «Двигатели летательных аппаратов»



**МОСКВА
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
2007**

УДК 621.45(075.8)

ББК 39.55

Т38

Авторы:

**В.Ф. Безъязычный, М.Л. Кузменко, В.Н. Крылов, А.В. Лобанов,
Ю.К. Чарковский, Е.В. Шилков, В.Ю. Ерошков, И.Д. Юдин**

Рецензенты:

кафедра «Технология производства двигателей
летательных аппаратов» МАТИ – Российского государственного
технологического университета им. К.Э. Циолковского;

Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор **В.С. Мухин**

Т38

Технологические процессы механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении: учебное пособие / В.Ф. Безъязычный, М.Л. Кузменко, В.Н. Крылов и др.; под общ. ред. В.Ф. Безъязычного. – 2-е изд., доп. – М.: Машиностроение, 2007. – 539 с.: ил.

ISBN 5-217-03366-5

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

С изучения этого курса студенты, будущие специалисты в области технологии производства авиационных двигателей и энергетических установок, 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 специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки» направления «Двигатели летательных аппаратов».

УДК 621.45(075.8)

ББК 39.55

ISBN 5-217-03366-5

© Издательство «Машиностроение», 2007

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, опубликованных в данной книге, допускаются только с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предметом изучения "Технологических процессов механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении" являются известные в авиадвигателестроении методы формообразования деталей, применяемое оборудование и инструментальные материалы, а также наиболее рациональные варианты использования их в технологических процессах изготовления деталей авиационных двигателей. При этом необходимо обратить внимание на рациональное применение тех или иных методов обработки, а также используемого оборудования и оснастки для обеспечения требуемого качества изделий.

Во 2-м издании (1-е изд. 2001 г.) приведена новая глава "Технологии изготовления основных авиационных двигателей, освоенные в отечественном производстве на оборудовании зарубежных фирм", а также даны изменения и новые сведения по прогрессивным методам обработки особонагруженных деталей авиационных двигателей.

Знание технологических процессов производства деталей авиационных двигателей и энергетических установок позволяет технологам 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 "Двигатели летательных аппаратов" и специальности "Авиационные двигатели и энергетические установки", с методами обработки различных поверхностей (плоских, наружных и внутренних цилиндрических, фасонных, резьбовых и др.), а также с используемым и для этих целей оборудованием и инструментом. Большое внимание уделено специфическим особенностям применения известных методов обработки именно в авиадвигателестроении, а также прогрессивным методам обработки, обеспечивающим требуемые параметры качества изготовления деталей, надежность и ресурс авиационных двигателей.

Учебное пособие написано коллективом преподавателей кафедры "Технология авиационных двигателей и общего машиностроения" Рыбинской государственной авиационной технологической академии и работников ОАО "НПО "Сатурн".

ВВЕДЕНИЕ

К деталям авиационных двигателей и энергетических установок предъявляются высокие требования по точности обработки и качеству 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, в авиадвигателестроении ее нельзя рассматривать как единственный способ обработки. Кроме того, в авиадвигателестроении, в силу специфических особенностей обрабатываемых деталей и применяемых для их изготовления материалов, в ряде случаев обработка резанием вообще невозможна или не обеспечивает требуемого качества изделий. В связи с этим, в современном авиадвигателестроении широко применяются специальные методы обработки, такие как электрические, электрохимические, ультразвуковые, лучевые, а также комбинированные и совмещенные. В современном авиадвигателестроении 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). Исходя из специфики авиадвигателестроения (конструкции деталей, требований к ним, материала, из которого они изготовлены, и др.) наряду с оборудованием, применяемым в общем машиностроении, в авиадвигателестроении 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 уделено автоматизации технологических процессов и методов обработки, направленных на снижение физических, химических, биологических и др. факторов, обеспечивающих создание безопасных условий труда.

Глава 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ АВИАЦИОННЫХ 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_γ режущего инструмента называется *передней поверхностью лезвия* (рис.1.1). Эта поверхность в процессе резания контактирует с деформированным слоем, переходящим в стружку. Поверхность A_α называется *главной задней поверхностью лезвия*, а поверхность A'_α – *вспомогательной задней поверхностью лезвия*. Она обращена к обработанной поверхности.

Передняя A_γ и задняя A_α поверхности лезвия образуют режущий клин, а их пересечение создает *режущую кромку (главное лезвие) К*. Пересечение передней и вспомогательной задней поверхностей образует *вспомогательную режущую кромку К'*. Между главной и вспомогательной кромками

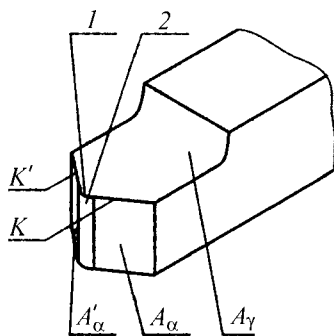


Рис. 1.1. Элементы рабочей части резца

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).

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 (движение заготовки или режущего инструмента, происходящее с наибольшей скоростью в процессе резания). *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 движения резания (см. рис. 1.2).

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.

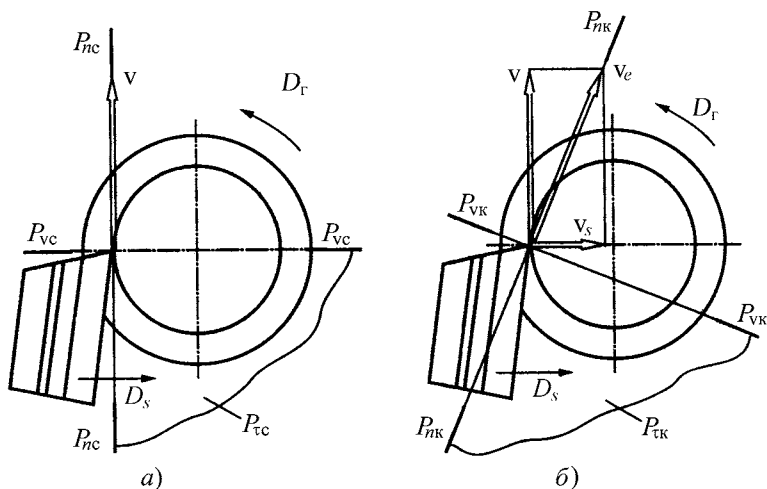


Рис. 1.2. Системы координат и координатные плоскости при точении:

a – статическая и b – кинематическая системы координат; D_g – главное движение резания; D_s – движение подачи; P_{vc} и P_{vk} – основные плоскости 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_{tc} P_{tk} – 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)

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 рис. 1.3.

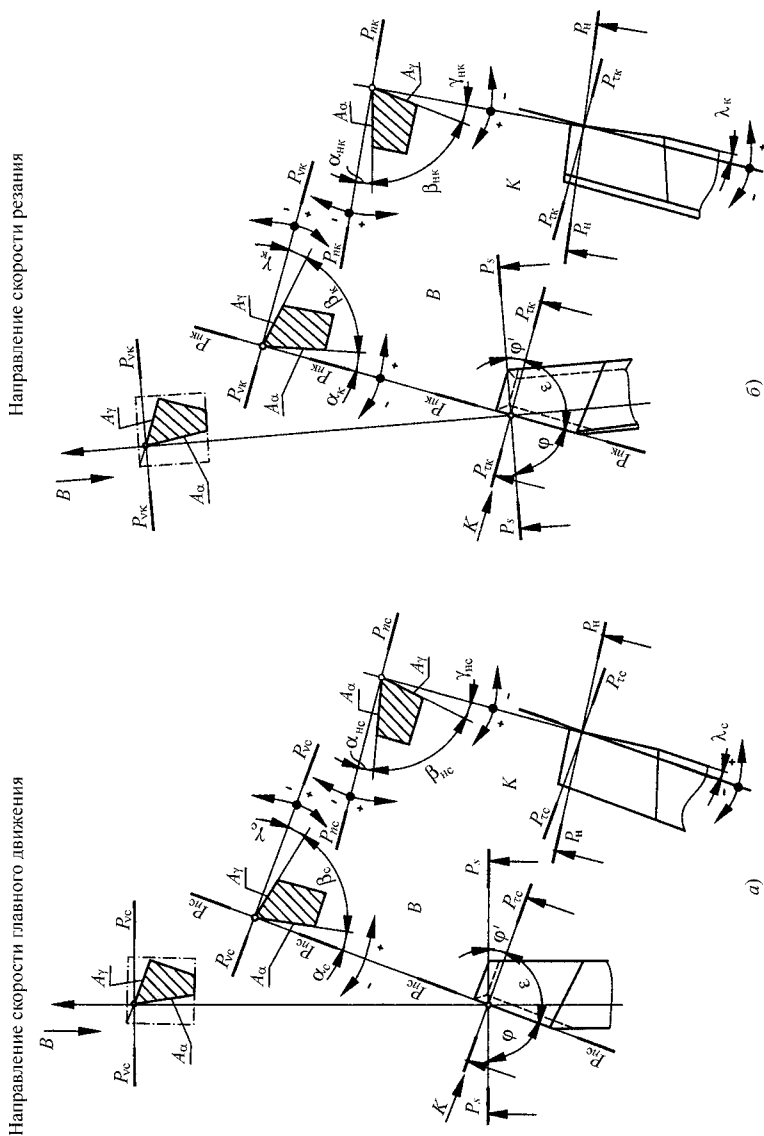


Рис. 1.3. Углы реза:

a — в статической системе координат; b — в кинематической системе координат

Передним углом γ 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 α* – угол в секущей плоскости между задней поверхностью лезвия и плоскостью резания. Режущие инструменты могут иметь главный передний угол, а также главный и вспомогательный задние углы.

Главным передним углом γ_c и γ_k называется угол в статической и кинематической системах координат главной секущей плоскости между передней поверхностью лезвия и статической или кинематической основной плоскостью соответственно. *Главным задним углом α_c и α_k* называется угол в статической и кинематической системах координат в главной секущей плоскости лезвия между задней поверхностью и статической или кинематической плоскостями резания соответственно.

Вспомогательным задним углом α_{lc} и α_{lk} называется угол в секущей плоскости, перпендикулярной вспомогательной режущей кромке K' , в статической и кинематической системах координат между вспомогательной задней поверхностью и статической или кинематической плоскостями резания соответственно.

Главным углом в плане ϕ называется угол в основной плоскости между плоскостью резания и рабочей плоскостью.

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 ϕ_1* называется угол в основной плоскости между вспомогательной режущей кромкой K' и рабочей плоскостью.

Углом заострения β называется угол в секущей плоскости между передней и задней поверхностями лезвия. *Углом при вершине резца в плане ϵ* называется угол в основной плоскости между главной и вспомогательной режущими кромками.

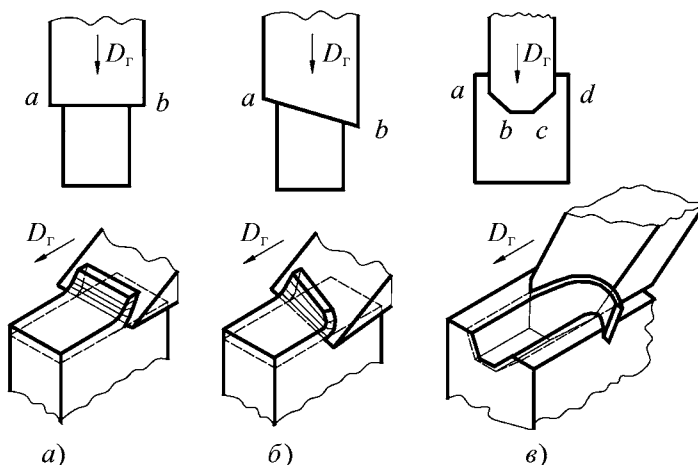


Рис. 1.4. Основные схемы резания:

а – свободное; *б* – косоугольное; *в* – несвободное

Угол наклона режущей кромки λ – угол в плоскости резания между режущей кромкой и основной плоскостью.

Радиус вершины r – радиус кривизны вершины лезвия. Радиус округления режущей кромки ρ – 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. 1.4, *а*), когда в работе участвует только одна прямолинейная режущая кромка, перпендикулярная направлению вектора скорости перемещения инструмента D_r ; *косоугольное резание* (рис. 1.4, *б*), 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. 1.4, *в*).

Обрабатываемые заготовки и режущие инструменты приводятся во взаимосогласованное движение механизмами металлооре-

жущих 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 движение; V – два вращательных движения; VI – два поступательных и одно вращательное движение; VII – два вращательных и одно прямолинейное движение; 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.).

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 врезания лезвий инструмента в материал заготовки и отделения срезаемого слоя в виде стружки со всей обрабатываемой поверхности при осуществлении главного рабочего движения. Главное движение и движение 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:

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

где D – диаметр обрабатываемой поверхности заготовки или рабочей поверхности инструмента, мм; n – частота вращения заготовки инструмента, об/мин (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. 1.5, а)), представляет собой площадь срезаемого слоя $f = ab = St$, 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.).

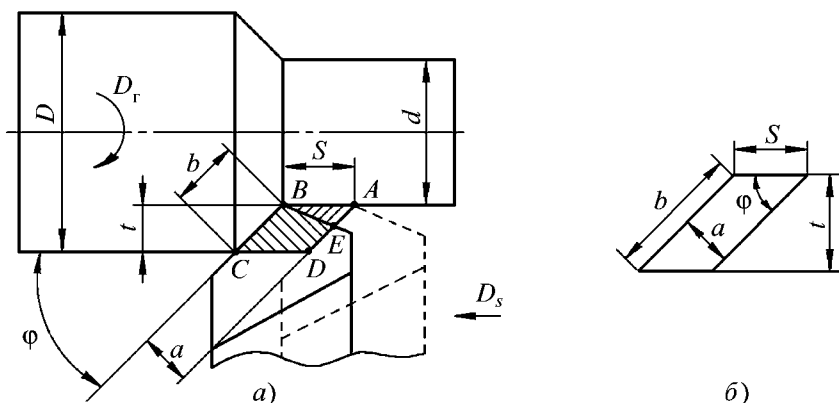


Рис. 1.5. Схема резания при продольном точении:
 a – элементы резания; b – площадь поперечного сечения
срезаемого слоя

Приведенная на рис. 1.5, a 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 $f = tS$. С уменьшением глубины резания t , подачи S , углов в плане ϕ и ϕ_1 , а также радиуса при вершине резца высота остаточных гребешков уменьшается.

Площадь поперечного сечения срезаемого слоя, имеющего форму, близкую к параллелограмму (рис. 1.5, б), 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: $a = S \sin \phi$, $b = t / \sin \phi$.

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 теплоустойчивость (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, они различаются только теплоустойчивостью 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 °С). 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 мелкозернистую структуру. После термической обработки твердость легированной стали составляет 62...65 HRC, а теплостойкость – 250...350 °С. Допустимые скорости резания 15...25 м/мин. Наибольшее распространение получили легированные стали ХВГ, 9ХС и др. Легированные стали применяются для изготовления сверл, протяжек, метчиков, разверток и др.

Быстрорежущие стали. Эти стали имеют более высокую теплостойкость и износостойкость по сравнению с углеродистыми и легированными сталями. Основным 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 температуре 1240...1280 °С, трехкратный отпуск с температурой 550...560 °С). При термообработке обеспечивается твердость 62...69 HRC, теплостойкость 620...730 °С, изгибная прочность $(2,5...4)10^3$ Н/мм².

Быстрорежущие стали обозначают буквой Р, следующая за ней цифра указывает среднее содержание вольфрама в процентах. Стали, содержащие ванадий, молибден, кобальт, имеют в марки-

ровке буквы Ф, М, К и цифры, показывающие их среднее содержание в процентах. Например, сталь P18K5Ф2 содержит вольфрама до 18 %, кобальта до 5 % и ванадия до 2 %. Быстрорежущие стали по теплостойкости подразделяются на *стали умеренной, повышенной и высокой теплостойкости*.

К сталям умеренной теплостойкости (620...630 °С) относятся вольфрамовые стали P18, P12, P9, вольфрамомолибденовые стали P6M5, P8M3 и др. Стали умеренной теплостойкости применяются в основном для обработки конструкционных материалов с $\sigma_b \leq 900...1000 \text{ Н/мм}^2$.

Стали повышенной теплостойкости (630...650 °С) дополнительно легируются кобальтом и ванадием. К наиболее распространенным маркам сталей повышенной теплостойкости относятся: P9M4K8, P6M5K5 и др. Стали повышенной теплостойкости предназначены для обработки труднообрабатываемых материалов: жаропрочных и титановых сплавов, нержавеющей и конструкционных сталей с $\sigma_b \geq 1000 \text{ Н/мм}^2$.

Стали высокой теплостойкости имеют пониженное содержание углерода (0,05...0,15 %). Теплостойкость их составляет 700...730 °С, 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 B14M7K25, B18M7K25 и др., которые целесообразно применять при резании труднообрабатываемых материалов, например, титановых сплавов, нержавеющей и жаропрочных сталей.

Разработаны быстрорежущие стали с малым содержанием вольфрама и безвольфрамовые. Такие стали имеют теплостойкость 620 °С, 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 °С. При спекании твердые сплавы приобретают высокую твердость 86...90 HRA. Теплостойкость твердых сплавов составляет 800...1000 °С.

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 карбидов титана, тантала и 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.

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 получистовой и чистовой обработке конструкционных, малолегированных сталей, чугунов и некоторых цветных металлов.

При выборе твердосплавных инструментов необходимо, 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 °С) 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 Н/мм²).

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 Н/мм². 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 получистой и чистовой 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 °С). 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 °С. По твердости КНБ близок к твердости алмаза, а по теплостойкости (1500 °С) 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 квалитетов точности и шероховатости поверхности $Ra = 0,08...0,16$ 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 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, которые его сопровождают, имеет большое практическое значение, так как дает возможность осуществлять резание с наибольшей производительностью и высоким 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 кристаллографическим 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 межуатомных 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.

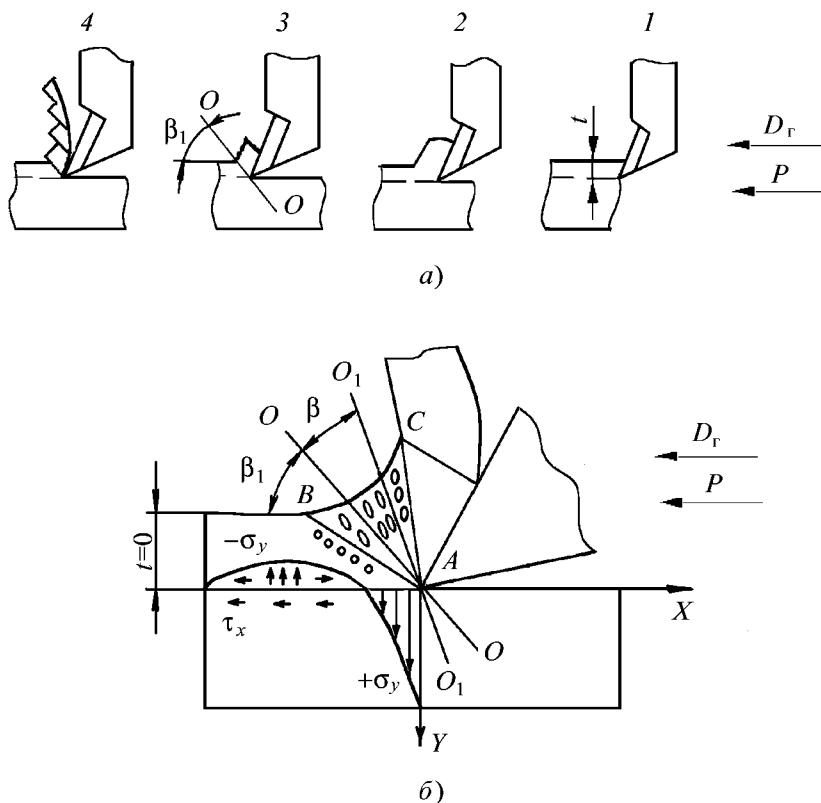


Рис. 1.6. Последовательность образования элементов стружки (а) и схема напряженного состояния материала при обработке резанием (б)

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. 1.6, *а*, положение 1). В металле возникают упругие деформации. При дальнейшем движении режущий элемент резца вдавливаются в металл, вызывая его пластическое деформирование (положение 2). При продолжении движения резца 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 β_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 β_1 , определяющий положение плоскости сдвига относительно направления движения инструмента D_T , называют углом сдвига (углом скалывания).

В срезаемом прирезцевом слое материала заготовки возникает сложное упругонапряженное состояние (рис. 1.6, *б*). В плоскости, перпендикулярной траектории движения резца, создаются нормальные напряжения σ_y , а в плоскости, совпадающей с направлением движения резца, – касательные напряжения τ_x . Сдвиговые деформации происходят в зоне стружкообразования ABC . Деформация начинается в плоскости AB и заканчивается в плоскости AC , в которой завершается разрушение кристаллов, т.е. скалывается элементарный объем металла, и образуется стружка.

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

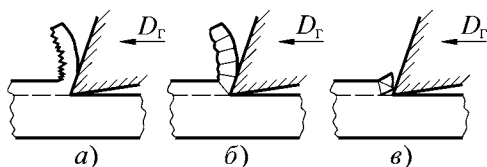


Рис. 1.7. Типы стружек при резании:

а – сливная; *б* – скалывания; *в* – надлома

направлением O_1O_1 . При обработке заготовок из хрупких материалов значение угла β близко к нулю, а при резании пластичных материалов может составлять до 30° .

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).

Сливная стружка (рис. 1.7, *а*) 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, *б*) 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 (рис. 1.7, *в*) образуется при обработке хрупких материалов (чугун, твердая бронза и др.). Она состоит из отдельных, не связанных между собой элементов. Срезаемый слой пластически почти не деформируется.

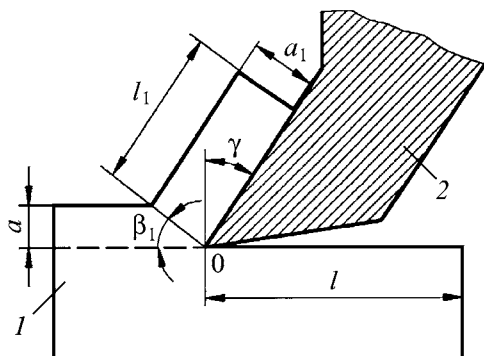


Рис. 1.8. Схема для определения усадки стружки при резании:

1 – обрабатываемая заготовка; *2* – резец

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 рис. 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 $K_l = 1 \dots 8$. Для заготовок из хрупких материалов K_l близко к 1, а для пластичных материалов $K_l = 5 \dots 8$.

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 реза-

ния $v = 5$ м/мин. При $v = 30 \dots 50$ м/мин $K_f = 1$, соответственно при $v = 100$ м/мин $K_f = 0,8$. 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 рис. 1.9 показана 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

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

где μ_1 и μ_2 – коэффициенты трения стружки о переднюю грань режущего клина и задней грани его о заготовку.

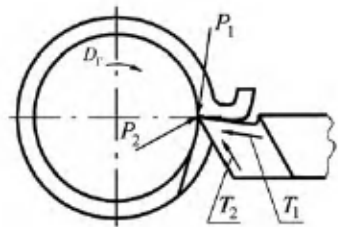


Рис. 1.9. Схема сил, действующих на резец

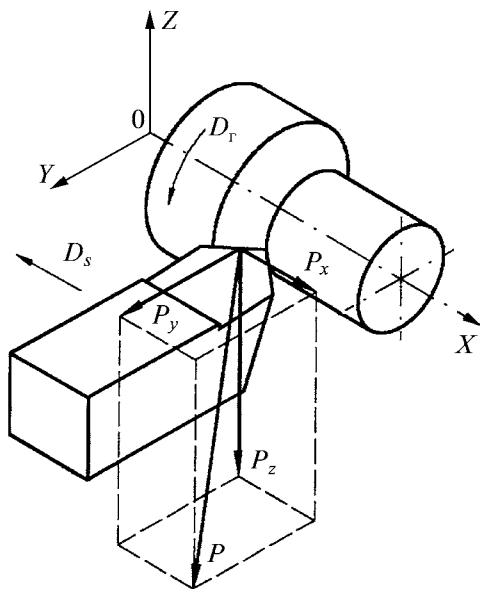


Рис. 1.10. Разложение силы резания на составляющие

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.

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

$$P_z/P_y/P_x = 1/(0,5 \dots 0,3)/(0,4 \dots 0,5).$$

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

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

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

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

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

где τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Н/м²; a_1 и b_1 – толщина и ширина среза, м; C_0 и n_0 – безразмерные величины, зависящие от предела прочности обрабатываемого материала; $E = \frac{\rho_1}{a_1}$ – критерий, характеризующий влияние

на процесс резания геометрической формы режущей кромки резца; ρ_1 – радиус округления режущей кромки резца, м; α и γ – задний и передний углы резца; $M = \frac{b}{b_1}$ – 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

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

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

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

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

Необходимая мощность электродвигателя станка N_3 , кВт, с учетом коэффициента полезного действия станка η :

$$N_3 = N_e / \eta,$$

где $\eta = 0,75 \dots 0,80$.

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 рис. 1.11.

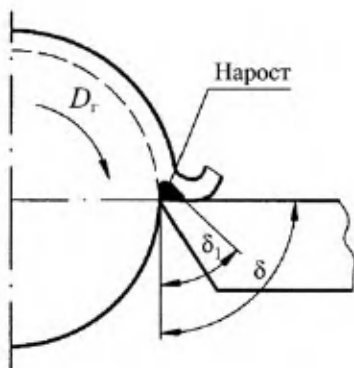


Рис. 1.11. Схема образования нароста при резании

При определенных условиях заторможенный слой начинает расти, образуя новое тело, прочно присоединяемое к передней поверхности инструмента. Нарост имеет форму клина с углом резания δ_1 меньше, чем у резца δ . Вследствие сильной деформации он приобретает большую твердость, в 2,5...3,5 раза превосходящую исходную твердость обрабатываемого материала, и 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

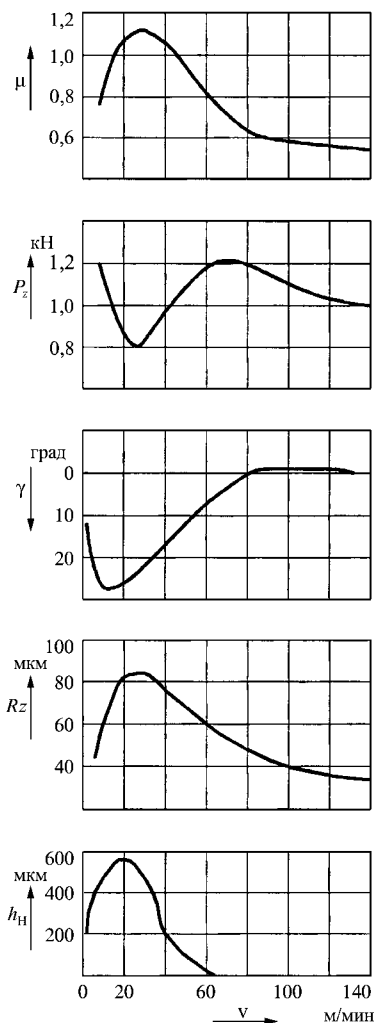


Рис. 1.12. Влияние нароста h_N на коэффициент трения μ , силу резания P_z , передний угол γ и шероховатость обработанной поверхности R_z при различных скоростях резания стали 40X

прочности, в результате чего он теряет свою режущую способность, контактные силы адгезии уменьшаются. Нарост раздавливается и уносится стружкой, но может вдавливаясь в обрабатываемую 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.

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 $v = 20 \dots 30$ м/мин. При малых скоростях резания ($v = 5 \dots 8$ 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 рис. 1.12 показано влияние высоты нароста h_n на коэффициент трения μ , силу резания P_z , передний угол γ и шероховатость обработанной поверхности R_z .

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 γ , уменьшение угла резания δ), применение высокоэффективных СОТС, тщательную заточку и доводку поверхностей лезвия инструмента для уменьшения трения на передней поверхности.

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 внутрикristаллические 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 ин-

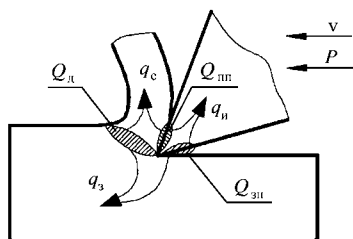


Рис. 1.13. Схема образования и распространения теплоты при резании

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:

$$Q = P_z v, \text{ Дж/мин},$$

где P_z – сила резания, действующая в направлении скорости резания; H ; v – скорость резания, м/мин.

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

Тепловой баланс процесса резания можно представить следующим образом:

$$Q = Q_d + Q_{сп} + Q_{зп} = q_c + q_z + q_{и} + q_{ос},$$

где Q_d – количество теплоты, выделяющейся при упругопластическом деформировании обрабатываемого материала, Дж; $Q_{сп}$ – количество теплоты, выделяющейся при трении стружки о переднюю поверхность резца, Дж; $Q_{зп}$ – 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; $q_{и}$ – количество теплоты, отводимой режущим инструментом, Дж; $q_{ос}$ – количество теплоты, переходящее в окружающую среду, Дж.

струмента и повышается качество обработанной поверхности. С другой – тепловое воздействие на режущее лезвие инструмента вызывает изменение физико-механических свойств и структуры инструментального материала.

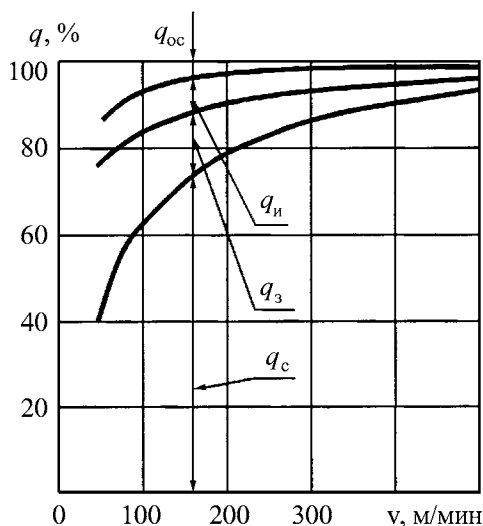


Рис. 1.14. Распределение отводимой теплоты в зависимости от скорости резания

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

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

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

1.1. Распределение количества теплоты в зоне обработки

Обрабатываемый материал	Скорость резания v , м/мин	Доля количества теплоты, %		
		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

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 °С, 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 этим 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

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

где θ – температура резания, °С; 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 , Y , X – показатели степени, характеризующие интенсивность изменения температуры с увеличением v , S и t .

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

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

где τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, МПа; a_1 – температуропроводность обрабатываемого материала, м²/с; $B = \operatorname{tg} \beta_1$ – критерий, характеризующий степень пластических деформаций металла снимаемого припуска; β_1 – угол

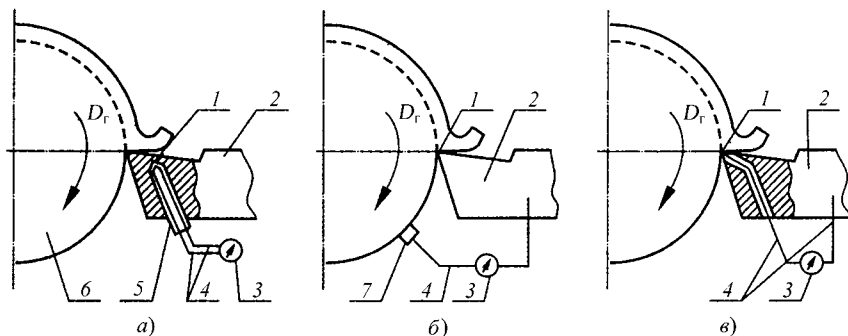


Рис. 1.15. Схемы термопар для измерения температуры в зоне резания:

a – искусственная; *б* – естественная; *в* – полусинтетическая;
 1 – спай термопары; 2 – резец; 3 – регистрирующий прибор;
 4 – провод; 5 – изоляционный элемент; 6 – обрабатываемая заготовка;
 7 – токосъемник

наклона условной плоскости сдвига; c_p – удельная объемная теплоемкость материала снимаемого припуска, $\text{Дж/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$; λ_p и λ – коэффициенты теплопроводности обрабатываемого и инструментального материалов, $\text{Дж/м}^3 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}$.

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 рис. 1.15. Искусственная термопара (рис. 1.15, *a*) 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.

В естественной термопаре (рис. 1.15, б) 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 полунискусственные термопары (рис. 1.15, в). 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 деталью.

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 детали 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 °С, происходит **диффузионный износ**. При обработке жаропрочных сплавов и сталей диффузионный износ инструмента может иметь место при температурах 500...550 °С. При этом атомы инструментального материала проникают (диффундируют) в стружку и в верхние слои обрабатываемой детали. 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:

- 1) большая доля тепла переходит в инструмент, повышая его температуру;
- 2) рост удельных давлений на режущую часть инструмента;
- 3) интенсивнее проявляются адгезия и диффузия;
- 4) увеличенная истирающая способность обрабатываемого материала;
- 5) повышенные 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 $h_3 = 0,8 \dots 1$ мм. При обработке жаропрочных сплавов износ наступает при $h_3 = 0,8 \dots 1,0$ мм при черновом точении и $h_3 = 1,5 \dots 2,0$ 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 повышение 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 $1 \dots 3$ 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. 1.16, а). Этот метод несмотря на очевидные преимущества имеет следующие недостатки: большой расход жидкости и ее разбрызгивание, недостаточное смазывающее действие.

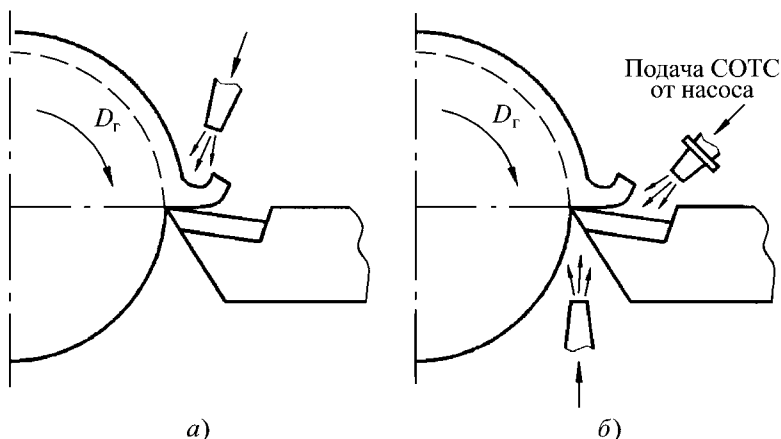


Рис. 1.16. Схемы подвода СОТС в зону резания:

а – полив свободной струей; *б* – высоконапорное охлаждение

Эффективно применение высоконапорного охлаждения (рис. 1.16, б), 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 нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов высоконапорное охлаждение может производиться 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 °С. 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 обработанной 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 определяются *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 ϕ , ϕ_1 и радиус при вершине резца r) и условиями контактирования задней поверхности с обработанной поверхностью детали (углы α и α_1). Подача определяет высоту и периодичность следования микронеровностей. От скорости резания зависят условия обтекания 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_n , степени U_n и градиенту U_{gr} наклепа. Степень и градиент наклепа определяются по формулам:

$$U_{\text{Н}} = \frac{H_{\text{max}} - H_{\text{исх}}}{H_{\text{исх}}} 100 \% ; \quad U_{\text{ГР}} = \frac{H_{\text{max}} - H_{\text{исх}}}{h_{\text{Н}}} ,$$

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

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 $0,4T_{\text{пл}}$ возможна рекристаллизация и снятие деформационного упрочнения, где $T_{\text{пл}}$ – температура плавления.

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 РЕЗАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

В авиационном двигателестроении 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 авиационных 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 авиационных 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 табл. 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 реза-

1.2. Классификация материалов по обрабатываемости резанием и инструментальные материалы для изготовления режущих инструментов, применяемых при обработке деталей из авиационных материалов

Номер группы и класс материала	Марки материалов	Коэффициент обрабатываемости по отношению к стали 45	Рекомендуемые инструментальные материалы для изготовления режущих инструментов		Ориентировочная скорость резания, м/мин	
			Быстро-режущая сталь	Твердый сплав	Быстро-режущая сталь	Твердый сплав
I. Теллостойкие хромистые, хромоникелевые хромомолибденовые стали перлитного и мартенситного классов	20Х3МВФ	0,5	Р6М5; Р12	Т5К10; Т15К6; Т30К4; ВК8; ВК6М; КТН-16	20...30	120...150
	15Х5М	0,9			45...60	200...250
	15Х6СЮ	0,9			45...60	200...250
II. Коррозионно-стойкие, хромистые и сложлегированные стали ферритного, мартенситно-ферритного классов	12Х13	0,7	Р9К10; Р6М5; Р9М4К8Ф; Р10К5Ф5; Р18	Т5К10; Т15К6; ВК8; ВК6М; ВК10М; КНТ-16	35...50	180...220
	25Х13Н2	0,9			45...60	200...250
	11Х11Н2В2МФ	0,65			30...40	170...200
III. Коррозионно-стойкие, кислотостойкие, жаростойкие, хромоникелевые стали	20Х23Н18	0,6	Р12Ф2К8М3; Р9К5; Р9М4К8Ф	ВК8; ВК8В; ВК60М; ВК3М; Т15К6; ВК10М; КНТ-16	30...40	120...140
	12Х21Н5Т	0,45			20...30	110...130
	0,7Х16Н6	0,5			25...35	120...150

Продолжение табл. 1.2

Номер группы и класс материала	Марки материалов	Коэффициент обрабатываемости по отношению к стали 45	Рекомендуемые инструментальные материалы для изготовления режущих инструментов		Оrientировочная скорость резания, м/мин	
			Быстро-режущая сталь	Твердый сплав	Быстро-режущая сталь	Твердый сплав
IV. Жаропрочные, жаростойкие, кислотоустойчивые хромоникелевые	37X12H8Г8МФБ 45X14H14B2M 12X25H16Г7AP	0,23 0,4 0,3	P12Ф2К5М3; P9M4K8Ф; P9K5; P10K5Ф5	BK6M; BK8; BK60M; BK3M; T15K6; BK10M; HT-16	12...20 20...28 15...25	50...60 100...120 80...100
V. Жаропрочные деформируемые сплавы на железоникелевой и никелевой основе	ХН60ВТ ХН67ВМТЮ ХН82ТЮМБ	0,16 0,1 0,08	P9M4K8Ф; P6M5; P9K10; P18; P9MНK8; P9K5	BK8; BK6M; BK10M; BK150M; BK10-OM; BK8; BK6M	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	P9M4K8Ф; P12Ф2К8М3; P18Ф2K8M; P9K10; P10K5Ф5	BK8; BK60M; BK6M; BK150M; TT10K8Б; BK3M	— — —	18...20 18...20 18...20

нием 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 сложнолегированные 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.

К **VI группе** отнесены литейные жаропрочные сплавы, они содержат большее количество легирующих элементов и, вследствие этого, более жаропрочные, чем деформируемые. Эти сплавы менее вязкие, 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 °С, 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 настоящее время 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 материале инструмента твердых соединений из металлических порошков;
- конденсация веществ из плазменной фазы в условиях ионной бомбардировки (способ КИБ).

Глава 2

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Широкие диапазоны характеристик деталей газотурбинных двигателей 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 т.ч. станки особо высокой точности, тяжелые станки для обработки крупногабаритных деталей, станки для физико-химических методов обработки, станки-автоматы 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 среднесерийного производства, которое характерно для ГТД. 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 табл. 2.1.

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.

2.1. Классификация металлорежущих станков

Наименование	Группа	Тип									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Автоматы и полуавтоматы			Токарно-револьверные	Токарно-револьверные	Токарно-револьверные	Токарно-револьверные	Токарные и лоботочные	Много-резцовые и копиральные	Специализированные
Специализированные	Одношпиндельные	Многошпиндельные									
Токарные	1	—	Настольно и вертикально-сверлильные	Полуавтоматы		Координатно-расточные	Радиально- и координатно-сверлильные	Расточные	Отделочно-расточные	Горизонтально-сверлильные	Разные сверлильные
				одношпиндельные	многошпиндельные						
Шлифовальные, полировальные, доводочные, заточные	3	—	Круглошлифовальные	Внутренне-шлифовальные	Обдирочно-шлифовальные	Специализированные	—	Заточные	Плоскошлифовальные	Притирочные и полировальные	—
Электрофизические и электрохимические	4	—	—	Светолучевые	—	Электрохимические	—	—	Электроэрозионные, ультразвуковые, проволочные	Анодно-механические отрезные	—

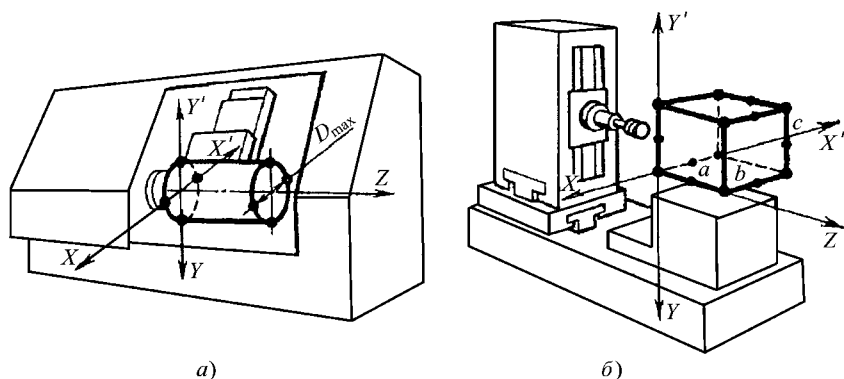


Рис. 2.1. Рабочие пространства станков:

a – токарного; *б* – многооперационного

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).

По размерным характеристикам установлен ряд стандартных значений какого-либо параметра, обычно в геометрической прогрессии с некоторым знаменателем ϕ . Так, для станков токарной группы $\phi = 1,25$ стандартный ряд наибольших диаметров обраба-

тываемых 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, руб. 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.

2.2. Производительность размерной обработки

Вид обработки	Производительность, см ³ /мин	Удельная мощность, (кВт · мин)/см ³
Точение	1500	0,06
Шлифование	800	0,6
Электроискровая	15	1
Электрохимическая	15	10
Ультразвуковая	1	25
Лазерная	0,001	4000

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 табл. 2.2 приведены данные по производительности различных методов обработки и затратам мощности для удаления 1 см³ материала за 1 мин.

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:

$$P(t) = 1 - Q(t) = \frac{N_{\text{и}}}{N_{\text{о}}} ,$$

где $Q(t)$ – вероятность отказа по результатам испытаний; $N_{\text{и}}$ – количество элементов, которые оказались исправными при испытаниях; $N_{\text{о}}$ – 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 большее 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 запуска, шт); N – годовая программа изготовления деталей, шт; n – номенклатура (количество наименований) деталей, намечаемых для обработки на станке.

На рис. 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.

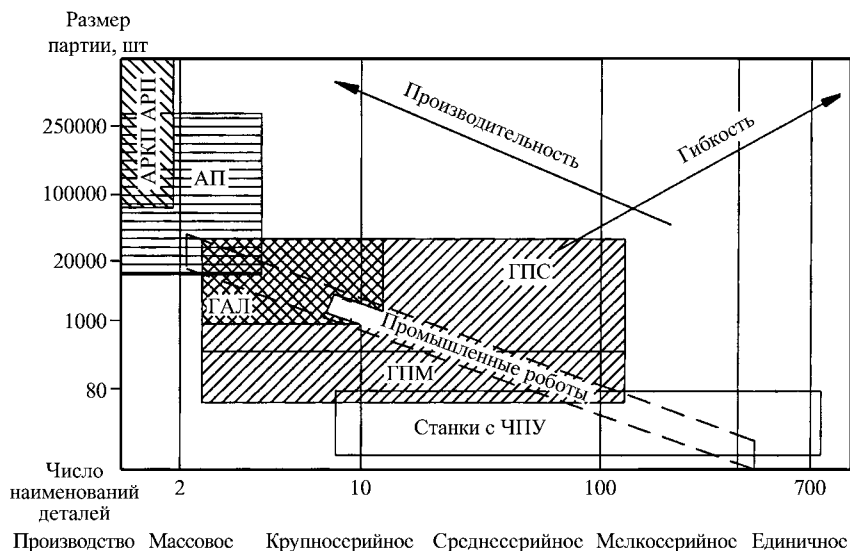


Рис. 2.2. Область применения автоматизированного металлорежущего оборудования:

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

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.

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; δ – 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 СТРУКТУРА 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 Φ , 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 ($\Phi(В)$) и поступательное ($\Phi(П)$). Сложными формо-

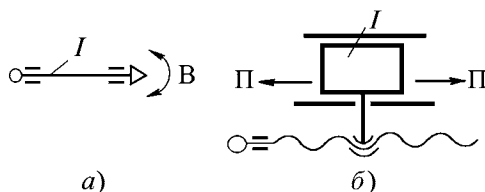


Рис. 2.3. Исполнительные кинематические группы:

a – вращательная; *б* – поступательная; П – поступательное движение; В – вращательное движение; *I* – исполнительный орган

образующими движениями являются те, траектория которых образуется в результате согласованности взаимозависимых двух и более вращательных или поступательных движений – $\Phi(V_1V_2)$, $\Phi(V_1П_2)$, $\Phi(V_1П_2П_3)$ 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 рис. 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 ограничения, не позволяющие занимать исполнительным органам произвольные положения в пространстве относительно друг друга и иметь произвольные скорости.

Под внутренней кинематической связью группы понимают совокупность кинематических звеньев и соединений, обеспечивающих качественную характеристику движений, т.е. траекторию.

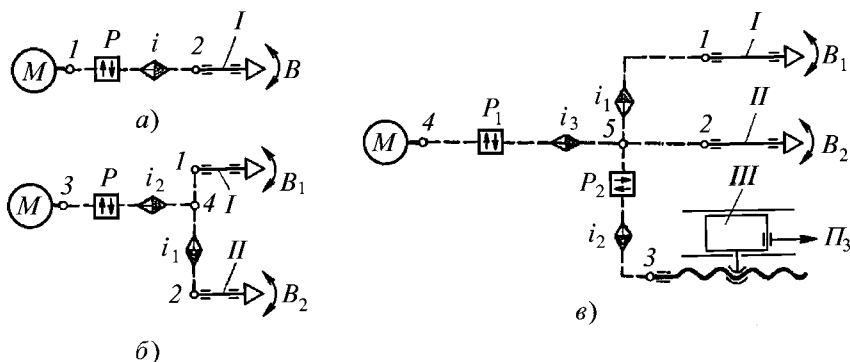


Рис. 2.4. Структурные схемы кинематических групп:

а – простая; *б* – сложная с двумя исполнительными органами;

в – сложная с тремя исполнительными органами

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 рис. 2.4.

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.

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

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

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 2.701–84 и ГОСТ 2.703–68 приведены в табл. 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 с ГОСТ 2.780–96, ГОСТ 2.782–68, ГОСТ 2.784–68 (табл. 2.4).

Кинематическая цепь состоит 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:

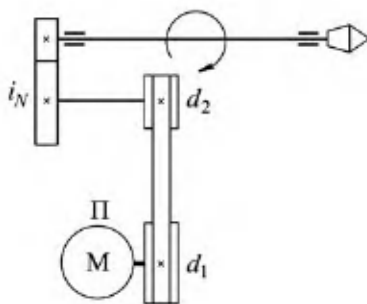
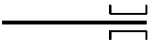
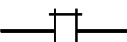
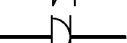
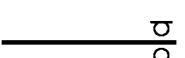
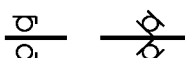
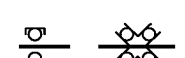
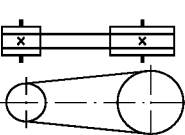
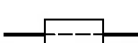
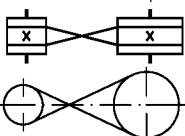
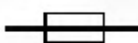
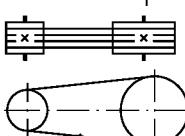
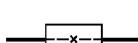


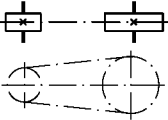
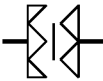
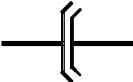
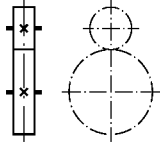
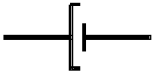
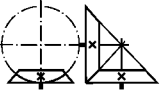
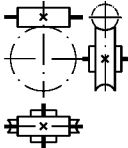
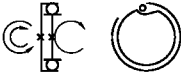
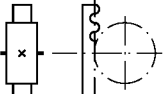
Рис. 2.5. Кинематическая цепь привода вращения шпинделя

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

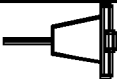
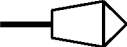
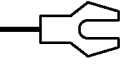
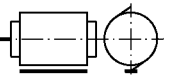
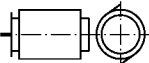
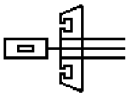
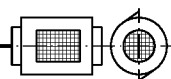
2.3. Условные обозначения элементов кинематических схем

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Вал		Подшипники скольжения:	
Соединение двух валов:		радиальный	
глухое		радиально-упорный односторонний	
глухое с предохранением от перегрузок		радиально-упорный двусторонний	
эластичное		Подшипники качения:	
шарнирное		радиальный	
телескопическое		радиально-упорный односторонний	
плавающая муфта		радиально-упорный двусторонний	
зубчатая муфта		Ременная передача:	
Соединение деталей с валом:		плоским ремнем	
свободное для вращения		перекрестная	
подвижное без вращения		клиновидным ремнем	
при помощи вытяжной шпонки			
неподвижное			

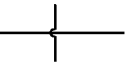
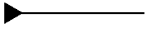
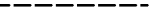
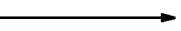
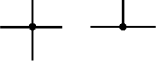
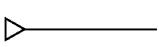
Продолжение табл. 2.3

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Передача цепью		кулачковая двусторон- няя	
Передачи зубча- тые:		конусная	
цилиндриче- скими колесами		дисковая од- носторонняя	
коническими колесами винто- вые		дисковая двусторон- няя	
Передача червяч- ная		обгонная од- носторонняя	
Передача зубчатая реечная		обгонная двусторон- няя	
Передача ходовым винтом с гайкой:		Тормоза:	
неразъемной		конусный	
разъемной		колодочный	
Муфты:		ленточный	
кулачковая од- носторонняя		дисковый	

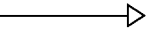
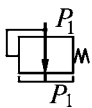
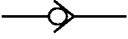
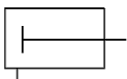
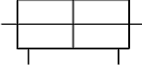
Продолжение табл. 2.3

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Концы шпинделей станков:		фрезерных	
центровых		шлифовальных	
патронных		Электродвигатели:	
прутковых		на лапках	
сверлильных		фланцевые	
расточных с планшайбой		встроенные	

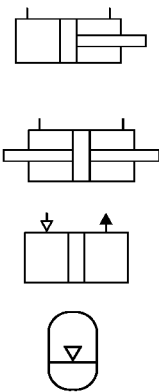
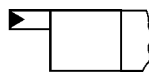
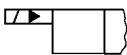
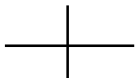
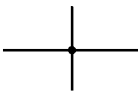
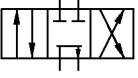
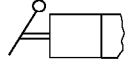
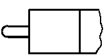
2.4. Условные обозначения элементов гидравлических, пневматических и электрических схем

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Линии связи (трубопроводы):		Перекрещивание линий связи	
всасывания, напора, слива		Трубопровод гибкий	
управления		Подвод жидкости	
дренажные		Слив жидкости	
Соединение линий связи		Подвод воздуха	

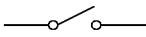
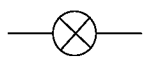
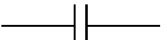
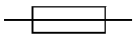
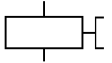
Продолжение табл. 2.4

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Выпуск воздуха		Дроссель:	
Гидробак		нерегулируемый	
Фильтр		регулируемый	
Насосы:		Регулируемый орган:	
нерегулируемые с нереверсивным потоком		нормально закрытый	
регулируемые с нереверсивным потоком		нормально открытый	
Гидромоторы:		Клапан предохранительный с собственным управлением	
с нереверсивным потоком		Клапан дифференциальный	
регулируемые		Гидроцилиндры двухстороннего действия:	
Гидроклапан обратный		с односторонним штоком	
Кран		с двухсторонним штоком	

Продолжение табл. 2.4

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Распределитель: четырёхлинейный двухпозиционный		электрогидравлическое	
		Камера мембранная двустороннего действия	
		Гидроусилитель	
		Пневмогидравлический преобразователь	
		Аккумулятор пневмогидравлический	
Тип управления распределителя:			
ручное		Линия электрической связи	
от кулачка		Линии электрической связи перекрещивающиеся, электрически не соединенные	
пружиной		Линии электрической связи, электрически соединенные	
от рукоятки с фиксатором		Род тока: постоянный	
от электромагнита		переменный	
гидравлическое			

Продолжение табл. 2.4

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Обмотка трех- фазная: соединение в звезду		Выключатель; контакт выключа- теля замыка- ющий	
		Диод полупро- водниковый	
соединения в треугольник		Лампа накали- вания	
Резистор (со- противление)		Двигатель трех- фазный	
Конденсатор		Предохрани- тель	
Катушка ин- дуктивности		Электромагнит	
Амперметр		Муфта элек- тромагнитная	
Вольтметр			

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

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

$$n_{\text{н}} i = n_{\text{к}},$$

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

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

$$n_n i H = S_k,$$

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)

$$H = k t_v,$$

где k – число заходов резьбы; t_v – шаг винта, мм.

Для реечной передачи

$$H = \pi m z,$$

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

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

$$n_{дв} i k t_v = S_k.$$

Для цепи с реечной передачей

$$n_{дв} i \pi m z = S_k.$$

Уравнение кинематического баланса для оборотной подачи на один оборот:

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

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

$$i = n_{шп} / n_{дв}.$$

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 подачи (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 рис. 2.6.

Замкнутый профиль (рис. 2.6, *а*) характерен для станин фрезерных, сверлильных и других станков. Для горизонтальных станин применяют открытый профиль (рис. 2.6, *б*), когда две стенки соединены ребрами той или иной формы (токарные, револьверные, расточные станки), либо полуоткрытый (рис. 2.6, *в*) (строгальные,

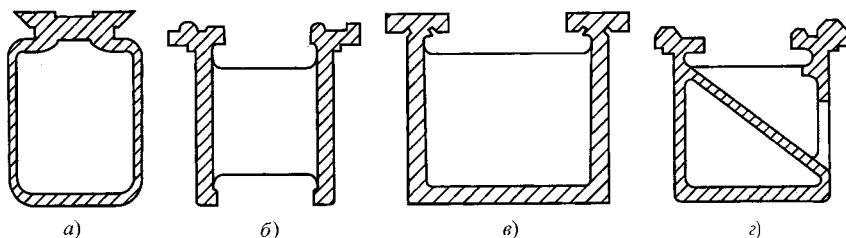


Рис. 2.6. Профили поперечного сечения станин

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. 2.6, г).

Станины изготавливаются литыми из серого чугуна СЧ20, СЧ30 (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 синтегран 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 стан-

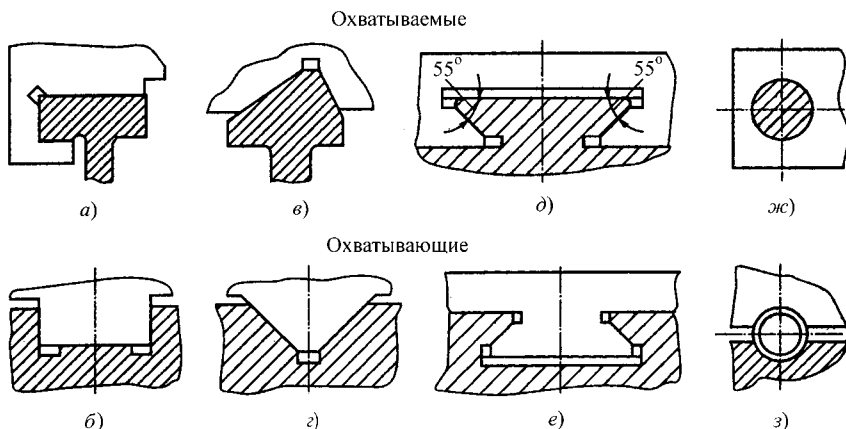


Рис. 2.7. Типы направляющих скольжения

ка 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. 2.7, а, б), призматические (рис. 2.7, в, г), трапецидальные (в форме ласточкина хвоста) (рис. 2.7, д, е) и круглые (рис. 2.7, ж, з).

По ограничению степени свободы перемещающегося узла направляющие бывают закрытые (см. рис. 2.7, д, е, ж), когда узел имеет одну степень свободы, и открытые, когда такое условие не накладывается.

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 простотой 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).

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:

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

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

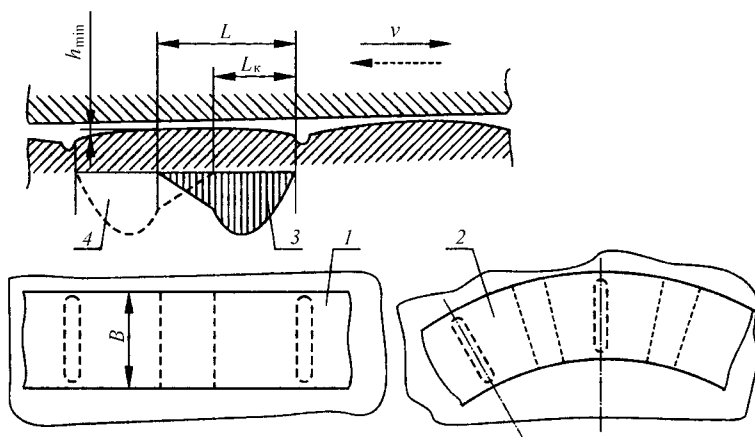


Рис. 2.8. Гидродинамические направляющие
(на разрезе показан профиль масляных канавок):

1 – прямолинейного движения; 2 – кругового движения;
3, 4 – соответственно эшоры давлений при прямом и обратном ходе

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

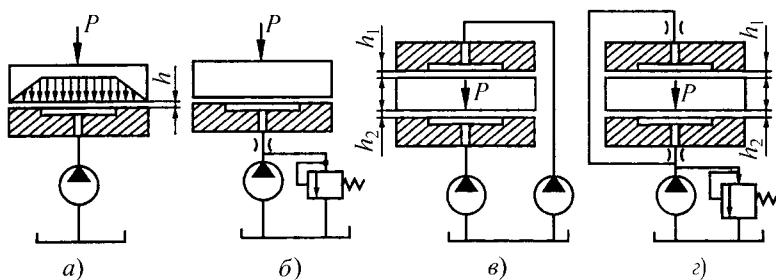


Рис. 2.9. Схемы гидростатических направляющих:

а, б – открытых; в, г – замкнутых

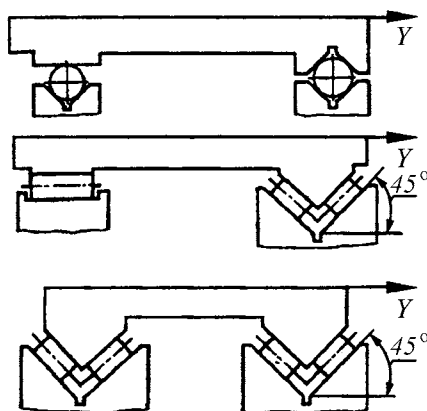


Рис. 2.10. Схемы форм направляющих качения

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 перемещаемого узла в заданной позиции.

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 рис. 2.10.

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.

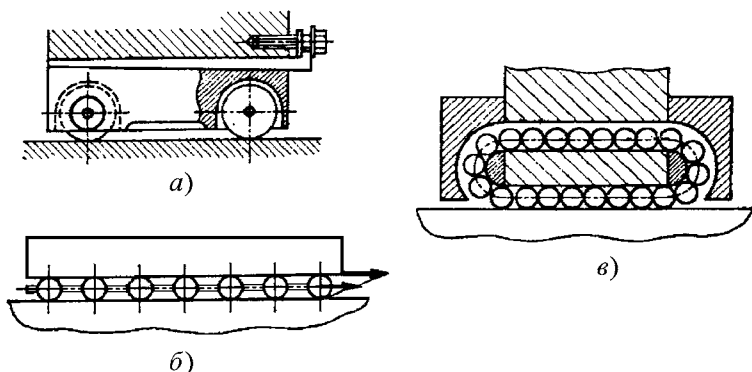


Рис. 2.11. Основные схемы направляющих качения:

а – на роликах с закрепленными осями; *б* – с потоком тел качения;
в – с возвратом тел качения

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).

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 рис. 2.12.

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 .

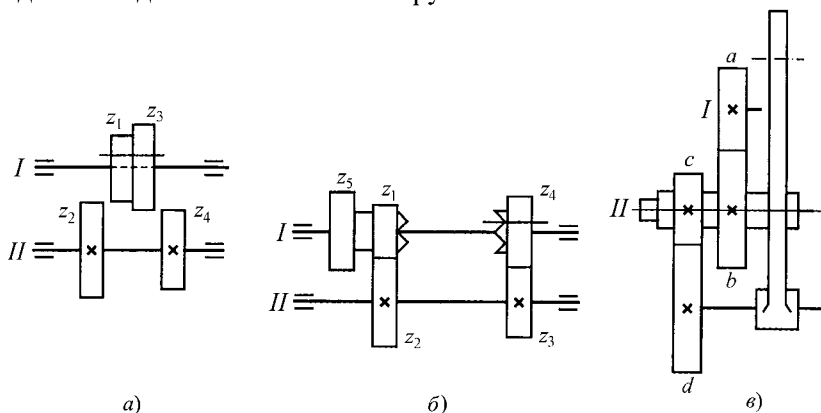


Рис. 2.12. Варианты переключения скоростей в шестеренчатых коробках:

a – передвигными (скользящими) колесами; *б* – кулачковыми, фрикционными и электромагнитными муфтами; *в* – сменными зубчатыми колесами

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
2. 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, потери времени на наладку

Сравнительные характеристики вариантов переключения приведены в табл. 2.5.

Схема привода главного движения представлена на рис. 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

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

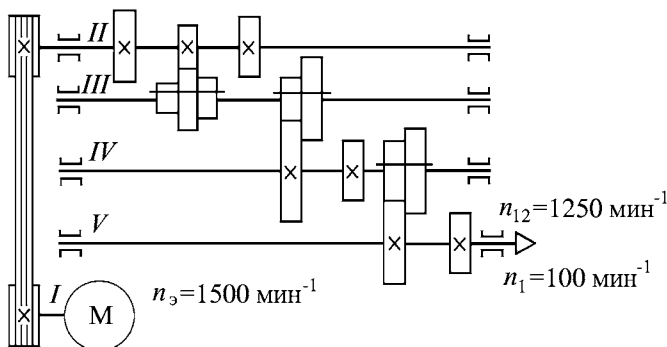


Рис. 2.13. Схема привода главного движения

Важной характеристикой привода является диапазон регулирования, определяемый по формулам:

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

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:

$$n_1 = n_{\min}; \quad n_2 = n_1 i; \quad n_3 = n_2 i = n_1 i^2;$$

$$n_4 = n_3 i = n_1 i^3 \dots n_z = n_{z-1} i = n_1 i^{z-1}.$$

Значения i стандартизованы. За минимальное значение принято $i_{\min} = n_{z-1} = 1,06$.

Другие значения знаменателей прогрессии являются производными от возведения $i_{\min}$ в какую-либо степень. Такой подход при проектировании ступенчатых приводов удобен тем, что удов-

летворяет принципам "удесятерения" 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, беззачерпные кинематические передачи, передачи винт-гайка качения. Для обеспечения точности формообразующих движений используются системы обратной связи.

В табл. 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 *а*. В этом случае возможна погрешность действительного положения рабочего органа (РО) из-за погрешностей отработки шаговых двигателей, гидроусилителей или передаточных механизмов привода.

Замкнутые приводы подач обеспечивают контроль перемещения рабочего органа. Применяются различные варианты контроля. Так, в схеме *б* 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.

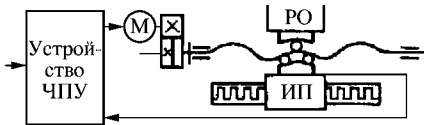
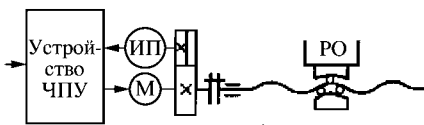
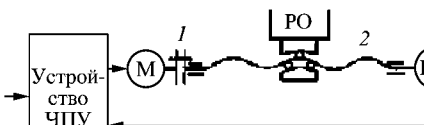
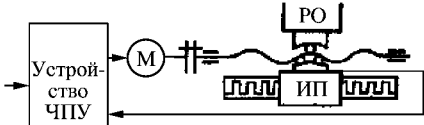
В приводе по схеме *в* производится косвенное измерение перемещения рабочего органа с помощью кругового измерительного преобразователя, присоединенного непосредственно к ходовому винту. По данному варианту требуется высокая точность изготовления пары винт-гайка.

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.

2.6. Основные варианты кинематических схем приводов подач станков с ЧПУ

Тип привода	Кинематическая схема	Тип датчика обратной связи
Редукторный	а)	Нет
	б)	Круговой, соединен с валом электродвигателя
	в)	Круговой, соединен с ходовым винтом
	г)	Круговой, соединен с рабочим органом

Продолжение табл. 2.6

Тип привода	Кинематическая схема	Тип датчика обратной связи
Редукторный	 д)	Линейный, соединен с рабочим органом
	 е)	Круговой, соединен с валом электродвигателя
Безредукторный	 ж)	Круговой, соединен с ходовым винтом
	 з)	Линейный, соединен с рабочим органом

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 под-

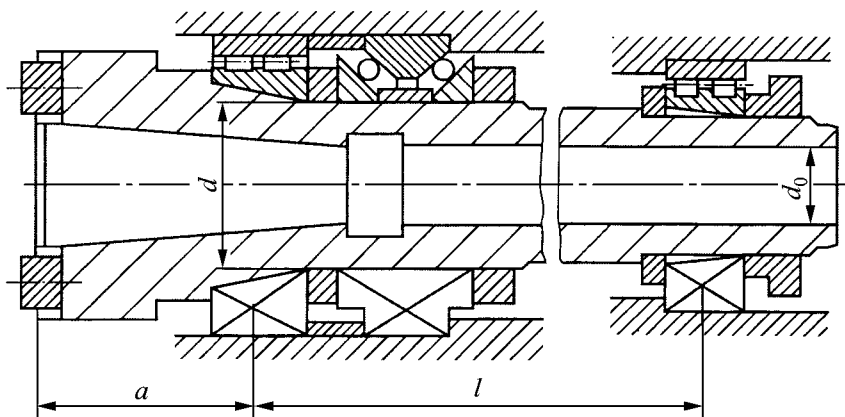


Рис. 2.14. Шпиндельный узел на опорах качения

шпинники должны иметь высокую твердость ≥ 60 HRC и высокую износостойкость. Конструктивное оформление шпиндельных узлов разнообразно, так как их компоновка связана с конструкцией 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 многошпиндельных 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. От шпинделя требуется высокая точность, подшипники качения должны быть высоких классов точности. На рис. 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.

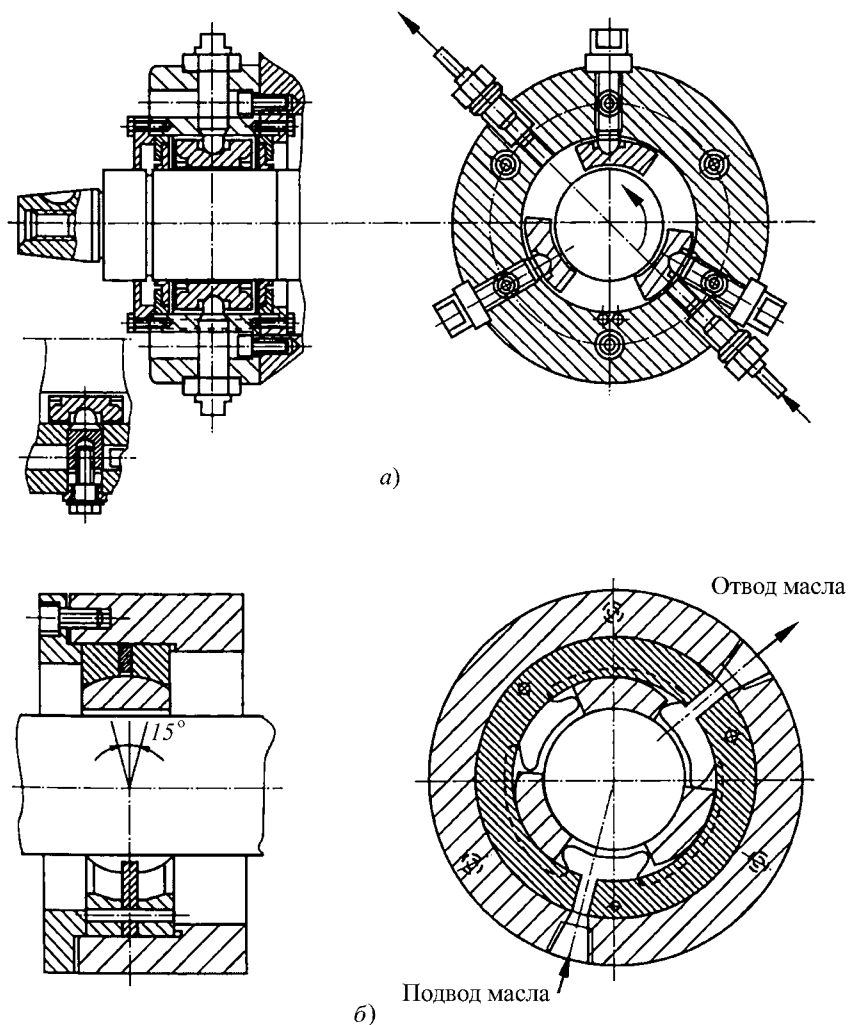


Рис. 2.15. Конструкция гидродинамического подшипника скольжения:

а – с поворотом опорных башмаков на сферических опорах;

б – с поворотом относительно втулки опорных башмаков

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.

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. 2.16, *а*) и радиальные (рис. 2.16, *б*). Принцип действия их 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 высоких скоростях скольжения область применения подшипников с жидкостным трением снижается, так как в смазочном слое возрастают тепловыделение и 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.

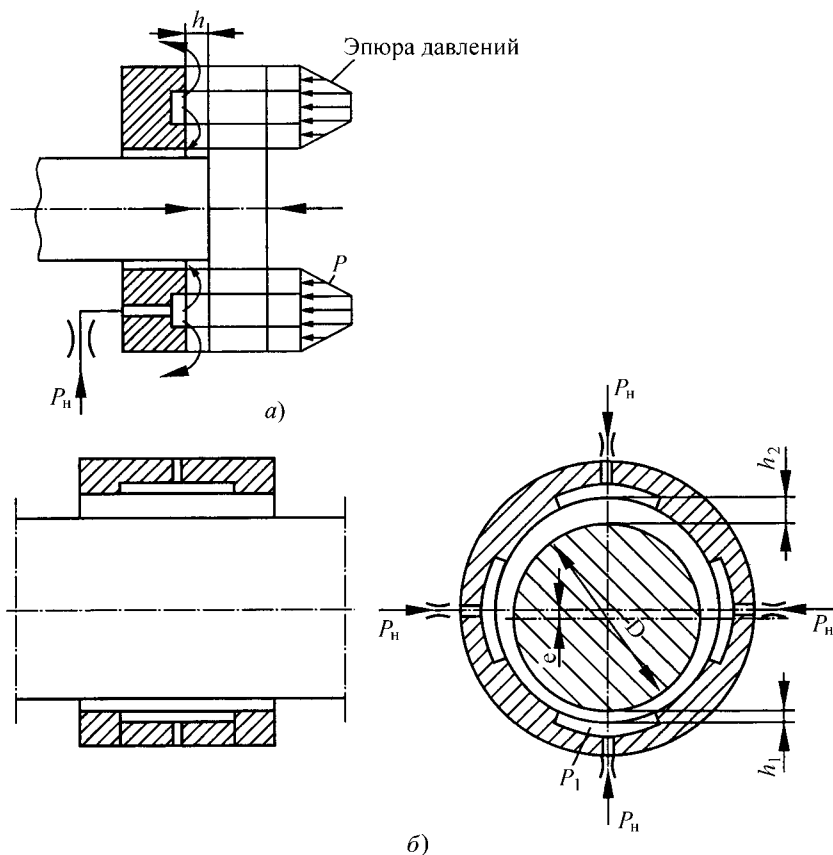


Рис. 2.16. Конструкция гидростатического подшипника:

а – осевая опора; *б* – радиальная опора; P_1 – давление в полости подшипника; P_H – давление гидросистемы

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.

2.7. Точностные характеристики и скоростные параметры подшипниковых опор

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

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

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

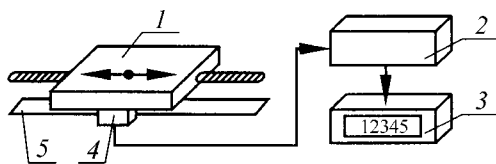


Рис. 2.17. Схема устройства цифровой индикации:

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

способом повышения эффективности ручного управления является применение устройств цифровой индикации и управления. Схема такого устройства приведена на рис. 2.17.

При перемещении рабочего органа *1* станка (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:

- 1) управление траекторией движения исполнительных органов при использовании простых движений в качестве внутреннего источника информации о положении узла станка;

- 2) программирование и контроль перемещения рабочих органов станка;

- 3) задание и обработка исходных (основных и промежуточных) положений рабочих органов станка;

- 4) получение информации, корректирующей по каким-либо параметрам исходную информацию управления;

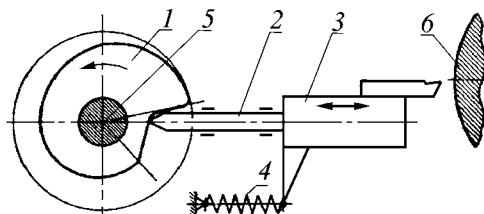


Рис. 2.18. Управление с кулачковым приводом:

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

5) задание цикловых команд (оптимальной скорости перемещения, направления и последовательности движений, выполнения стандартных самостоятельных циклов).

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

- 1) кулачковые системы с распределительным валом;
- 2) копировальные системы;
- 3) цикловые системы программного управления;
- 4) системы числового программного управления.

В *кулачковых системах управления* (рис. 2.18) в качестве программоносителя 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, так как отсутствует информация о фактическом местонахождении исполнительных органов.

За один оборот распределительного вала совершается полный цикл обработки. Изменяя профиль кулачков, можно получить лю-

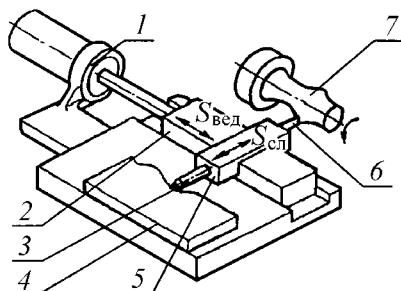


Рис. 2.19. Копировальная система управления:

1 – гидроцилиндр; 2 – продольная каретка; 3 – шуп; 4 – копир;
5 – поперечная каретка; 6 – резец; 7 – обрабатываемая заготовка

бой 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 крестовой суппорт (при токарной обработке) или крестовый стол (при фрезерной обработке), обеспечивающие продольную подачу синхронно с поперечной, получаемой от копира, являющегося программноносителем.

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/выключения отдельных устройств станка (цикловые команды) и указания о вели-

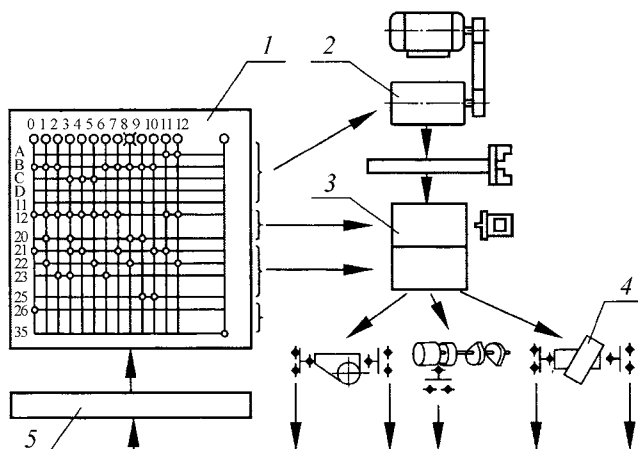


Рис. 2.20. Структурная схема цикловой системы управления:

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

чине подачи, скорости резания и т.д. (технологические команды). Структурная схема цикловой системы управления приведена на рис. 2.20.

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 сис-

темы 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.

1. *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.

2. *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.

3. *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.

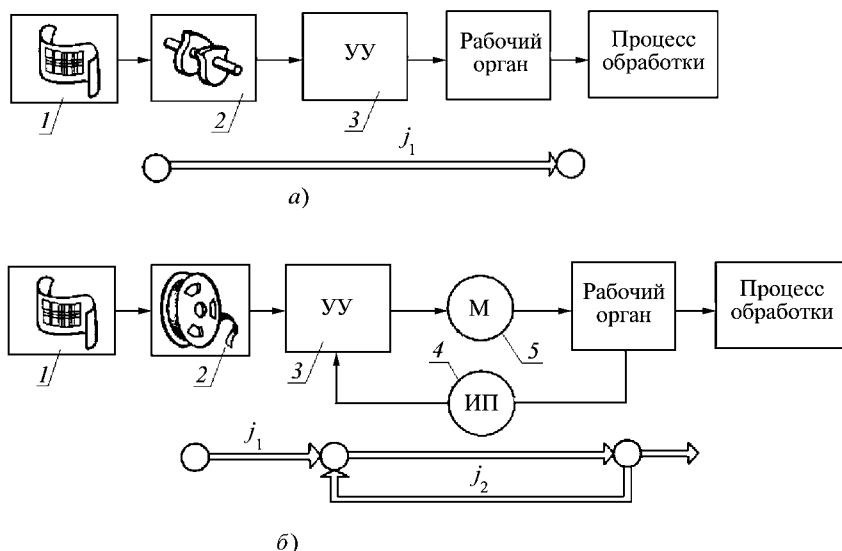


Рис. 2.21. Структурные схемы систем ЧПУ:

1 – расчетно-технологическая карта; 2 – управляющая технологическая программа; 3 – устройство управления; 4 – измерительный преобразователь; 5 – источник движения; j_1 и j_2 – передаточные отношения прямой и обратной связей

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

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

В *замкнутых системах ЧПУ* (рис. 2.21, б) существуют два потока информации: один из считывающего устройства, устройства управления 3 до рабочего органа, другой от датчика обратной связи, расположенного на рабочем органе, в устройство управления 3 для коррекции начальной информации.

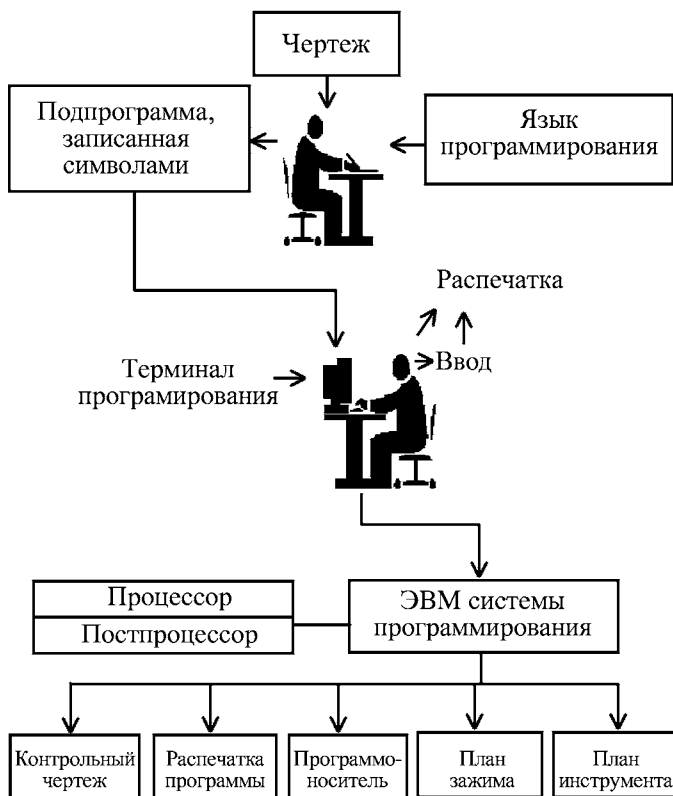


Рис. 2.22. Последовательность автоматизированной разработки управляющих программ для станков с ЧПУ

В сравнивающем 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 рис. 2.22 приведена последовательность разработки управляющей программы автоматизированным методом.

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 тел 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 рис. 2.23 [9].

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

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 разжи-

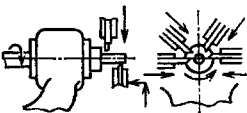
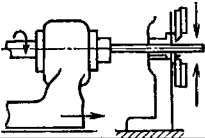
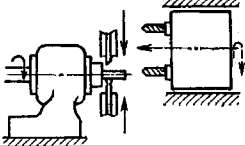
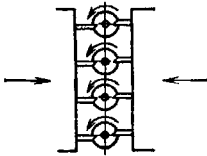
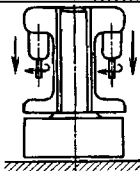
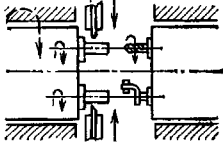
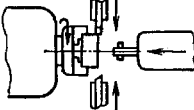
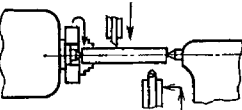
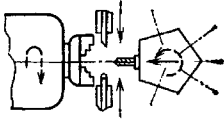
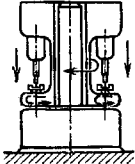
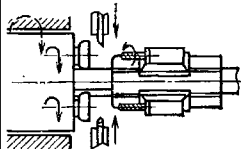
Тип станка		Вид работы		
		Фасонно-отрезные	Продольно-фасонные	Последовательные револьверные
Автоматы	Одношпиндельные			
	Многошпиндельные			
Полуавтоматы	Одношпиндельные	Многорезцовые  		
	Многошпиндельные			

Рис. 2.23. Пример классификации токарных полуавтоматов и автоматов

мается 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.

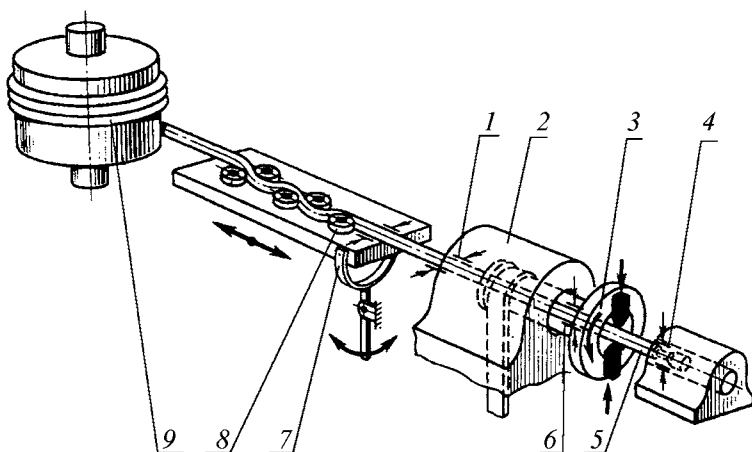


Рис. 2.24. Схема работы фасонно-отрезного автомата:

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

На автоматах **продольного точения** обрабатываются детали, имеющие соотношение длины к наружному диаметру $l/d > 3$. 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 рис. 2.25.

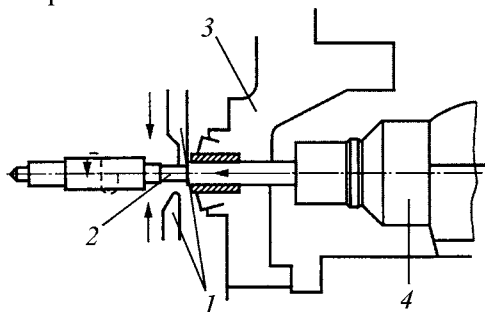


Рис. 2.25. Схема работы автомата продольного точения:

1 – резцы; 2 – пруток; 3 – лонет; 4 – шпиндельная бабка

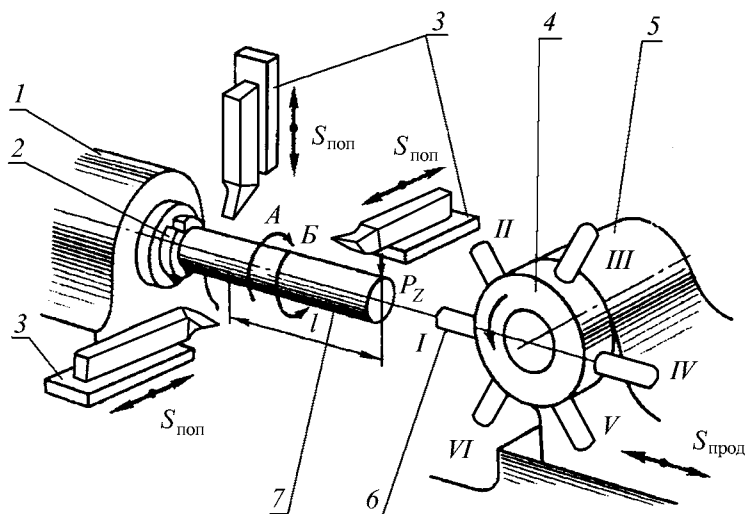


Рис. 2.26. Схема работы токарно-револьверного автомата:

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

Резцы 1 (рис. 2.25) устанавливаются в поперечных суппортах, имеющих только поперечную подачу. Продольная подача реализуется за счет выдвигания 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 $l/d < 3$. Схема работы такого автомата приведена на рис. 2.26.

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. *1...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 рис. 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 устанавли-

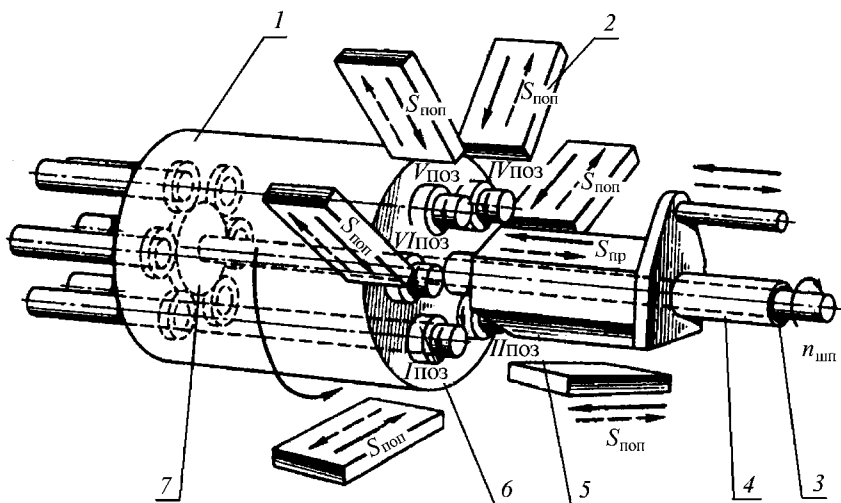


Рис. 2.27. Схема работы многошпиндельного пруткового автомата:

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

ливаться инструментальные шпиндели с независимым приводом вращения.

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.

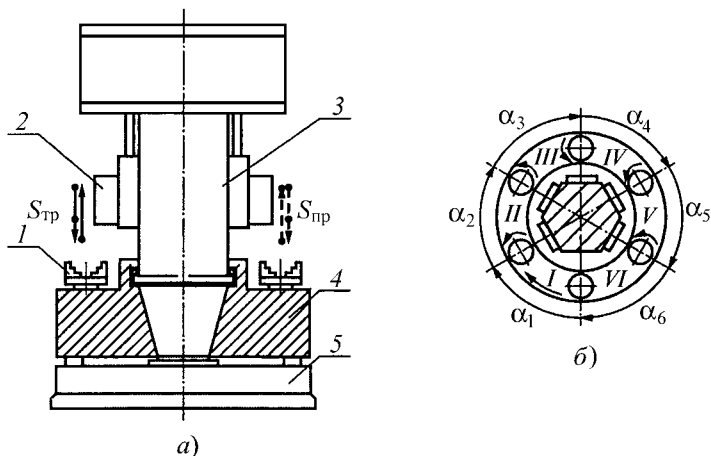


Рис. 2.28. Схема работы полуавтомата последовательного действия (а) и положение съема готовой детали установки новой заготовки (б):

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

На **многошпиндельных патронных полуавтоматах** обрабатываются детали из штучных заготовок. Автоматы выпускаются с горизонтальным и вертикальным расположением шести или восьми шпинделей. Конструкция и характер работы горизонтальных патронных полуавтоматов аналогичны многошпиндельным прутковым автоматам. Значительно отличается только конструкция блока шпинделей. Это объясняется тем, что при обработке в патроне съём обработанных деталей и установка новой заготовки производится 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 рис. 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 α_i 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. 1 рис. 2.28, б) шпиндель не вращается. Здесь производится съем 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.

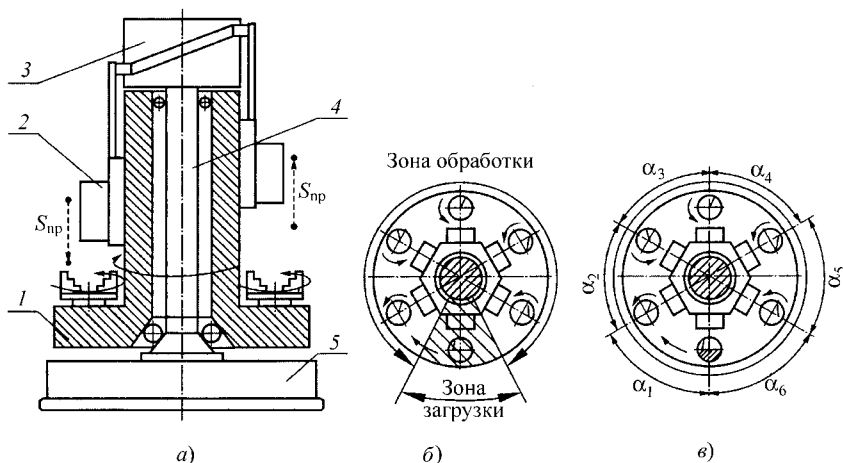


Рис. 2.29. Схема работы полуавтомата параллельного действия (а), с непрерывным вращением карусели (б) и периодическим вращением карусели (в):

1 – карусель; 2 – суппорт; 3 – кулачки; 4 – колонна; 5 – основание

В полуавтоматах параллельного действия 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 рис. 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.

Одношпиндельные токарные горизонтальные полуавтоматы применяются в основном для обработки валов. В зависимости от принципа организации работы и управления их можно раз-

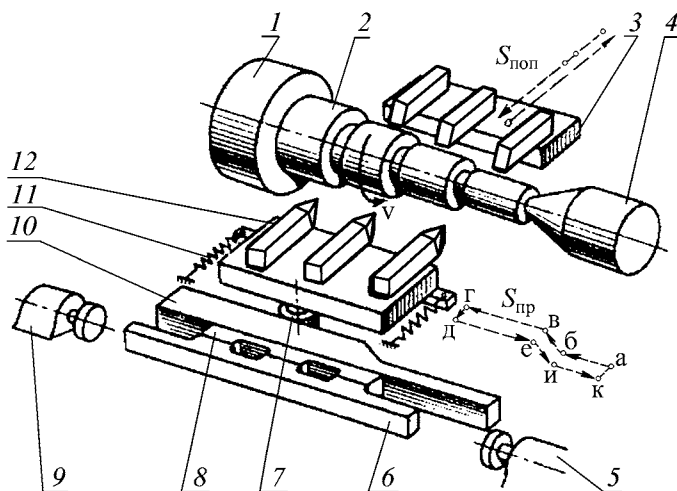


Рис. 2.30. Схема работы многолезцового полуавтомата:

- 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

бить на три группы: многолезцовые, копировальные и многолезцово-копировальные.

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

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 обра-

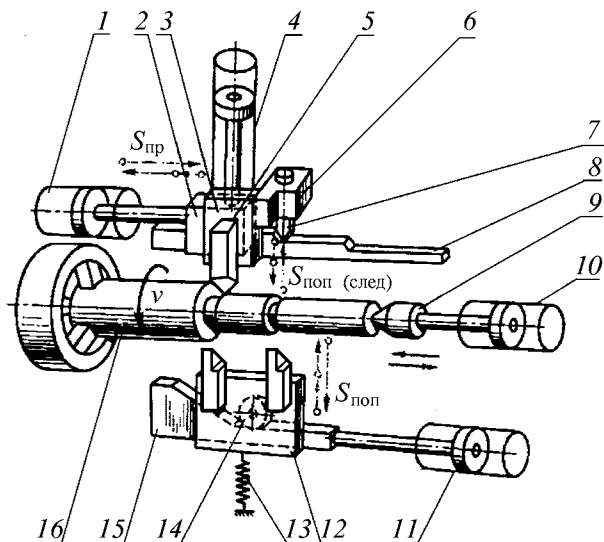


Рис. 2.31. Схема работы копировального полуавтомата:

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

ботка 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 получает 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 многорезцовых, основной профиль заготовки обрабатывается одним резцом. Схема работы полуавтомата приведена на рис. 2.31.

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 рис. 2.32. При обработке фасонной части остальные резцы в работе не участвуют. Доделочные операции выполняются с поперечного суппорта.

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 12500 мм при длине заготовки от 125 до 10000 мм. Наибольшее распространение получили токарно-винторезные станки, предназначенные для выполнения самых разнообразных операций: обработка наружных и внутренних цилиндрических, конических, фа-

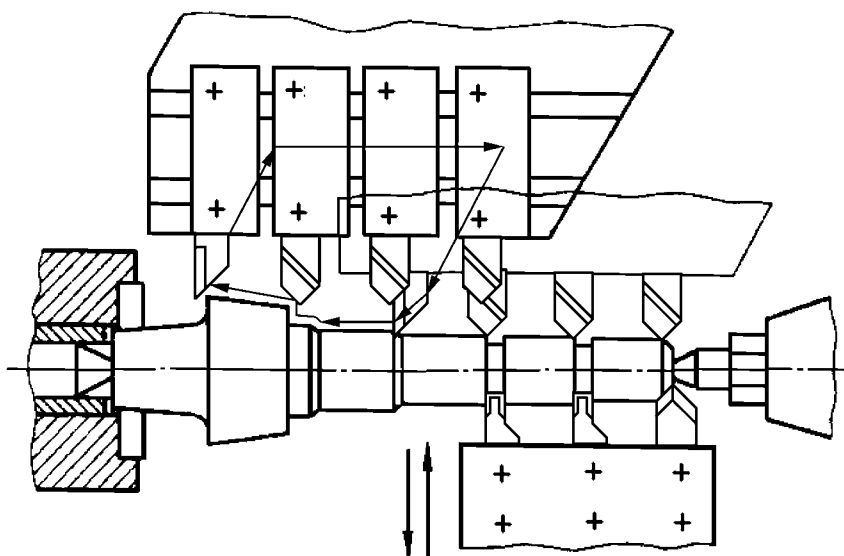


Рис. 2.32. Схема обработки заготовки блоком резцов

сонных 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 рис. 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.

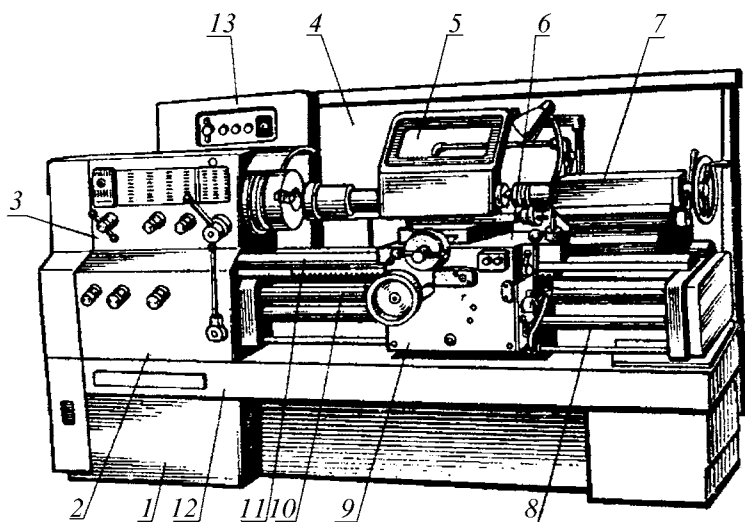


Рис. 2.33. Общий вид токарно-винторезного станка:

- 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 11 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 производится 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.

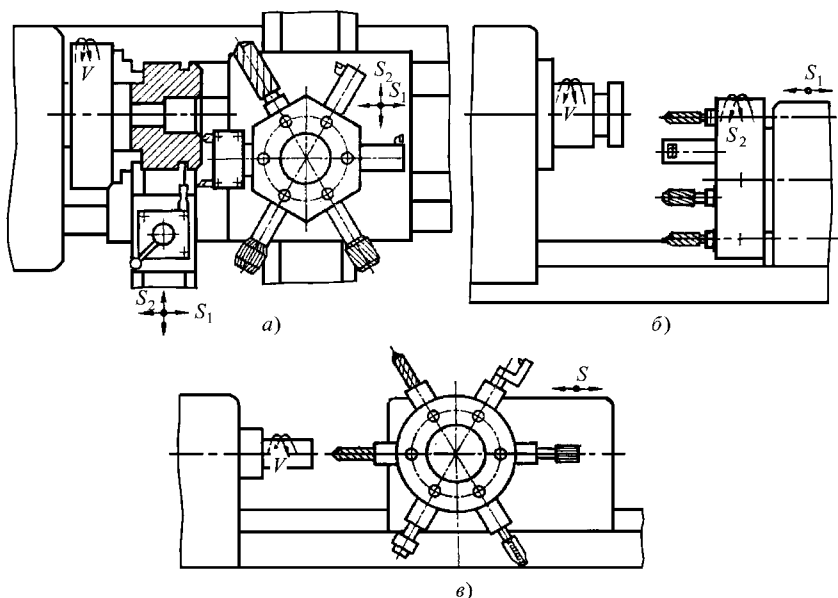


Рис. 2.34. Типы револьверных головок

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 показаны на рис. 2.34.

Призматические головки (рис. 2.34, а) 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. 2.34, в).

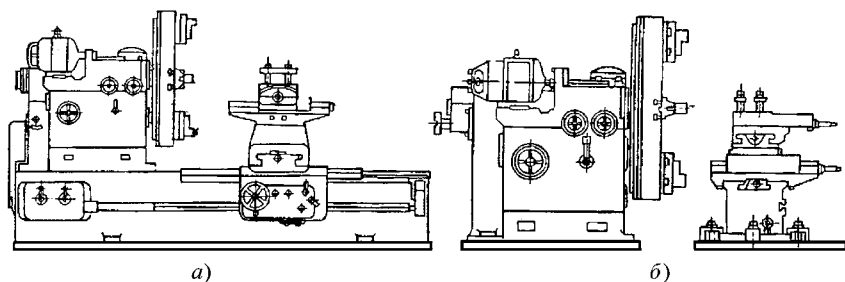


Рис. 2.35. Токарно-лобовые станки

Главным движением в токарно-револьверных станках является вращение заготовки, движениями подачи – 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 рис. 2.35 приведены общие виды лобовых станков с суппортом, установленным на одной станине со шпиндельной бабкой (рис. 2.35, а), и с суппортом, установленным отдельно от шпиндельной бабки (рис. 2.35, б). Последние предназначены для обработки особо крупных деталей, превышающих диаметр планшайбы.

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

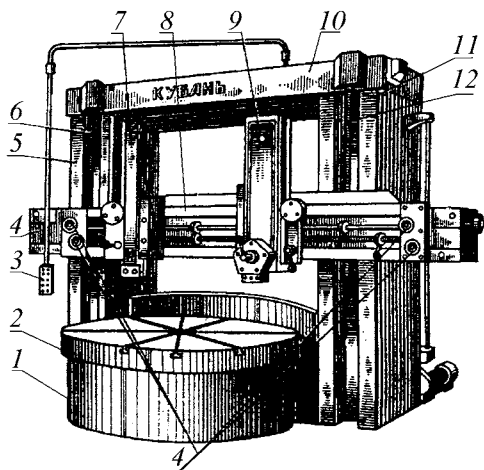


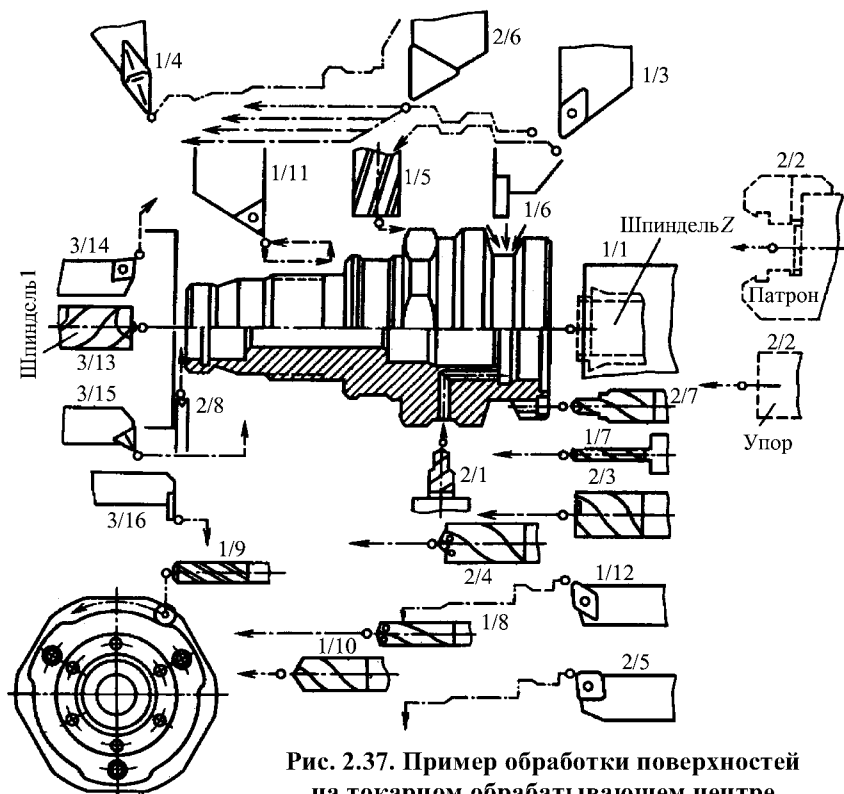
Рис. 2.36. Двухстоечный токарно-карусельный станок:

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

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 рис. 2.36.

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

В последнее 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 рис. 2.37 приведен пример обработки сложной многоэлементной детали на токарном обрабатывающем центре модели TNS-65 фирмы "Traub" (Германия).

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 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, перемещающейся по вертикальным направляющим станины. На столе в приспособлении закрепляется обрабатываемая заготовка.

Варианты компоновок консольно-фрезерных станков приведены на рис. 2.38.

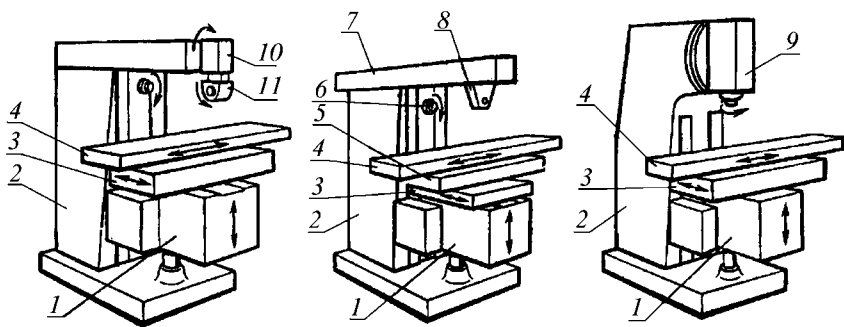


Рис. 2.38. Варианты компоновки консольно-фрезерных станков:

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. 2.38, *а*) 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, поворачиваемым на любой угол в горизонтальной плоскости. На станине горизонтального станка (рис. 2.38, *б*) 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. 2.38, *в*) 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 рис. 2.39 приведен общий вид бесконсольного фрезерного станка.

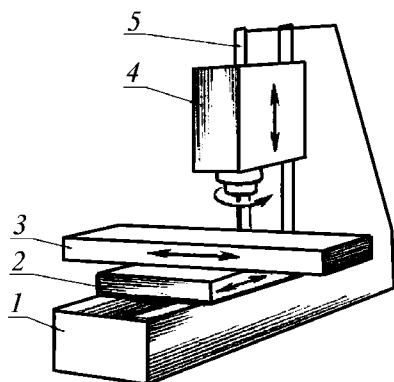


Рис. 2.39. Бесконсольный фрезерный станок:

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

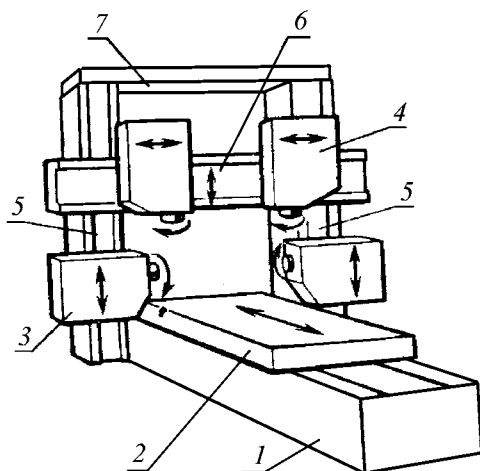


Рис. 2.40. Компоновка продольно-фрезерного станка:
1 – станина; 2 – стол; 3 – горизонтальная шпиндельная головка; 4 – вертикальная шпиндельная головка; 5 – стойка; 6 – поперечина (траверса); 7 – перемычка

Для обработки крупногабаритных деталей применяются **продольно-фрезерные станки** (одностоечные и двухстоечные). Общий вид двухстоечного продольно-фрезерного станка приведен на рис. 2.40.

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

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.

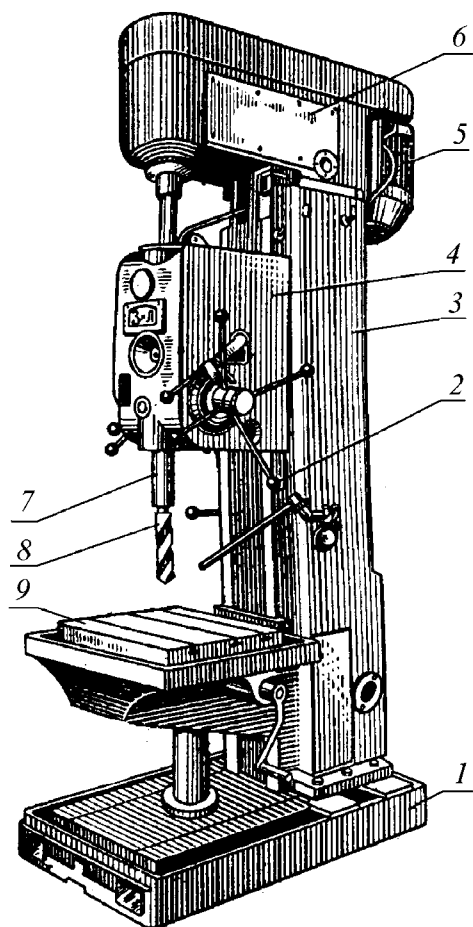


Рис. 2.41. Общий вид вертикально-сверлильного станка 2Н118:

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

Для обработки деталей газотурбинных двигателей (ГТД) 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 многошпиндельные 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-сверлильные и радиально-сверлильные – для диаметров 18, 25, 35, 50 и 75 мм.

Наиболее распространенными являются *вертикально-сверлильные станки*. Общий вид станка приведен на рис. 2.41. 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.

Радиально-сверлильные 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 рис. 2.42.

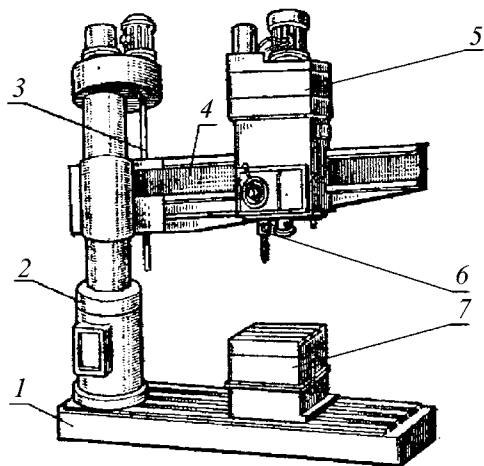


Рис. 2.42. Общий вид радиально-сверлильного станка:

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

Обрабатываемые детали 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 переус-

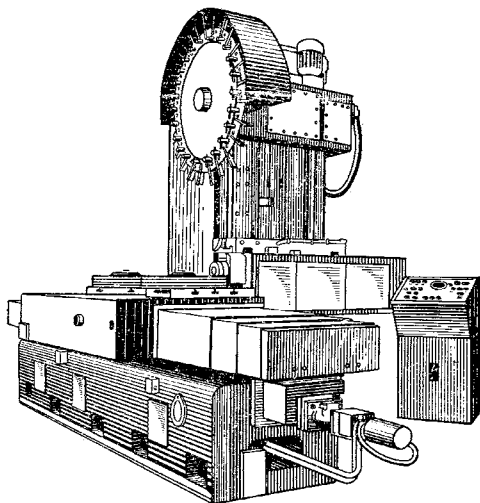


Рис. 2.43. Общий вид многоцелевого станка

тановки их на другие станки, что особенно важно при обработке крупных деталей авиадвигателей.

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 управле-

ния 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 рис. 2.43.

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

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. При обработке деталей авиадвигателей 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 тел вращения. Отдельные модели станков позволяют выполнить и внутреннее шлифование отверстий. Для этого они имеют специальный шпиндель. Общий вид круглошлифовального станка приведен на рис. 2.44.

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

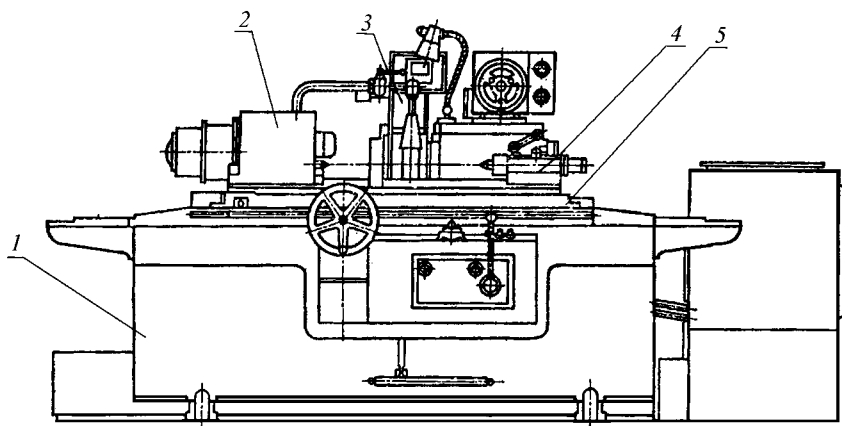


Рис. 2.44. Круглошлифовальный станок:

1 – станина; 2 – передняя бабка; 3 – шлифовальная бабка;
4 – задняя бабка; 5 – рабочий стол

ней 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°). 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.

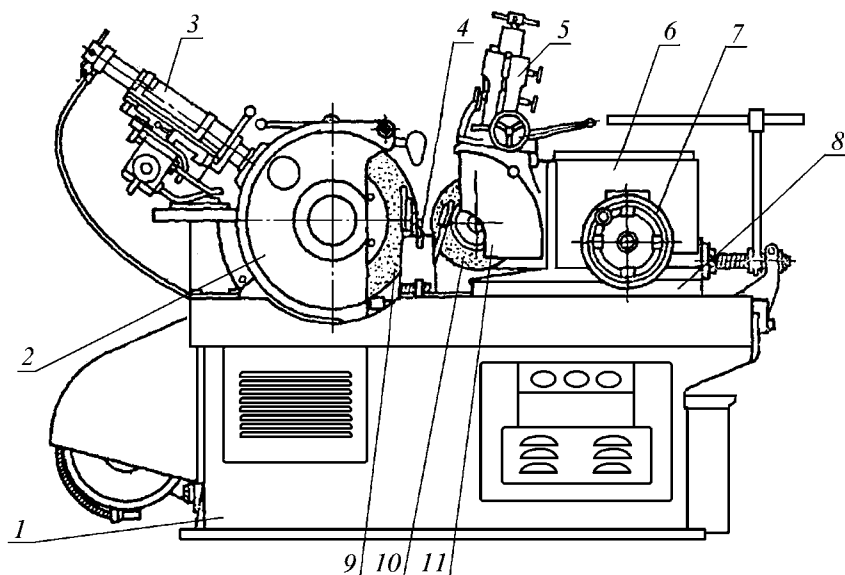


Рис. 2.45. Общий вид бесцентрового шлифовального станка:

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

Бесцентровые шлифовальные станки (рис. 2.45) применяются при обработке наружных и внутренних поверхностей деталей, не имеющих центровых отверстий, в условиях крупносерийного и массового производства.

На этих станках обрабатываемая деталь 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 деталью больше из-за малой скорости вращения круга, чем между деталью и шлифующим кругом, то ведущий круг вращает деталь со скоростью круговой подачи, а шлифующий круг снимает при-

пуск. 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 ГТД наибольшее распространение получили обычные станки, на которых деталям, закрепленным в патроне, сообщается вращательное движение (рис. 2.46).

На станине 1 монтируются основные узлы станка: стол 7 со шлифовальной бабкой 5 и мост 2 с бабкой изделия 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 детали. 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.

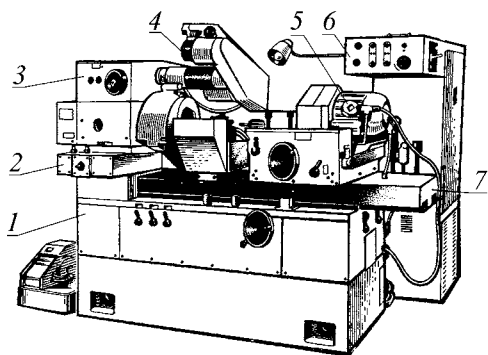


Рис. 2.46. Внутришлифовальный станок:

1 – станина; 2 – мост; 3 – бабка изделия; 4 – торцешлифовальное приспособление; 5 – шлифовальная бабка; 6 – пульт управления; 7 – стол

Планетарные станки применяются, в основном, в инструментальном производстве.

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

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

2. *С прямоугольным столом и вертикальным шпинделем.* Станки имеют повышенную жесткость, оснащены шлифовальными кругами больших размеров и электродвигателями большой мощности, обеспечивают более высокую производительность и достаточно высокую точность обработки. Применяются в серийном и крупносерийном производстве.

3. *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.

4. *С вертикальным шпинделем и круглым столом непрерывного действия.* На этих станках обработка деталей 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 рис. 2.47.

Общий вид плоскошлифовального станка с горизонтальным шпинделем и прямоугольным столом приведен на рис. 2.48. 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).

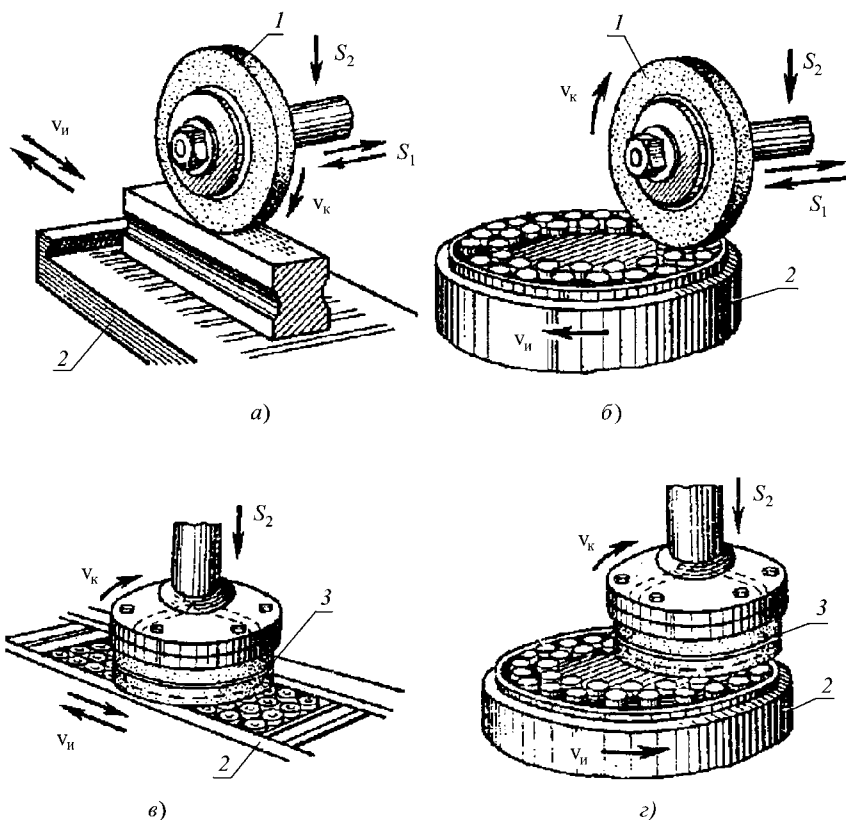


Рис. 2.47. Схемы работы плоскошлифовальных станков:

а – обработка периферией круга деталей на крестовом столе;
б – обработка периферией 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

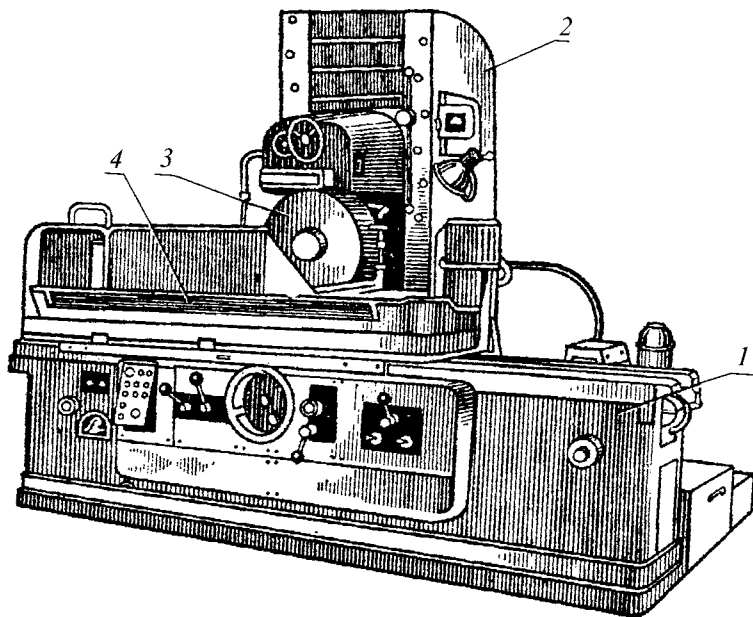


Рис. 2.48. Общий вид плоскошлифовального станка:

1 – станина; 2 – колонна; 3 – шлифовальный круг; 4 – рабочий стол

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

В последние годы при обработке деталей ГТД 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, регули-

рование частоты вращения шпинделя, наличие системы поддержания постоянной скорости круга по мере его изнашивания, наличие системы автоматической балансировки круга во время работы.

На рис. 2.49 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. В направляющих для линейного перемещения применяются фторопластовые ленты с низким коэффициентом трения, что в сочетании с винтовыми парами качения позволяет достигнуть высокой точности обрабатываемых деталей.

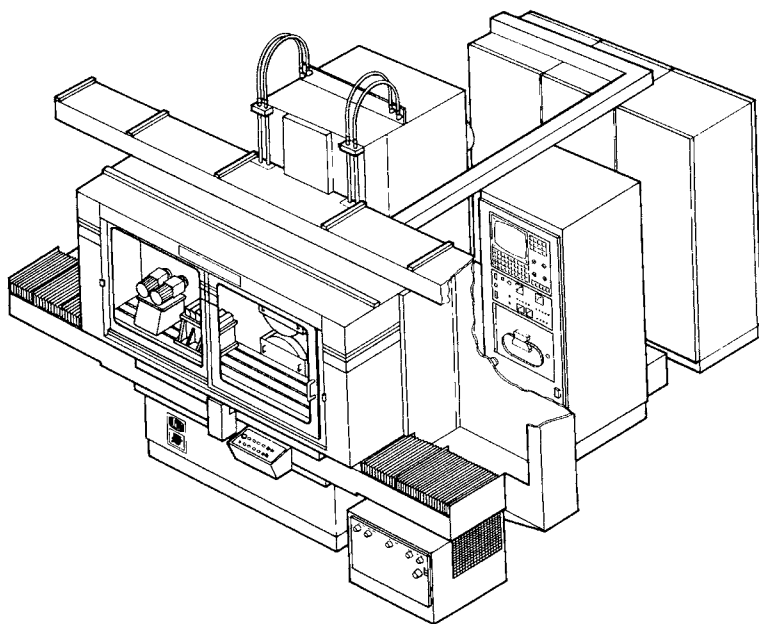


Рис. 2.49. Специальный станок для двустороннего глубинного шлифования елочных замков турбинных лопаток

2.5.5. Зубообрабатывающие станки

Наличие в авиационных двигателях большого количества деталей с зубчатым зацеплением приводит к широкому применению зубообрабатывающих станков. Детали отличаются высокой точностью, которую можно обеспечить в основном на оборудовании, работающем по методу обкатки.

Наиболее производительными являются **зубофрезерные станки**, обработка на которых производится червячными фрезами. Эти станки имеют типовую структуру и компоновку. На рис. 2.50 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.

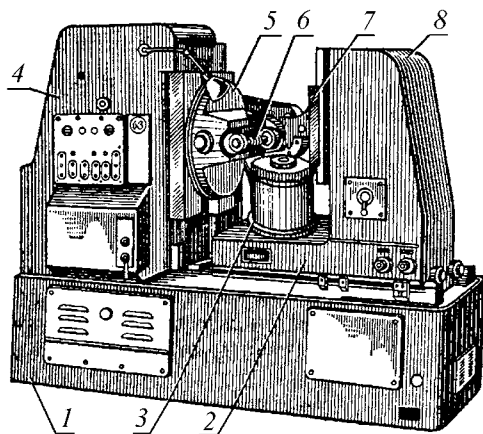


Рис. 2.50. Зубофрезерный станок мод. 5M324А

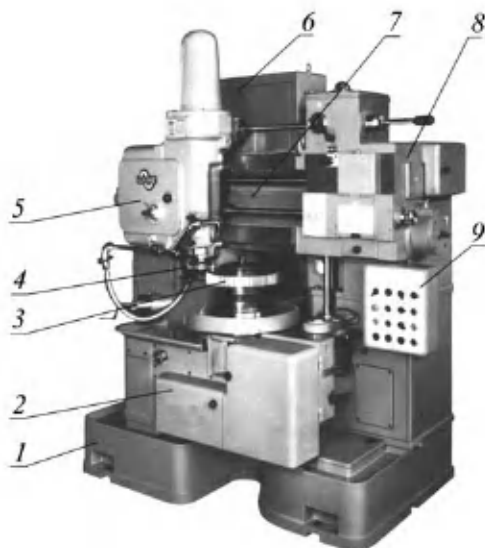


Рис. 2.51. Зубодолбежный станок мод. 5B150:

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

Внутренние зубчатые зацепления, а также малые венцы блочных колес нарезаются на **зубодолбежных станках**. Схема зубодолбежного станка мод. 5B150 приведена на рис. 2.51. На станке можно нарезать прямозубные и косозубные 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 автомати-

ческому 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.

Нарезание конических колес производится на **зубострогальных станках** (прямозубые) и на специальных **зуборезных полуавтоматах** (с круговым зубом). Станки работают по методу обката. Общий вид зубострогального станка приведен на рис. 2.52.

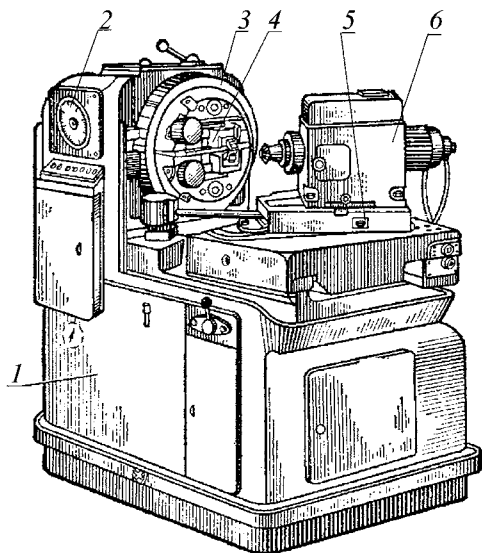


Рис. 2.52. Зубострогальный полуавтомат мод. 5Т23В:

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

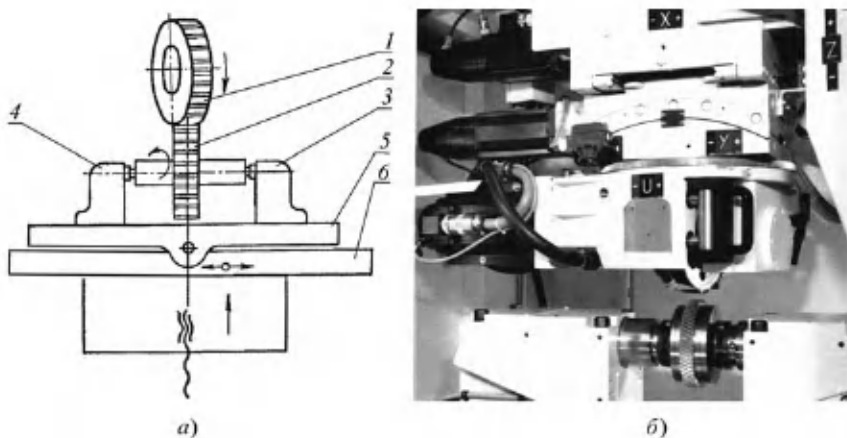


Рис. 2.53. Зубошевинговальный станок:

а – схема работы; *б* – общий вид станка; 1 – шевер; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – правая бабка; 4 – левая бабка; 5 – стол верхний; 6 – стол нижний

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.

Чистовая обработка поверхностей зубьев производится на **шевинговальных** или **зубошлифовальных** станках. Схема работы зубошевинговального станка приведена на рис. 2.53. Шевер 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 шевера и колеса, возвратно-поступательное перемещение колеса и перемещение колеса в радиальном направлении к шевору.

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 широко применяются для обработки деталей авиадвигателей. По характеру работы они 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 рис. 2.54.

В полую часть 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

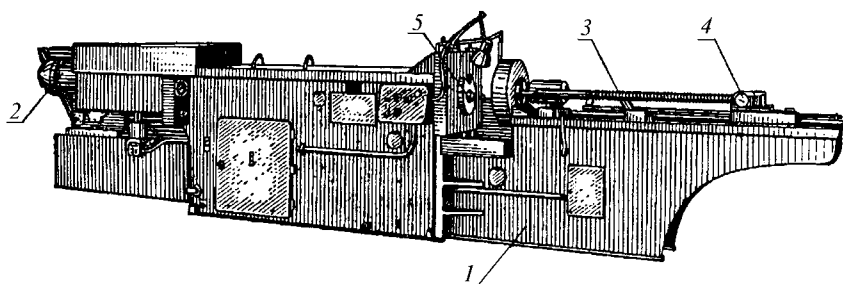


Рис. 2.54. Горизонтально-протяжной станок мод. 7Б55

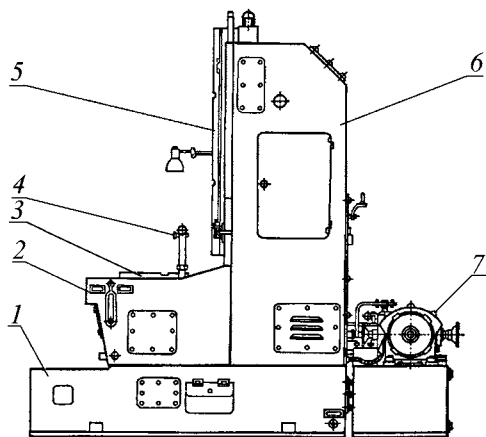


Рис. 2.55. Вертикальный протяжной станок:

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

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 обрабатывающих зубьев, замедленный рабочий ход для калибрующих зубьев и останов. 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 ГТД (например, пазы дисков турбин и компрессоров) и для внутреннего протягивания.

На рис. 2.55 приведен общий вид вертикального протяжного станка для *внутреннего протягивания*.

На основании 1 установлена тумба 2, на которой смонтирован стол 3. На столе в приспособлениях устанавливают и закрепляют

детали. Протяжки при помощи инструментальных плит закрепляют 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 индексируемый стол.

Глава 3

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 двигателей, имеющих разнообразную форму и наружные поверхности тел вращения:

- тела вращения типа валов, дисков, штоков и др.;
- тела вращения с аэродинамическим профилем типа лопаток компрессора с цапфами;
- тела вращения и не вращения 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 рис. 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 (около 70 %). Черновое точение обеспечивает получение точности 12...14 квалитета и параметр шероховатости $Ra = 6,3 \dots 50$ мкм.

Получистовое точение обеспечивает съём 20...25 % припуска и получение формы близкой к детали. Точность обработки 11...13 квалитет, шероховатость $Ra = 1,6 \dots 25$ мкм.

Чистовое точение обеспечивает получение окончательной формы и размеров детали. Точность 8...10 квалитет, параметр шероховатости $Ra = 0,4 \dots 6,3$ мкм.

Тонкое точение выполняется при снятии очень тонких стружек и обеспечивает точность 6...8 квалитета и параметр шероховатости $Ra = 0,2...1,6$ 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 рис. 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 пиноли задней бабки станка.

Устройство (см. 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 (см. 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 (см. рис. 3.2) подводят упоры 4 до соприкосно-

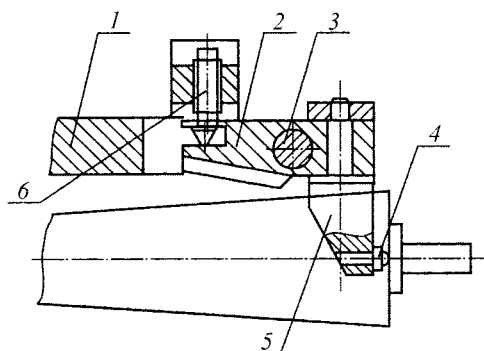


Рис. 3.2. Устройство для установки и растяжения лопатки при обработке цапфы:

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

вения 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.

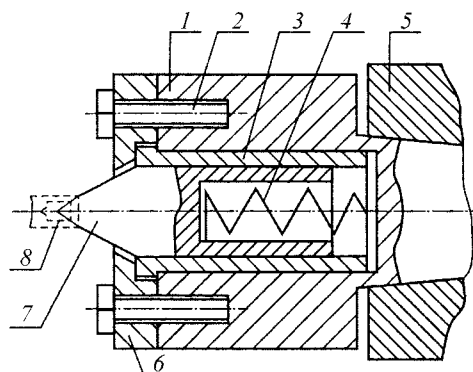


Рис. 3.3. Подпружиненный центр:

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

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 усилие 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°.

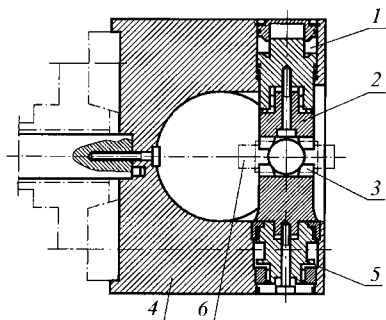


Рис. 3.4. Поворотный патрон

В корпусе патрона 4 размещены механизмы поворота и зажима детали. 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, снабжен-

ного 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. Такие поворотные патроны с малыми размерами рабочих цилиндров обладают достаточно высоким быстродействием: зажим детали производится за 0,5...1 с, а ее поворот на 90° – 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.

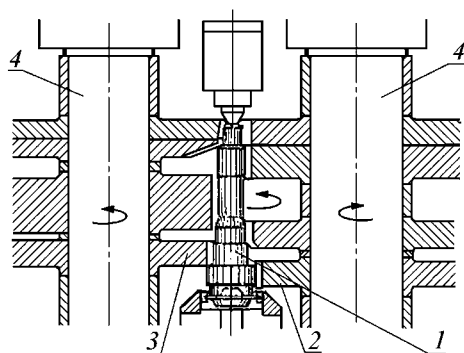


Рис. 3.5. Ротационное фрезерование:

1 – обрабатываемая заготовка; 2, 3 – фрезы; 4 – шпиндели

Точность обработки при контурном ротационном фрезеровании наружных поверхностей вращения соответствует 9...10 качеству, а параметр шероховатости $Ra = 5...8$ 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 рис. 3.6, а, б показаны схемы наружного протягивания поверхностей вращения.

Наружное протягивание обеспечивает точность 7...8 квалитетов и параметр шероховатости $Ra = 0,2...6,3$ мкм.

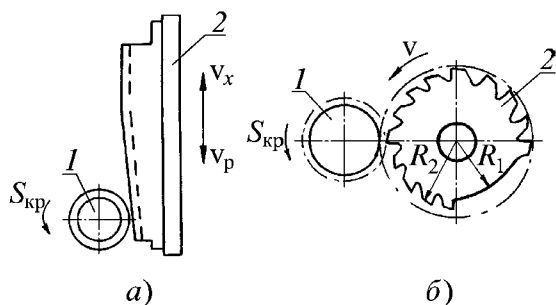


Рис. 3.6. Схема наружного протягивания поверхностей вращения плоской (а) и дисковой (б) протяжками:

1 – обрабатываемая деталь; 2 – протяжка

3.4. ШЛИФОВАНИЕ НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

3.4.1. Обработка шлифовальными кругами

Для обработки наружных поверхностей тел вращения наиболее распространенным 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 рис. 3.7.

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

При шлифовании **методом продольной подачи** (рис. 3.8, а) заготовка вращается равномерно и совершает возвратно-поступательное движение. В конце хода заготовки шлифовальный круг перемещается на величину подачи S_n , и при следующем ходе снимается слой металла определенной глубины. Процесс шлифования продолжается до достижения необходимого размера заготовки.

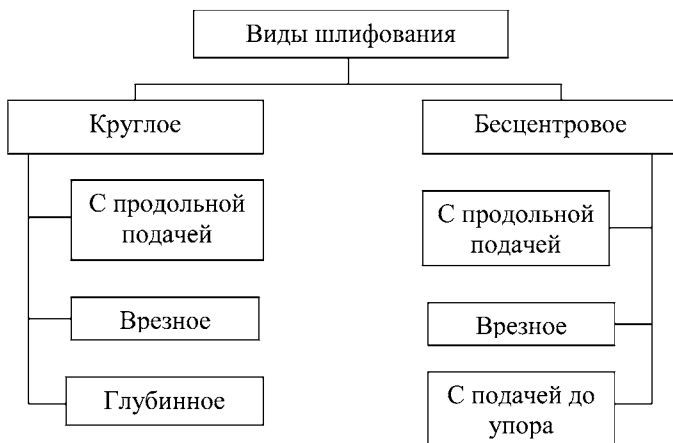


Рис. 3.7. Виды наружного круглого и бесцентрового шлифования

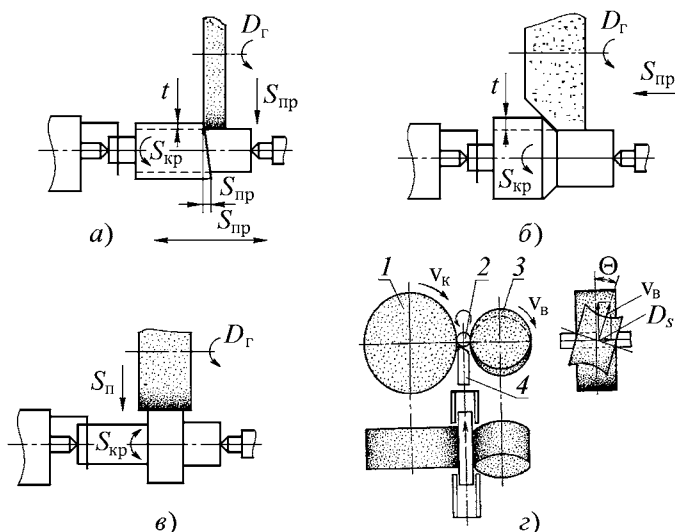


Рис. 3.8. Схемы круглого и бесцентрового наружного шлифования:

а – методом продольной подачи; *б* – глубинного; *в* – врезного;
г – бесцентрового с продольной подачей

Глубинное шлифование (рис. 3.8, б) 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. 3.8, в) 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. 3.8, г) является производительным методом обработки. Заготовка обра-

батовывается 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°) 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 параметр шероховатости $Ra \leq 0,2$ мкм.

Врезное бесцентровое шлифование обычно применяется для обработки цилиндрических деталей с уступом, а также деталей с наружной конической поверхностью. При этом методе шлифования оси кругов параллельны, или ведущий круг устанавливается под малым углом $\Theta = 0,2...0,5^\circ$. 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_n до установленного положения.

3.4.2. Ленточное шлифование

В авиадвигателестроении 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.

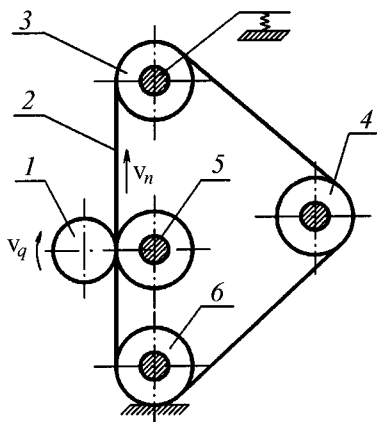


Рис. 3.9. Схема обработки бесконечной лентой наружной поверхности вращения:

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

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

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 3...5 квалитеты точности и параметр шероховатости поверхности $Ra = 0,1 \dots 0,16$ мкм.

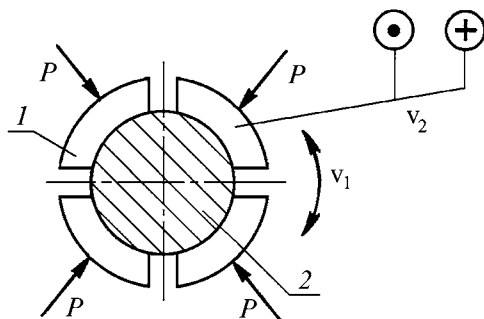


Рис. 3.10. Схема притирки наружной поверхности тела вращения:

1 – притир; 2 – обрабатываемая заготовка

Схема притирки наружной поверхности вращения приведена на рис. 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.

В процессе обработки деталь получает вращательное движение со скоростью $v_1 = 10 \dots 20$ 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 рис. 3.11.

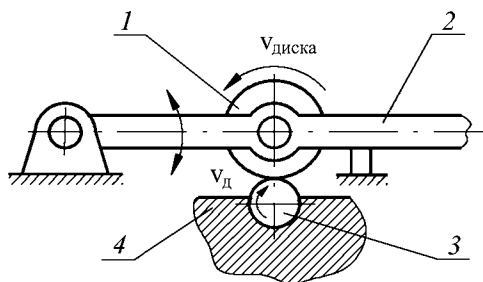


Рис. 3.11. Схема притирки цилиндрической поверхности твердосплавным диском

Твердосплавный диск 1 закрепляется в шпинделе качающегося рычага 2. Заготовка 3 получает вращательное движение со скоростью $v_d = 10 \dots 50$ м/мин и перемещается в осевом направлении. Опорой для детали служит люнет 4. Притирка наружных поверхностей вращения с помощью твердосплавных дисков обеспечивает отклонение от цилиндричности обработанной поверхности $0,5 \dots 2$ мкм и параметр шероховатости $Ra = 0,02 \dots 0,04$ мкм при обработке стальных цапф 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 резания $0,03 \dots 0,2$ 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 порошковой, пенополиуретановой и других связках. При окончательном полировании обеспечивается параметр шероховатости обработанной поверхности $Ra = 0,012 \dots 0,1$ мкм.

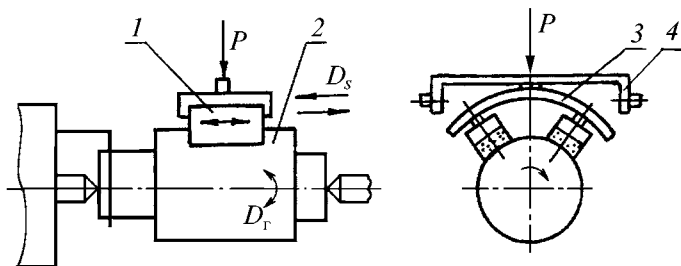


Рис. 3.12. Схема суперфиниширования наружной цилиндрической поверхности в центрах:

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

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 рис. 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.

Суперфиниширование обеспечивает точность обработки 3...5 квалитета, параметр шероховатости поверхности $Ra = 0,012...0,1$ 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.

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

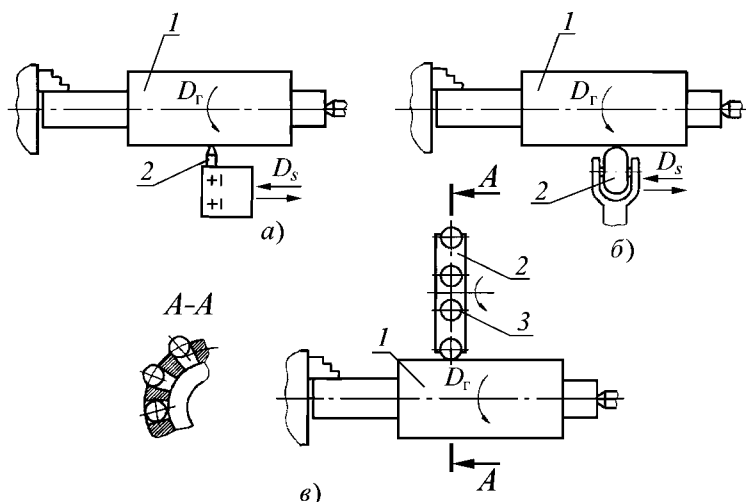


Рис. 3.13. Схемы отделочной обработки методами пластического деформирования наружных поверхностей вращения:

а – алмазное выглаживание; *б* – обкатывание роликом;

в – центробежное шариковое упрочнение

Алмазное выглаживание (рис. 3.13, *а*) 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 5...7 квалитетов, шероховатость поверхности $Ra = 0,02...0,15$ мкм.

Обкатывание роликом (рис. 3.12, *б*) применяется при обработке наружных поверхностей и является широкодоступным и распространенным методом. Обкатные ролики изготавливаются из сталей ШХ15, У10А, У12А, ХВГ. Ролики имеют твердость 58...65 HRC. Качество обработанных поверхностей при обкатывании упрочняющим роликом 2 зависит от режимов деформирования: силы обкатывания, подачи, скорости, числа рабочих ходов и применяемой СОТС. Перед обкатыванием заготовка 1 обрабатывают точением, шлифованием и другими способами. Обкатывание выполняется на токарных станках и обеспечивает точность по 7...10 квалитету и шероховатость $Ra = 0,5...2,0$ 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 7...10 квалитета и шероховатость поверхности $Ra = 0,05...2,0$ мкм.

Центробежное шариковое упрочнение (рис. 3.13, *в*) 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, 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 7...9 квалитету и параметр шероховатости поверхности $Ra = 0,1...0,4$ мкм.

Глава 4

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 в десять и более раз его диаметр).

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 авиадвигателестроении труднообрабатываемых жаропрочных, титановых, жаростойких, коррозионно-стойких и других сталей и сплавов в совокупности с широким диапазоном диаметров отверстий ($D = 0,1 \dots 100$ 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 благо-

приятных 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 пробивкой 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 D_r в виде быстрого вращения инструмента или заготовки вокруг оси обрабатываемого отверстия и движения подачи D_s в виде перемещения инструмента или заготовки вдоль оси отверстия. Схемы и элементы сечения среза при сверлении, зенкеровании и развертывании отверстий приведены на рис. 4.1.

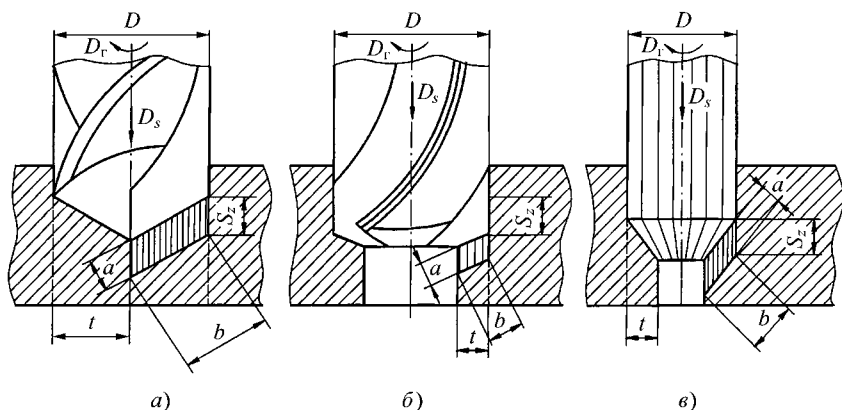


Рис. 4.1. Схемы и элементы сечения среза при сверлении (а), зенкеровании (б) и развертывании (в) отверстий:
 a – толщина среза; b – ширина среза

Сверление отверстий (рис. 4.1, *a*) 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 γ и скорости резания, принимающей нулевое значение у поперечной режущей кромки. Увеличение глубины сверления t затрудняет удаление стружки, подачу СОТС и обеспечение достаточной жесткости сверла (особенно малого диаметра).

Скорость резания, допускаемую режущими свойствами сверл, определяют по формуле:

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

где C_v – коэффициент, зависящий от предела прочности обрабатываемого материала; T – период стойкости, мин; S_0 – подача, мм/об; $K_v = K_m K_0 K_d K_l$ – 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 табл. 4.1. Для других материалов они могут быть найдены в справочниках по нормативам режимов резания.

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 снижать подачу 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.

4.1. Параметры для определения скорости резания при сверлении

Обрабатываемый материал	σ_B , МПа	C_v	Показатели			Материал сверла
			x_1	y_1	m	
Титановые сплавы	450...1000	4,2...2,1	0,7	0,6	0,5	Быстро-режущая сталь
			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

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 9...13-го квалитетов, параметр шероховатости $Ra = 0,8...25$ мкм.

Основное машинное время при сверлении определяется по формуле:

$$T_{\text{маш}} = \frac{L}{n S_0}, \text{ мин},$$

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 мин^{-1} .

Зенкерование (рис. 4.1, б) 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, параметр шероховатости $Ra = 6,3...25$ мкм. Чистовое зенкерование – точность 8...10-го квалитетов, параметр шероховатости $Ra = 0,4...6,3$ мкм.

Развертывание (рис. 4.1, в) применяется после зенкерования, растачивания и других операций. Минимальная погрешность при развертывании обеспечивается за два прохода (черновой и чистовой), точность соответствует 5...9 квалитетам, 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 $S_0 = S_z z$, 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. 4.3, а, 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.

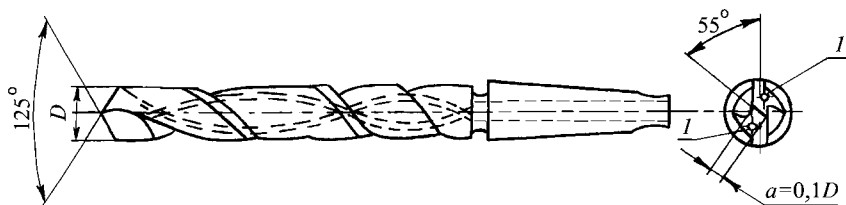


Рис. 4.2. Сверло с внутренней подачей охлаждающей жидкости:

I – отверстия для подачи СОТС

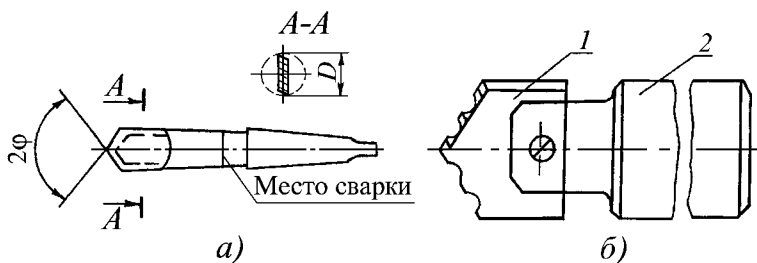


Рис. 4.3. Перовые сверла:

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 $\omega = 50 \dots 65^\circ$. Основное преимущество – не требуется периодический вывод сверла при сверлении отверстий длиной более 10 диаметров.

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.

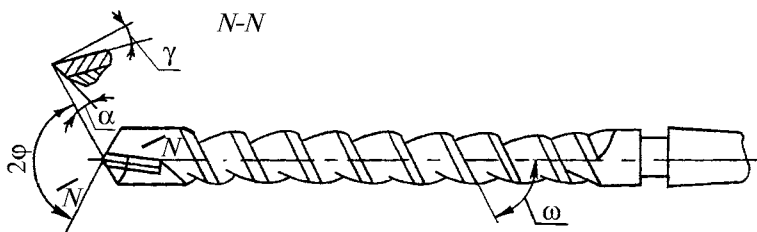


Рис. 4.4. Шнековое сверло

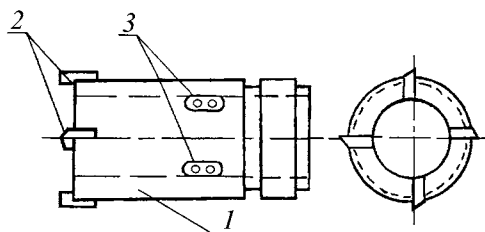


Рис. 4.5. Кольцевое сверло:

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° . В зависимости от обрабатываемого материала изготавливаются из быстрорежущих сталей или твердых сплавов.

Зенкеры в зависимости от назначения подразделяются на *зенковки, зенкеры, цековки* (рис. 4.7).

По способу крепления зенкера 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 сердцевинки, благодаря чему

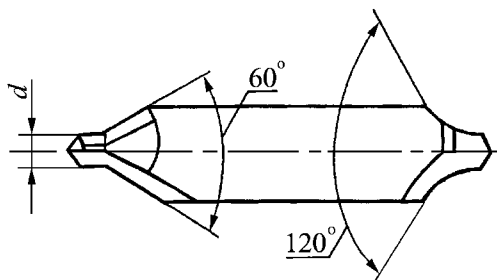


Рис. 4.6. Центровочное сверло

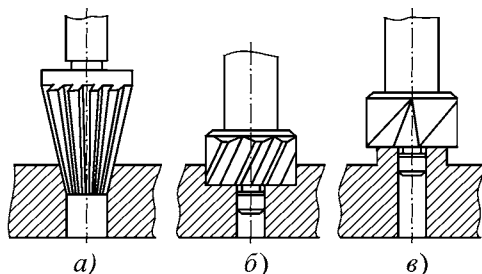


Рис. 4.7. Разновидности зенкеров:

а – зенковка для обработки фасок в отверстиях; *б* – зенкер с направлением; *в* – цековка для обработки плоских поверхностей

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 изготавливают обычно с цилиндрическим хвостовиком, а свыше 10 мм с коническим хвостовиком. Развертки диаметром свыше 30 мм изготавливают 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 2ϕ 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 ϕ 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, 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.

Зенкер имеет режущую часть и калибрующий участок. Главный угол в плане ϕ 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.

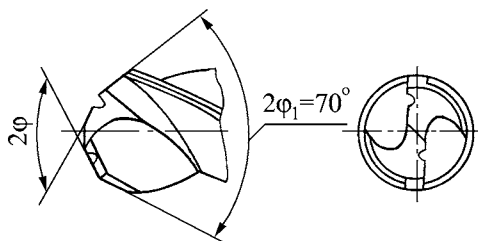


Рис. 4.8. Спиральное сверло с подточкой для обработки труднообрабатываемых материалов

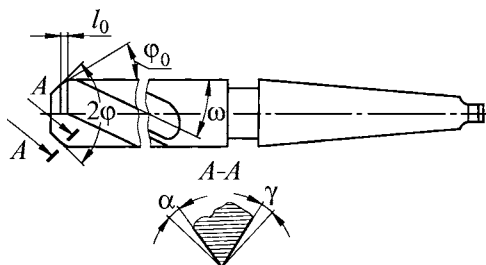


Рис. 4.9. Основные параметры зенкера

Угол наклона режущей кромки λ при обработке сквозных отверстий принимают равным $(-5^\circ) \dots (-10^\circ)$, при обработке глухих отверстий $\lambda = 0$. Для зенкеров с твердым сплавом $\lambda = 15 \dots 25^\circ$. Для зенкерования отверстий из конструкционных материалов передний угол γ принимают $15 \dots 25^\circ$ для цельных зенкеров и 12° для сборных. Все зубья зенкера имеют ленточку $f = 0,1 \dots 0,05$ мм. На калибрующем участке выполняют обратную конусность $0,04 \dots 0,10$ мм на каждые 100 мм длины. Основные геометрические параметры режущей части зенкеров для обработки отверстий в жаропрочных и титановых сплавах приведены в табл. 4.2.

4.2. Геометрические параметры режущей части зенкеров, °

Материал режущей части	Обрабатываемый материал			
	Жаропрочные сплавы			
	γ	α	2φ	ω
Быстрорежущая сталь	0...5	8...10	45...60	15...20
Твердый сплав	0...3	10...12	45...60	15...20
Материал режущей части	Обрабатываемый материал			
	Титановые сплавы			
	γ	α	2φ	ω
Быстрорежущая сталь	0...5	10...12	45...60	15...20
Твердый сплав	0...3	10...12	45...60	15...20

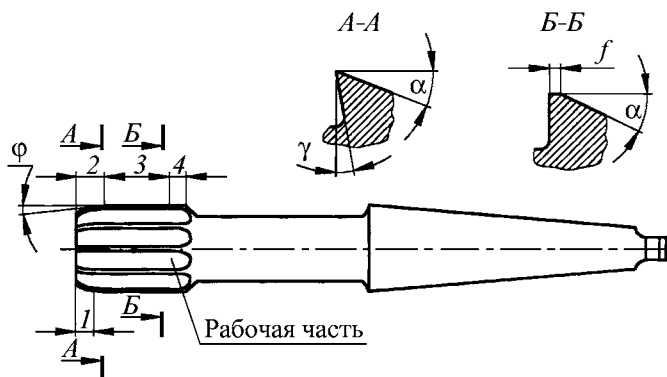


Рис. 4.10. Основные параметры развертки

Развертки на рабочей части имеют четыре участка: направляющий конус 1, облегчающий введение развертки в отверстие; заборный конус 2, выполняющий основную работу резания; калибрующий участок 3, обеспечивающий заданные точность и шероховатость; обратный конус 4, уменьшающий разбивку отверстия.

Передние и задние углы, измеряемые в главной секущей плоскости, выбирают в зависимости от обрабатываемого материала заготовки из табл. 4.3. Для разверток из инструментальной стали $\gamma = 1 \dots 10^\circ$, из твердого сплава $\gamma = 0 \dots 15^\circ$. Задний угол α принимают равным $6 \dots 12^\circ$. Главный угол в плане ϕ заборного конуса машинных разверток для обработки стали принимают равным $12 \dots 15^\circ$.

Для обработки глухих отверстий применяют машинные и ручные развертки без направляющего конуса с углом $\phi = 45 \dots 60^\circ$. 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 $0,05 \dots 0,3$ мм. Обратная конусность составляет около $0,01$ мм для ручных разверток и около $0,07$ мм для машинных.

4.3. Геометрические параметры режущей части разверток

Материал режущей части	Обрабатываемый материал			
	Жаропрочные сплавы			
	γ	α	2ф	ω
Быстрорежущая сталь	0...5	8...10	45	0
Твердый сплав	0...5	6...8	45	0

Материал режущей части	Обрабатываемый материал			
	Титановые сплавы			
	γ	α	2ф	ω
Быстрорежущая сталь	0	10...15	45	0
Твердый сплав	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 соосность обрабатываемых отверстий.

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

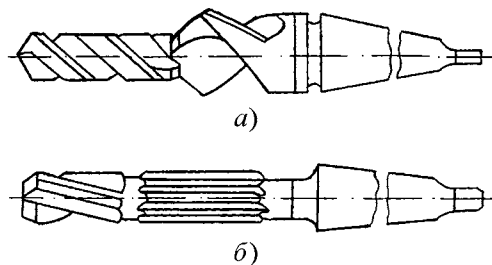


Рис. 4.11. Комбинированные инструменты:
а – сверло-зенковка; *б* – зенкер-развертка

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 обес-

печивает прямолинейность оси отверстия, совпадающего с осью шпинделя станка.

Для обработки отверстий применяются резцы из быстрорежущей стали, твердого сплава и сверхтвердых материалов (алмаза, эльбора, гексаниа и др.).

С целью уменьшения отжатия резца при недостаточной жесткости станка применяют резцы с углом в плане ϕ , доходящим до 90° . 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 ϕ , равных 45, 60 и 90° , а также применения кондукторных втулок (рис. 4.12).

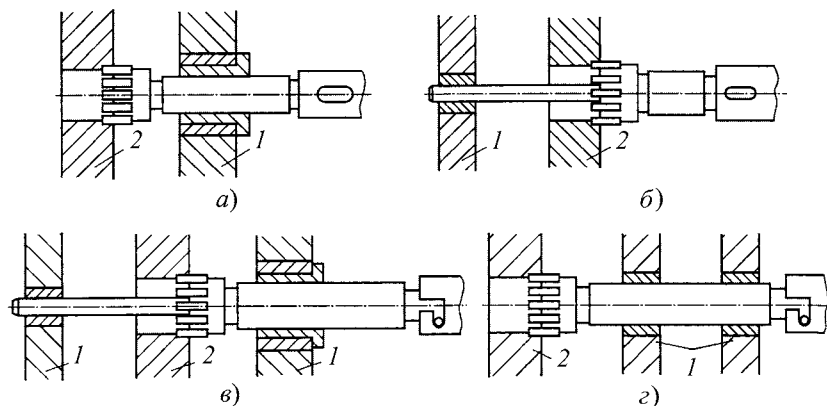


Рис. 4.12. Схемы направления инструментальных оправок с помощью кондукторных втулок:

а – переднее направление; *б* – заднее; *в* – переднее и заднее; *г* – двойное переднее; *1* – кондуктор; *2* – обрабатываемая заготовка

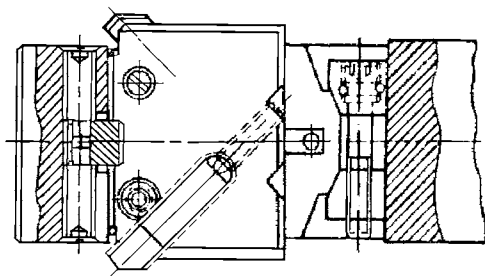


Рис. 4.13. Расточная резцовая головка

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 самоустанавливаются в обрабатываемом отверстии (рис. 4.14).

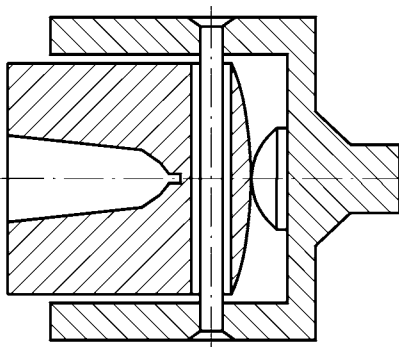


**Рис. 4.14. Плавающий блок
для установки расточного
инструмента**

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.

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 параметр шероховатости:

- при черновом растачивании 11...13 квалитет, $Ra = 1,6...25$ мкм;
- при чистовом растачивании 8...10 квалитет, $Ra = 0,4...6,3$ мкм;
- при тонком растачивании 5...7 квалитет, $Ra = 0,2...3,2$ мкм.

4.4. ПРОТЯГИВАНИЕ ОТВЕРСТИЙ

Обработка отверстий протягиванием является высокопроизводительным методом. Она применяется при обработке деталей из различных сталей и сплавов твердостью до 50 HRC, в том числе

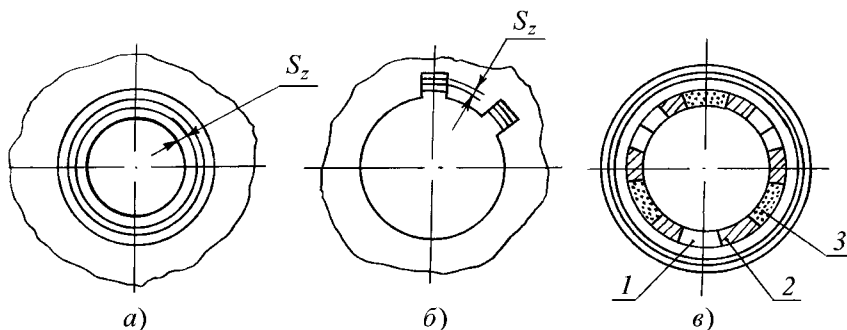


Рис. 4.15. Схемы резания при протягивании отверстий:

а – профильная; *б* – генераторная; *в* – прогрессивная; 1, 2, 3 – слои, снимаемые первым, вторым и третьим зубьями

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. 4.15, *а*) 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. 4.15, б) первый зуб протяжки имеет круглую форму, все последующие зубья имеют форму дуг окружности. Окончательная форма и размеры отверстия получаются при резании последними 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.

Существует **два варианта протягивания отверстий**: 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 γ 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 качества 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 при протягивании в зависимости от стойкости и подъема на зуб определяется по формуле:

$$v = \frac{C_v}{T^m S^{y_v}} K_n, \text{ м/мин,}$$

где T – стойкость протяжки, мин; S – подъем на зуб ($S = 0,02...0,10$ мм/зуб); C_v , m , y_v – величины, зависящие от сочетания обрабатываемого и инструментального материалов; K_n – коэффициент, учитывающий свойства инструментального материала.

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

Скорости резания при протягивании деталей из жаропрочных сплавов приведены в табл. 4.4.

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 10...11 квалитеты, параметр шероховатости $Ra = 0,8...12,5$ мкм; чистовое протягивание 6...9 квалитеты, параметр шероховатости $Ra = 0,2...6,3$ мкм.

Машинное время при протягивании определяется по формуле:

$$T_{\text{маш}} = \frac{L_p i K_x}{1000v}, \text{ мин.},$$

где L_p – длина рабочего хода протяжки, мм; i – количество протяжек в комплекте; K_x – коэффициент, учитывающий обратный ход протяжки ($K_x = 1,2 \dots 1,5$); v – скорость резания, м/мин.

4.5. ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Высокие требования к качеству поверхности, точности, 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

В авиадвигателестроении при изготовлении деталей из жаропрочных, титановых и других труднообрабатываемых сплавов и сталей для обработки отверстий применяется **внутреннее шлифование**. Для внутреннего шлифования отверстий используются следующие схемы обработки: *шлифование с продольной подачей* (рис. 4.16, а); *врезное с поперечной подачей* (рис. 4.16, б); *шлифование с планетарным движением круга* (рис. 4.16, в); *бесцентровое шлифование* (рис. 4.17).

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.

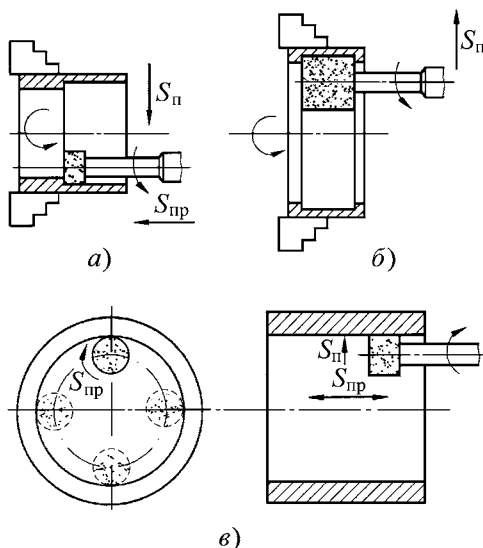


Рис. 4.16. Схемы обработки отверстий на внутришлифовальных станках

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 затруднение 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 5...7 квалитетов, параметр шероховатость $Ra = 0,1... 0,32$ мкм. Повышение производительности может быть получено

при увеличении скорости круга и подач продольной $S_{пр}$ и поперечной $S_{поп}$.

При шлифовании отверстий методом поперечной подачи обеспечивается точность 7-го квалитета, параметр шероховатости $Ra = 0,16...0,63$ мкм. Поперечная подача $S_{поп}$ 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 табл. 4.5 приведены режимы внутреннего шлифования отверстий с продольной подачей в жаропрочных и титановых сплавах с $\sigma_b > 1000$ Н/мм².

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.

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 $S_{пр}$, мм/оборот. дет.	Подача на глубину $S_{п}$, 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 в качестве СОТС широко применяется сульфофрезол, водные растворы эмульсола, Аквола-2 и другие составы.

Машинное время $T_{\text{маш}}$ при внутреннем шлифовании с продольной подачей круга определяется по формуле

$$T_{\text{маш}} = \frac{a}{n_{\text{дв.х}} S_{\text{п}}} K, \text{ мин},$$

где a – припуск на сторону, мм; $S_{\text{п}}$ – 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.

$$n_{\text{дв.х}} = \frac{v_{\text{пр.х}} 1000}{2L},$$

где $L = l_0 + (0,2 \dots 0,4)B_{\text{к}}$ – длина хода стола, мм; l_0 – длина отверстия, мм; $B_{\text{к}}$ – ширина круга, мм; $v_{\text{пр.х}}$ – скорость продольного хода стола;

$$v_{\text{пр.х}} = \frac{S_{\text{пр}} n_{\text{д}}}{1000}, \text{ м/мин},$$

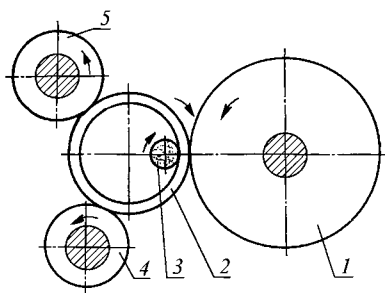


Рис. 4.17. Схема бесцентрового внутреннего шлифования отверстий

где $S_{\text{пр}}$ – продольная подача за один оборот детали, мм; $n_{\text{д}}$ – частота вращения детали, мин^{-1} .

Бесцентровое внутреннее шлифование (см. 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 большой скоростью под действием шлифовального круга 3. Верхний нажимной ролик 5 прижимает заго-

4.6. Режимы бесцентрового внутреннего шлифования жаропрочных и титановых сплавов

Материал заготовки	Диаметр отверстия, мм	Скорость круга v_k , м/с	Скорость вращения заготовки v_d , м/мин	Подача на глубину S_f , мм/ход	Подача минутная S_m , 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

товку 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 $\sigma_b > 1000 \text{ Н/мм}^2$ приведены в табл. 4.6.

Бесцентровое шлифование отверстий обеспечивает точность обработки 5...7-го квалитетов, параметр шероховатости $Ra = 0,2...0,32 \text{ мкм}$, concentricность и параллельность оси отверстия и наружной поверхности до 3 мкм.

4.5.2. Отделочные методы абразивной обработки

В технологических процессах изготовления деталей авиадвигателей 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.

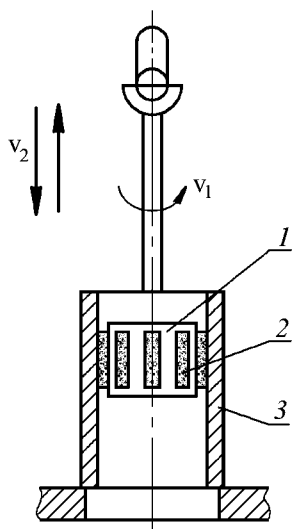


Рис. 4.18. Схема хонингования:

1 – хон; 2 – абразивные бруски; 3 – обрабатываемая заготовка

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 рис. 4.18.

Хонингование выполняется на специальных вертикально-хонинговальных и горизонтально-хонинговальных станках. Хонинговальная головка совершает одновременно вращательное ($v_1 = 30 \dots 60$ м/мин) и возвратно-поступательное ($v_2 = 10 \dots 15$ м/мин) движения при постоянном давлении абразивных (или алмазных) брусков на обрабатываемую поверхность (давление бруска составляет $0,4 \dots 1$ МПа). Бруски в процессе обработки раздвигаются (радиальная подача) механи-

ческими, гидравлическими или другими устройствами.

Перед хонингованием отверстие должно иметь точность обработки не ниже 7...8-го квалитетов и параметр шероховатости $Ra = 3,2 \dots 6,3$ мкм. В процессе каждого хода хонингования снимается слой металла толщиной $0,3 \dots 0,5$ 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.

В авиадвигателестроении 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 35...40 HRC) позволило снизить уровень остаточных напряжений, улучшить условия труда и устранить пожароопасность.

Хонингование отверстий обеспечивает точность 2...4-го квалитетов и параметр шероховатости $Ra = 0,08...0,16$ 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:

$$T_{\text{маш}} = \frac{a}{S_n} n, \text{ мин},$$

где a – припуск на сторону, мм; S_n – подача (радиальная) на дв. ход головки, мм; n – число двойных ходов головки, мин^{-1} ;

$$n = \frac{1000 v_{\text{вп}}}{2l_x},$$

где $v_{\text{вп}}$ – скорость возвратно-поступательного движения, м/мин;
 l_x – ход хонинговальной головки, мм;

$$l_x = l + 2l_{\text{п}} - l_{\text{бр}},$$

где l – длина обрабатываемого отверстия, мм; $l_{\text{п}}$ – перебеги головки, мм; $l_{\text{бр}}$ – длина бруска, мм.

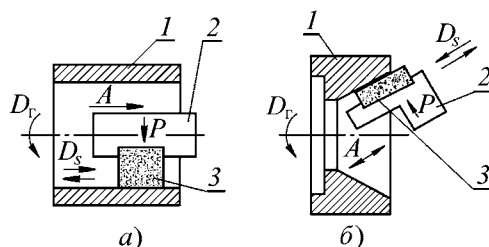


Рис. 4.19. Схемы суперфиниширования отверстий:

а – цилиндрического; *б* – конического

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 рис. 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 $L = 2 \dots 5$ мм. На державку 2 с брусками действует давление $P = 50 \dots 300$ МПа.

Суперфиниширование выполняется на специальных станках. Применение специальных приспособлений и устройств позволяет выполнять операцию суперфиниширования на токарных и шлифовальных станках. В качестве СОТС может применяться керосин и веретенное масло.

Режимы обработки назначаются в зависимости от обрабатываемого материала. При обработке заготовок из стали и алюминиевых сплавов рекомендуются следующие режимы: окружная скорость заготовки $v_z = 30 \dots 45$ м/мин; скорость движения брусков вдоль образующей $\sim 0,5$ м/мин; давление на брусок $P = 50 \dots 150$ МПа; частота колебания 45 Гц; амплитуда колебаний $L = 3 \dots 5$ мм. Снимаемый припуск составляет ~ 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 $Ra = 0,02 \dots 0,16$ 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, параметр шероховатости $Ra = 0,02...0,04$ мкм. В обычных условиях доводкой и притиркой обеспечивается точность 3...5-го квалитетов, параметр шероховатости $Ra = 0,1...1,6$ мкм.

Полирование является отделочной обработкой, обеспечивающей уменьшение шероховатости до $Ra = 0,016$ 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 качества поверхности, 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 чернового 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 чернового 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).

Сплошное глубокое сверление (рис 4.20, *а*), например, спиральным сверлом, отличается тем, что весь высверливаемый материал удаляется в виде стружки (глубина резания $t = d/2$). При кольцевом глубоком сверлении (рис. 4.20, *б*), например, кольцевым сверлом (см. 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.

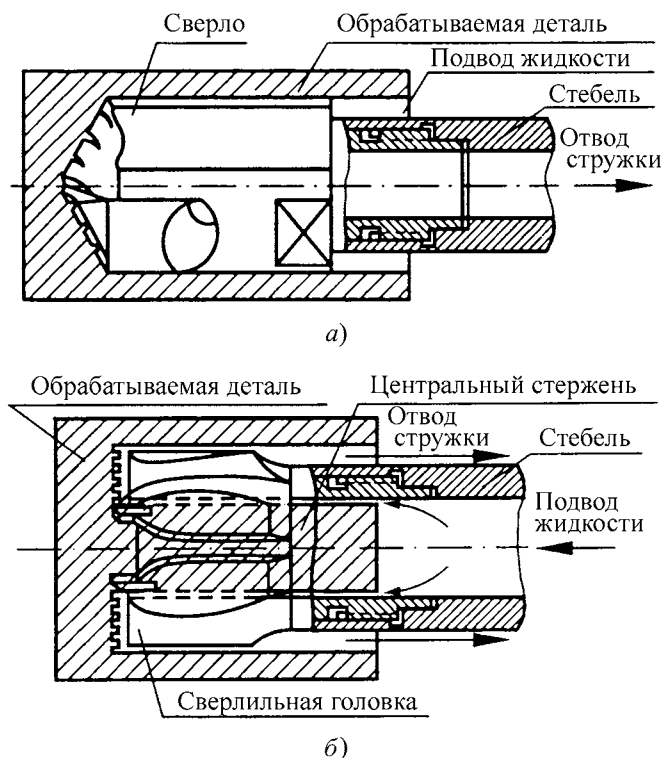


Рис. 4.20. Схемы образования отверстия при сплошном (а) и кольцевом (б) сверлении

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 чернового и чистового растачивания.

Операции чернового 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. 4.21, а) и *растяжение* (рис. 4.21, б).

По схеме (рис. 4.21, а) 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. 4.21, б) растачивание начинают с торца *А* заготовки 5. Составляющая силы резания P_x вызывает в расточной оправке 3 напряжения растяжения. Для направления

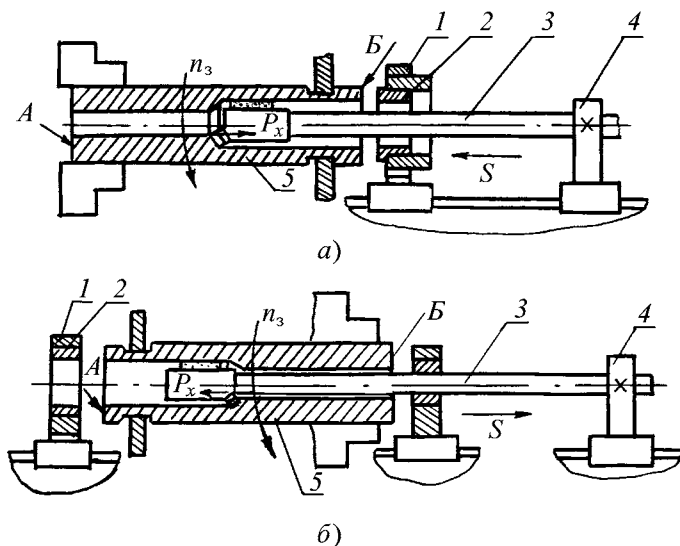


Рис. 4.21. Схемы глубокого растачивания:

а – на сжатие; б – на растяжение

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.

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 головка – 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 винтовые сверла одностороннего действия. Наиболее широкое распространение имеют трубчато-лопаточные, лопаточные и шнековые сверла. *Основные разновидности сверл подразделяются на следующие группы:*

1. Инструмент с наружным отводом стружки одностороннего резания (ружейные сверла, рис. 4.22) и шнековые сверла двустороннего резания.

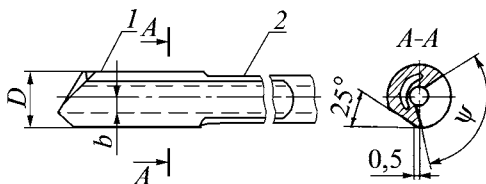


Рис. 4.22. Ружейное сверло:

1 – рабочая часть; 2 – трубчатый корпус

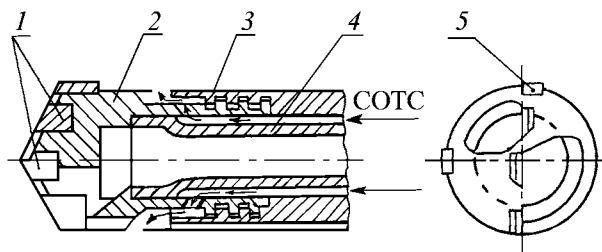


Рис. 4.23. Эжекторное сверло

2. Инструмент с внутренним отводом стружки. К этой группе относятся лопаточные сверла одностороннего и двустороннего резания.

3. Инструмент с эжекторным отводом стружки. Эжекторные сверла (рис. 4.23) оснащаются твердосплавными пластинками 1, располагаемыми в шахматном порядке для обеспечения среза в виде отдельных лент, с последующим дроблением стружки стружколомательными уступами и ее удалением. Рабочая сверлильная головка 2 ввинчена в трубу 3, являющуюся несущим корпусом, в которую входит внутренняя труба 4, служащая для подвода СОТС и отвода стружки. Повышение точности обработки обеспечивается твердосплавными направляющими 5. В эжекторных сверлах используется эффект подсоса СОТС, которая уходит вместе со стружкой в результате разрежения внутри сверла. Использование эжекторных сверл целесообразно при глубоком сверлении отверстий диаметром 20...65 мм.

Эжекторные сверла работают на скоростях резания 25...200 м/мин с подачей 0,15...0,7 мм/об. При эжекторном сверлении обеспечиваются точность 9...11-го квалитетов и параметр шероховатости обработанной поверхности $Ra = 0,63...1,25$ мкм.

При глубоком сверлении и растачивании в качестве СОТС применяют масляные и водные эмульсии минеральных масел. Для сверления отверстий в конструкционных, жаропрочных и титановых сплавах применяют СОТС МР-1, МР-2, МР-3, сульфозфрезол, Укринол-1 и др.

Глубокое сверление и растачивание выполняются на горизонтальных и вертикальных станках, у которых имеется система подвода-отвода СОТС для принудительного отвода стружки. Для обработки малых отверстий в крупносерийном и массовом производствах применяются многошпиндельные станки.

Для эжекторного сверления могут применяться универсальные станки (сверлильные, токарные и др.), снабженные насосной станцией, которая может быть стационарной или перемещаемой.

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 накладывается 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 твердосплавных 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 табл. 4.7.

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 больше, чем при обычном сверлении;
- 3) амплитуду осевых колебаний для сверления отверстий глубиной 5...8 диаметров следует выбирать численно равной $(1...2)S$, для отверстий глубиной более 8 диаметров – $(2...3)S$.

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 BT3, BT5, BT9, BT20, BT22, OT4 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
	15	40	0,05	0,12
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
	15	20...25	0,06	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
	15	20	0,05	0,12
Коррозионно-стойкие нержавеющие стали 13Х12Н2ВМФ, 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

* A – фактическая амплитуда колебаний инструмента.

4.7. ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ В ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Совершенствование конструкции авиационных двигателей и широкое применение труднообрабатываемых материалов при их изготовлении вызвало необходимость применения физико-химических методов, которые подробно рассмотрены в главе 11.

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 $f = 500 \dots 5000$ Гц) приведены в табл. 4.8.

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.

4.8. Режимы электроискровой обработки отверстий (прошивка)

Диаметр отверстия, мм	Напря- жение, В	Мощ- ность, кВт	Производи- тельность, мм ³ /мин	Шероховатость обработанной поверхности Ra , мкм
Ø1	30...70	0,2...0,3	20	0,6...40
Ø5	80...200	0,5...0,8	150	0,6...40
Ø20	80...200	2...2,5	300	0,6...40

4.9. Технологические возможности электрохимической обработки

Операции электрохимической обработки	Скорость обработки, мм/мин	Ra , мкм
Прошивка отверстий диаметром 1...10 мм	2,5...8,0	0,63...2,5
Прошивка полостей сложной конфигурации	0,4...0,8	0,32...1,25 (дно) 10...20 (боковые стенки)

4.10. Режимы лазерной обработки отверстий

Диаметр отверстия, мм	Глубина отверстия, мм	Режимы обработки					
		Плотность энергии излучения q , Вт/см ²	одноимпульсный		многоимпульсный		
			Энергия излучения W , Дж	Длительность импульса τ , мс	Энергия излучения W , Дж	Длительность импульса τ , мс	Число импульсов
0,02...0,05 0,05...0,1	0,1... 0,2	10^7	0,1...0,2 0,2...0,5	0,1... 1,0	0,05 0,1	0,1	3...5
0,03...0,05 0,1...0,2	0,3... 0,6		0,2...0,5 0,7...1,5		0,05 0,1		5...10
0,1...0,2 0,5...0,6	1...2		2...4 10		0,5 1,0	0,1... 1,0	10

Технологические режимы электрохимической обработки отверстий приведены в табл. 4.9.

Режимы **лазерной обработки** отверстий диаметром от 0,02 до 0,6 мм из стали и железоникелевых сплавов приведены в табл. 4.10.

Для лазерной обработки отверстий применяются установки типа "Квант" импульсного действия, установки с ЧПУ, например, модели 4222Ф2 и др. Лазерная обработка обеспечивает точность 10...11-го квалитетов, параметр шероховатости $Ra = 0,32 \dots 2,5$ мкм.

Преимущества лазерной обработки перед электронно-лучевой состоят в том, что лазерная обработка выполняется в воздушной среде и не требует вакуумных камер, имеет меньшие габариты оборудования, не нуждается в защите обслуживающего персонала от рентгеновского излучения.

Глава 5

ОБРАБОТКА ПЛОСКИХ И ЛИНЕЙЧАТЫХ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В ГТД 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 коробов 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 малопродуктивными, например, по сравнению с фрезерованием.

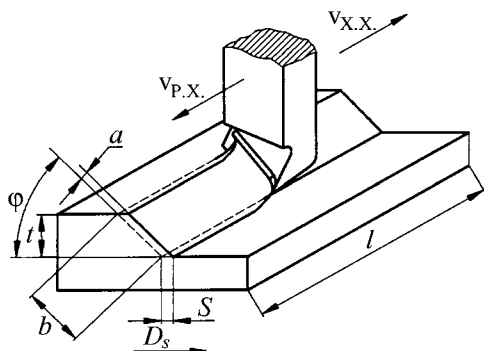


Рис. 5.1. Схема процесса строгания плоской поверхности на поперечно-строгальном станке

Процесс строгания наиболее целесообразно применять при обработке длинных и узких плоских поверхностей. Стругание 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 рис. 5.1 приведена схема процесса строгания плоской поверхности на поперечно-строгальном станке: t – глубина резания; S – подача, мм/дв. ход; b – ширина срезаемого слоя; a – толщина срезаемого слоя; l – длина строгания; $v_{p.x}$ – скорость рабочего хода; $v_{x.x}$ – скорость холостого хода.

У поперечно-строгальных станков движение резания сообщается инструменту-резу, 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 воз-

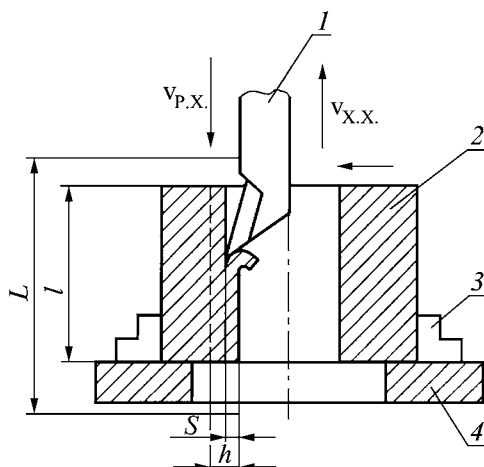


Рис. 5.2. Схема долбления плоской поверхности шпоночной канавки:

1 – резец; 2 – заготовка; 3 – приспособление; 4 – корпус приспособления

вращаются 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 колесах и втулках, многогранные отверстия, в том числе и глухие, наружные фасонные поверхности и другие.

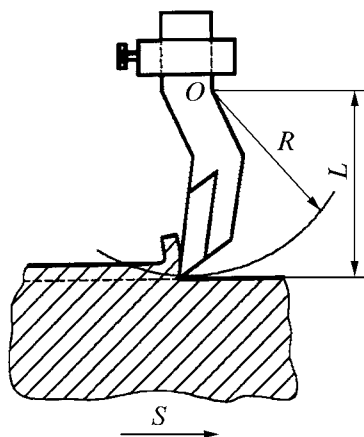


Рис. 5.3. Схема строгания изогнутым резцом

На схеме долбления (рис. 5.2): L – длина хода резца; l – длина долбления; h – глубина шпоночной канавки, $v_{р.х}$ и $v_{х.х}$ – скорость рабочего и холостого хода резца; S – подача.

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 табл. 5.1.

При строгании применяются изогнутые и реже 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.

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 σ_b , Н/мм ² :			
550	$\frac{3...20}{1...4}$	$\frac{1,0...4,0}{0,2...1,4}$	$\frac{80...32}{190...50}$
	$\frac{3...20}{1...4}$	$\frac{1,0...4,0}{0,2...1,4}$	$\frac{62...25}{150...40}$
650	$\frac{3...20}{1...4}$	$\frac{1,0...4,0}{0,2...1,4}$	$\frac{50...20}{120...30}$
	$\frac{3...20}{1...4}$	$\frac{1,0...4,0}{0,2...1,4}$	$\frac{42...18}{100...25}$
750	$\frac{3...20}{1...4}$	$\frac{1,0...4,0}{0,2...1,4}$	
	$\frac{3...20}{1...4}$	$\frac{1,0...4,0}{0,2...1,4}$	
850	$\frac{3...20}{1...4}$	$\frac{1,0...4,0}{0,2...1,4}$	
	$\frac{3...20}{1...4}$	$\frac{1,0...4,0}{0,2...1,4}$	

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 %.

Резцы для строгальных и долбежных станков, применяемых для обработки труднообрабатываемых материалов, изготовляют из сталей Р9М4К8Ф, Р9К10 и твердых сплавов ВК6, ВК8, Т5К10, Т15К6, Т5К12В, Т7К12. Учитывая, что строгальные и долбежные резцы работают с ударами, передний угол γ у них делается на $5...10^\circ$ меньше, чем у токарных резцов. Другие геометрические параметры строгальных и долбежных резцов (задний угол α , главный угол в плане ϕ и угол наклона главной режущей кромки λ) выбирается аналогично токарной обработке. Для предохранения от разрушения и быстрого износа лезвия у строгальных резцов на пе-

редней поверхности предусматривается ленточка шириной, равной $(0,8...1)S$, где S – подача, мм. 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 усилия 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:

$$v = \frac{nL}{1000}(1+m), \text{ м/мин,}$$

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 $v_{р.х}$ к скорости холостого хода $v_{х.х}$.

При одинаковых скоростях рабочего и холостого ходов скорость рабочего хода определяется выражением:

$$v_{р.х} = v_{х.х} = \frac{2Ln}{1000}, \text{ м/мин.}$$

Строгание и долбление обеспечивают точность 9...13-го квалитетов, параметр шероховатости $Ra = 0,8...12,5$ мкм.

Машинное время при строгании определяется по формуле:

$$T_{\text{маш}} = \frac{B + y_1 + y_2}{nS}, \text{ мин,}$$

где B – ширина обрабатываемой поверхности заготовки, мм; $y_1 = t \operatorname{ctg} \phi$ – путь врезания резца в направлении подачи, мм; y_2 – перебеги 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:

$$T_{\text{маш}} = \frac{B}{Sn}, \text{ мин,}$$

где B – глубина канавки, мм.

5.2. ОБРАБОТКА ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ

При обработке деталей газотурбинных двигателей, 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 $v = \frac{\pi D n}{1000}$, м/мин, где D – диаметр фрезы, мм;

2) подачей на зуб S_z , мм/зуб; подачей на оборот $S_0 = S_z z$ мм/об; минутной подачей $S_m = S_0 n = S_z z n$, мм/мин;

3) глубиной резания t , мм;

4) 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 рис. 5.4.

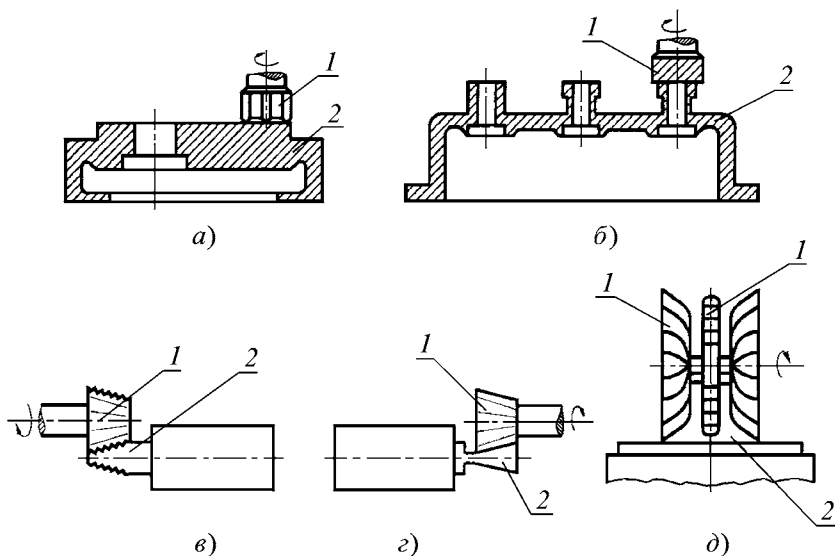


Рис. 5.4. Схемы фрезерования плоских и продольных поверхностей:

а, 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, *а, 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

$v = 40 \dots 3000$ м/мин, с подачи на зуб $S_z = 0,005 \dots 0,05$ мм и глубиной резания $t = 0,05 \dots 0,5$ 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 $\gamma = 5 \dots 8^\circ$, задний угол $\alpha = 8 \dots 12^\circ$, главный угол в плане $\varphi = 40 \dots 50^\circ$, вспомогательный угол $\varphi_1 = 10 \dots 15^\circ$.

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. 5.4, в, 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. 5.4, д).

Фрезерование плоских и фасонных линейчатых поверхностей обеспечивает: при черновой обработке точность 11...13-го качества, шероховатость поверхности $Ra = 3,2 \dots 12,5$ мкм. Соответственно, при получистовой обработке точность 11...12-го качества, $Ra = 1,6 \dots 3,2$ мкм и при чистовой обработке точность 8...10-го качества, $Ra = 0,8 \dots 1,0$ мкм. При тонком фрезеровании обеспечивается точность 6...8-го качества, $Ra = 0,2 \dots 1,6$ мкм.

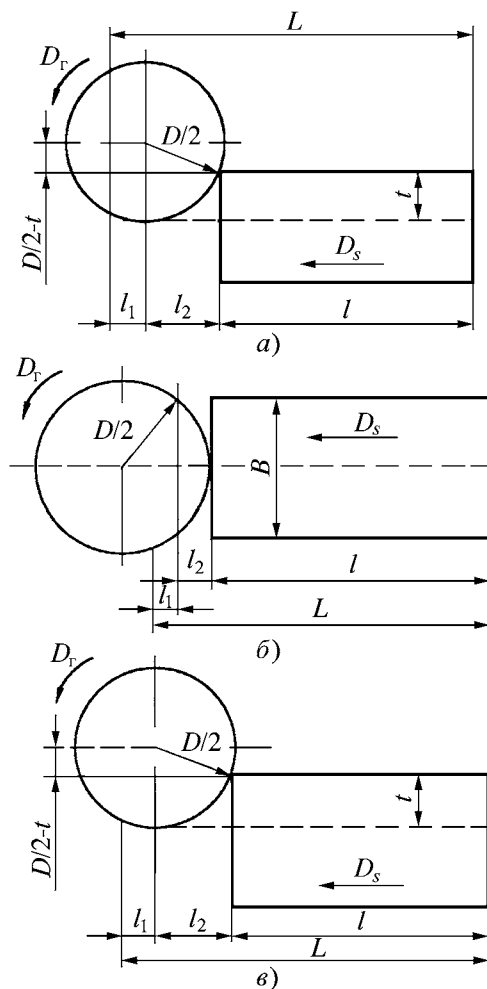


Рис. 5.5. Схемы определения пути врезания инструмента при обработке плоских поверхностей фрезами:
 а – цилиндрической; б – торцевой; в – торцевой при несимметричном фрезеровании

Машинное время при фрезеровании (за один проход) определяют по формуле:

$$T_{\text{маш}} = \frac{L}{S_{\text{м}}} = \frac{l + l_1 + l_2}{S_z z n}, \text{ мин},$$

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 рис. 5.5.

Путь врезания фрезы определяется при обработке плоскости цилиндрической фрезой (рис. 5.5, а) по формуле:

$$l_2 = \sqrt{t(D-t)}, \text{ мм};$$

при обработке торцевой фрезой (симметричное фрезерование, рис. 5.5, б):

$$l_2 = 0,5(D - \sqrt{D^2 - B^2}), \text{ мм};$$

при обработке торцевой фрезой (несимметричное фрезерование, рис. 5.5, в):

$$l_2 = \sqrt{t(D-t)}, \text{ мм}.$$

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.

1. По профилю обрабатываемой поверхности: плоские, ступенчатые, угловые, пазовые, фасонные.

2. 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. 5.6).

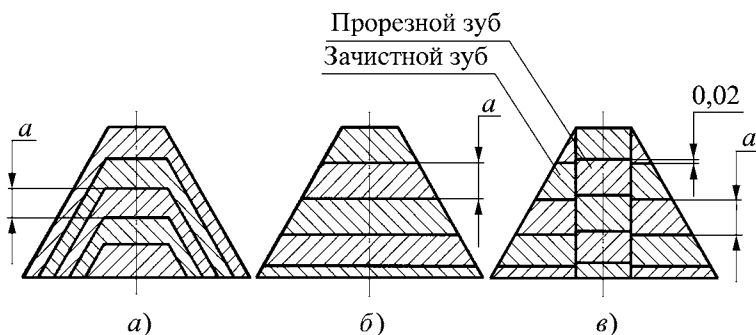


Рис. 5.6. Схемы резания при протягивании:

a – профильная; b – генераторная; v – групповая

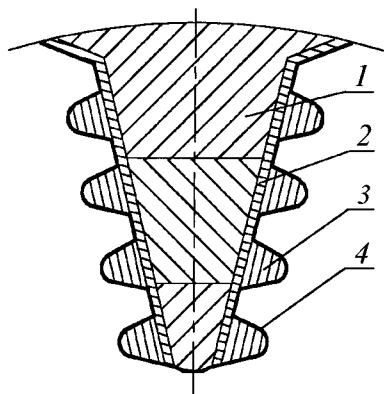


Рис. 5.7. Схема протягивания пазов в диске турбины:

1 – припуск, снимаемый фрезерованием; 2, 3, 4 – припуски, снимаемые протягиванием

Для изготовления протяжек, применяемых для протягивания труднообрабатываемых материалов, применяются быстрорежущие стали Р9Ф4К8М, Р18ФЖ8М, Р18Ф3К8М 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 регулируемой 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.

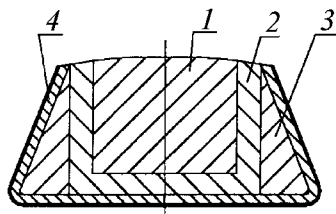


Рис. 5.8. Схема протягивания паза в дисках компрессора:

1, 2, 3, 4 – припуски, снимаемые последовательным набором протяжек

Протягивание широко применяется при обработке пазов в дисках турбин. Схема протягивания елочных пазов в диске турбины приведена на рис. 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 рис. 5.8. Учитывая, что длина пазов на дисках компрессора разная, в зависимости от ступени количество проходов может быть разное – от одного до семи.

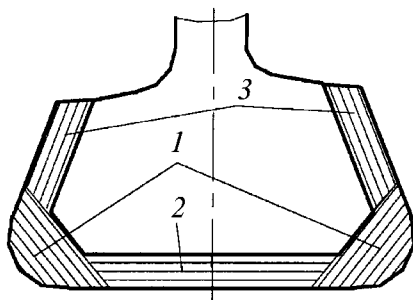


Рис. 5.9. Схема резания при протягивании хвостовиков лопаток типа "ласточкин хвост" у лопаток компрессора

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. Второй этап – 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 рис. 5.9. Припуски, обозначенные цифрами 1, 2, 3, снимаются последовательно (1 – фаски, 2 – подошва, 3 – боковые поверхности) соответствующими секциями протяжки.

Протягиванием обрабатываются и другие плоские поверхности хвостовиков лопаток турбины и компрессора, например, базовые поверхности, полки, торцевые поверхности. Режимы резания при протягивании плоских и фасонных линейчатых поверхностей деталей из жаропрочных и титановых сплавов приведены в табл. 5.2.

При протягивании в качестве СОТС применяют эмульсии, сульфохрезол, смеси с маслами. 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 $Ra = 5$ мкм до $Ra = 0,63$ мкм.

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 γ , °	12...15	5...8
Задний угол α , °	3...4	3...4

Протягивание плоских и фасонных линейчатых поверхностей обеспечивает точность 10...11-го квалитетов и шероховатость поверхности $Ra = 1,6...3,2$ мкм (черновое протягивание). При чистовой обработке – точность 6...9-го квалитетов, $Ra = 0,4...1,6$ мкм.

Машинное время при протягивании определяют по формуле:

$$T_{\text{маш}} = \frac{L_p i K_x}{1000v}, \text{ мин},$$

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 поверхно-

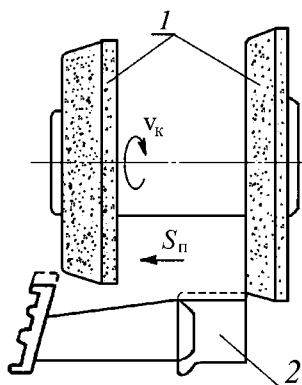


Рис. 5.10. Схема двухкругового глубинного шлифования плоских поверхностей хвостовика и бандажной полки лопаток турбины методом поперечной подачи:

1 – шлифовальные круги; *2* – обрабатываемая заготовка

сти, 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 торцом круга. *Шлифование периферией круга* является более универсальным видом обработки плоскостей, в том числе и с жесткими требованиями по плоскостности. *Шлифование торцом 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 приведены на рис. 5.10.

Шлифование входных торцов (рис. 5.10) 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 $v_k = 25...28$ м/с; скорость детали $v_d = 14...19$ м/мин; поперечная подача $S_{\pi} = 0,7...1$ мм/дв. х.; глубина шлифования t до 3...5 мм за один проход, СОТС – эмульсия.

При шлифовании плоских поверхностей обеспечивается точность 6...9-го квалитетов, шероховатость поверхности $Ra = 0,1...1,6$ мкм.

Машинное время при шлифовании на станках с продольным ходом стола периферией круга определяется по формуле:

$$T_{\text{маш}} = \frac{(B + 2x)h}{S_{\pi} S_B n_{\text{дв.х}}} \frac{1}{m} K, \text{ мин},$$

где B – ширина шлифуемой поверхности, мм; x – боковой сход круга, мм; h – припуск на сторону, мм; S_{π} – поперечная подача, мм; S_B – 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.

5.5. ОБРАБОТКА ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИТИРКОЙ, ПОЛИРОВАНИЕМ И ШАБРЕНИЕМ

Притирка является процессом отделочной обработки, обеспечивающим съём 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.

В авиадвигателестроении притирка применяется при обработке плоских поверхностей, например, деталей дозирующего пакета форсунок: распылителей, сопел, завихрителей. Притиркой обрабатывают 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 является серый чугун с ферритной, перлитной и перлитно-ферритной структурой марок СЧ15, СЧ18, СЧ25 твердостью 120...200 НВ.

Эффективной является обработка притирами с жесткозакрепленными алмазными зернами синтетических алмазов. Основными преимуществами обработки алмазными притирами по сравнению с притиркой пастами является стабильность технологических размеров, высокая износостойкость притира, отсутствие шаржирования обрабатываемых поверхностей. Алмазные притиры с жесткозакрепленными 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), монокорун-

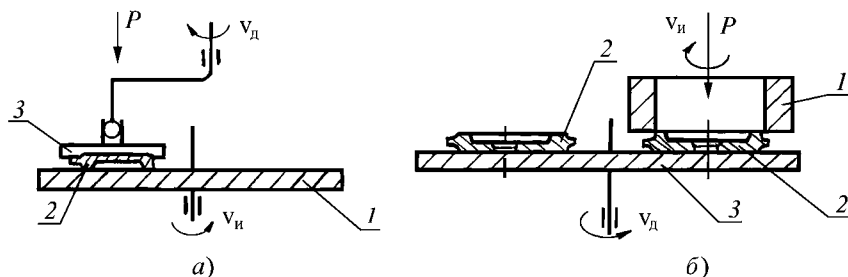


Рис. 5.11. Принципиальные схемы притирки плоских поверхностей деталей дозирующего пакета форсунки:

1 – притир; *2* – обрабатываемая заготовка; *3* – стол (устройство для установки заготовки)

да (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 рис. 5.11. Одностороннюю и двухстороннюю обработку плоских деталей осуществляют с помощью плоского притира в виде диска (рис. 5.11, *а*) или трубчатого притира (рис. 5.11, *б*).

Применяются *ручная* и *механическая притирки*. *Механическая притирка* плоских наружных поверхностей выполняется на однодисковых и двухдисковых притирочных станках с неподвижными и подвижными притирами. 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 табл. 5.3 приведены точностные характеристики и шероховатость плоских поверхностей после притирки.

5.3. Характеристика поверхностей, обработанных притиркой

Вид обработки	Припуск на притирку, мм	Погрешность обработки, мкм	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, полотна 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, порошкостовыми) 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 ГТД, 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 параметр шероховатости поверхности $Ra = 0,02...0,63$ 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 параметр шероховатости $Ra \leq 1,25$ 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 ГТД.

Глава 6

ОБРАБОТКА ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В производстве авиационных двигателей 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. 6.1, а). Метод копирования целесообразно применять, когда профиль режущей кромки близок к форме производящей линии.

При обработке **методом обката** (рис. 6.1, б) производящая линия 2 получается как огибающая нескольких последовательных положений режущей кромки 1 при ее обкатывании по получаемой производящей линии.

При обработке **методом следа** (рис. 6.1, в) 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).

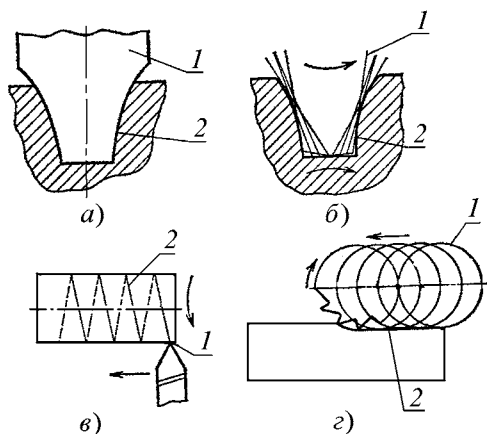


Рис. 6.1. Методы образования производящих линий

При обработке **методом касания** (рис. 6.1, г) 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 коническими поверхностями 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

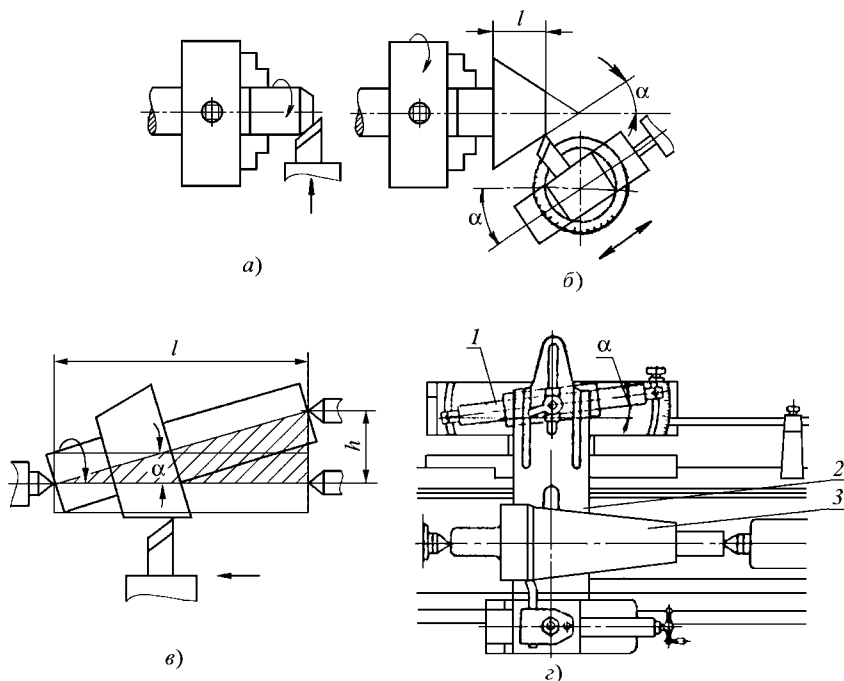


Рис. 6.2. Схемы обработки конических поверхностей на токарном станке

круговые конусы. Угол 2α 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 чаще всего обрабатывают на токарных и 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. 6.2, *а*).

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. 6.2, *б*).

Обработку **длинных конических поверхностей** деталей с углом α не выше 11° , установленных в центрах (рис. 6.2, *в*), выполняют путем смещения корпуса задней бабки на расстояние h в поперечном направлении. Смещение определяется зависимостью $h = l \sin \alpha$, где l – расстояние между центрами.

Обработку длинных конических поверхностей с точными углами конуса (α до 10°) выполняют с использованием конусной линейки 1 , закрепляемой на станине станка (рис. 6.2, *г*). Перед обработкой ходовой винт поперечного движения подачи отключается от салазок 2. Салазки связываются тягой с конусной линейкой, которая поворачивается на угол α . При включении продольного движения подачи суппорта салазки получают одновременное продольное и поперечное перемещение, при этом резец будет двигаться под углом α , равным углу поворота копировальной линейки. На детали 3 обеспечивается конус с углом 2α .

Конические поверхности могут обрабатываться на многорезцовых станках, полуавтоматах и автоматах. Для автоматической обработки конических поверхностей деталей, например, дисков компрессора, зубчатых колес и других деталей ГТД, 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 ГТД за одну установку, например, дисков компрессора, обеспечивают повышение производительности на 30 и более процентов с обеспечением стабильного качества.

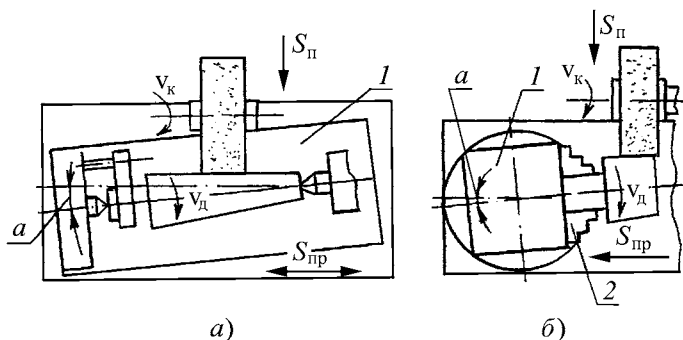


Рис. 6.3. Схемы обработки наружных конических поверхностей на шлифовальных станках

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 I на половину угла конусности. Обработка выполняется осциллирующим методом (рис. 6.3, а).

При длине образующей конуса больше, чем ширина (высота) круга, обработка выполняется по схеме, показанной на рис. 6.3, б. Передняя бабка I поворачивается относительно продольной оси стола на угол α 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 $S_{п}$ 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 α . 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 ГТД 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 *способом свободного притира* (рис. 6.4, а), 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. 6.4, б). При доводке происходит профилирование контактирующих поверхностей детали и инструмента (притира) с одновременным обеспечением точности положения обрабатываемой поверхности относительно баз детали.

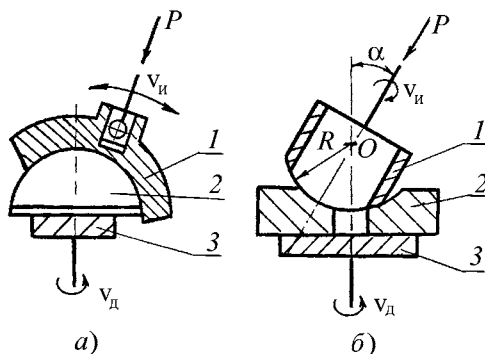


Рис. 6.4. Принципиальная схема доводки сферических поверхностей:

1 – притир; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – стол (устройство для установки заготовки)

Точность координирования определяют схема и точность относительного расположения детали и инструмента. При пересечении осей их вращения под углом α 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.

Для доводки сферических поверхностей применяется также способ комбинированной обработки, сочетающий признаки свободного и ориентированного притиров.

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 α меньше 45° , $v_n/v_d \approx \cos \alpha$. Для наружных сферических обрабатываемых поверхностей угол близок к 90° . 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.

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	
	Окончательная	24А М10 24А М5	
Алюминиевые сплавы	Предварительная	24А М14 24А М10	Медь М0, М1
	Окончательная	24А М7 24А М5	

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, сконструированные 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 табл. 6.1 приведены зернистость и материалы доводочных паст и притиров.

Режимы доводки сферических поверхностей деталей из стали и алюминиевых сплавов приведены в табл. 6.2.

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		0,4	0,3
	24А М14			0,6
	24А М10			0,6
	24А М5			0,6
Алюминиевые сплавы	24А М14	Медь М0, М1	0,2	0,3
	24А М7		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).

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 детали. Обработка выполняется при соответствующих скорости v продольного суппорта, угловой скорости ω_2 вращения резца и угловой скорости ω_1 вращения заготовки. Угловая скорость ω_2 может быть постоянной или переменной в зависимости от конфигурации обработки и припусков. По такой схеме точения можно обрабатывать, напри-

мер, элементы плунжеров механизма автоматического регулирования.

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 следующие 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 подачи. На практике наиболее широко применяются следящие системы

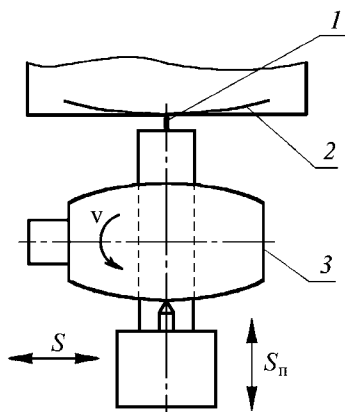


Рис. 6.5. Схема обработки фасонной поверхности по разметке

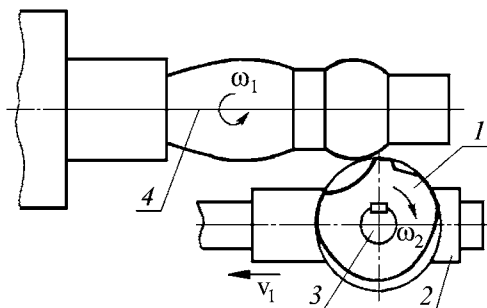


Рис. 6.6. Схема обработки фасонной поверхности вращения методом обката резца

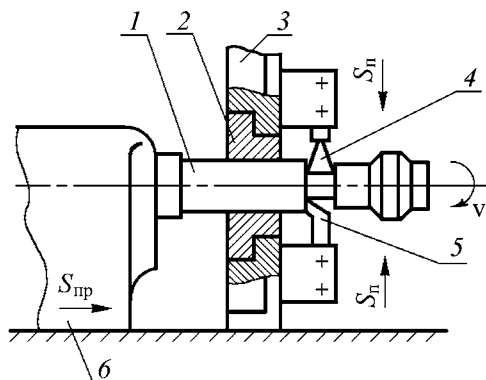


Рис. 6.7. Схема обработки фасонной поверхности вращения на токарном полуавтомате

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 рис. 6.7.

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 подачи управляют кулачки распределительного вала полуавтомата. Сочетание продольной подачи прутка с поперечной подачей резцов по-

звояет 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 группы фасонными резцами выполняется на несколько заниженных режимах (подача $S_n = 0,01 \dots 0,08$ мм/об, скорость резания $v = 20 \dots 40$ 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 двигателей, 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 трудно-

обрабатываемых 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 выбирают 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 (деталей) 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 (6...9-го квалитетов) и параметром шероховатости $Ra = 0,4...1,6$ 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 6...7-му квалитетам, а параметр шероховатости поверхности $Ra = 0,5...1,25$ мкм.

Машинное время шлифования определяется по формулам: с продольным движением подачи

$$T_{\text{маш}} = \frac{L_{\text{ст}} + z_i}{n S_{\text{пр}} S_{\text{поп}}} k, \text{ мин};$$

врезанием

$$T_{\text{маш}} = \frac{z_i}{n S_{\text{поп}}} k, \text{ мин};$$

плоском, периферией круга

$$T_{\text{маш}} = \frac{B z_i}{S_{\text{поп}} n_{\text{дв.х}} S_{\text{в}}} k, \text{ мин.},$$

где $L_{\text{ст}}$ – длина хода стола станка, мм; z_i – припуск на сторону обрабатываемой поверхности, мм; n – частота вращения шпинделя, 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 параметр шероховатости обработанной поверхности $Ra = 1...2,5$ мкм.

Применяемые в авиадвигателестроении прокладки, проставки и др. 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 деталь (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 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 двигателей. 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 двигателей применяются следующие методы обработки: *фрезерование, абразивное и алмазное шлифование кругами и лентами, электрохимическая обработки, полирование.*

Обработка сложных поверхностей выполняется:

- 1) *копированием* с использованием объемных копиров, графических копиров с видами отдельных сечений профиля и др.;
- 2) *кинематической* настройкой при помощи механизмов-построителей, имеющих конечное звено, воздействующее на режущий инструмент или копировальный палец, формируя необходимую поверхность;
- 3) *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;
- 4) *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, контактирую-

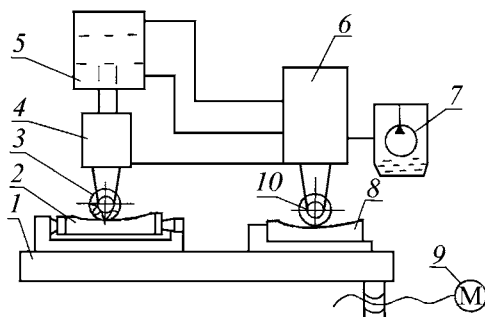


Рис. 6.8. Принципиальная схема гидравлического следящего привода фрезерного станка

шего 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 рис. 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.

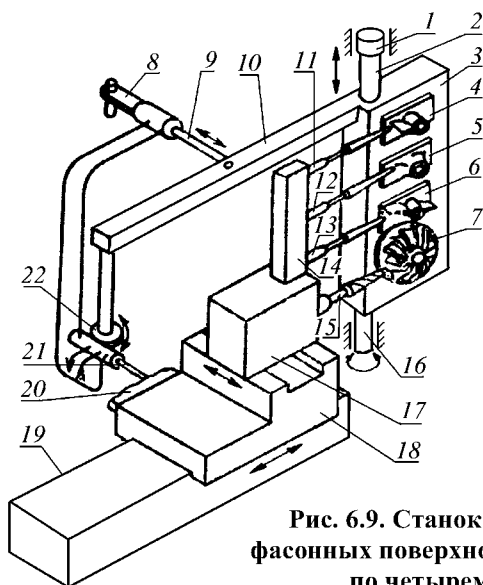


Рис. 6.9. Станок для обработки фасонных поверхностей крыльчатки по четырем копиям

Сложные поверхности могут быть получены за счет *четырех основных типов перемещений копира и обрабатываемой заготовки*:

- 1) поступательное перемещение копира и заготовки;
- 2) вращательное перемещение копира и заготовки;
- 3) поступательное перемещение копира, вращательное перемещение заготовки;
- 4) вращательное перемещение копира, поступательное перемещение заготовки.

При обработке сложных поверхностей могут применяться четыре и более копира. 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 копиям изображен на рис. 6.9.

В копировально-фрезерном станке, работающем по четырем копиям, 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 копировальные устройства 11, 12, 13. На стол 3, находящийся на цапфах 16, установлены копиры 4, 5, 6 и обрабатываемая деталь 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 детали 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.

Фрезерование боковых поверхностей лопаток объемной кризны, 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).

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, ГФ 2005 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 $v_d = 25 \dots 50$ 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 по-

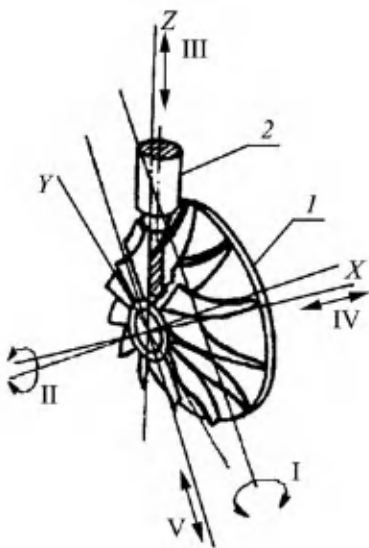


Рис. 6.10. Схема обработки боковых поверхностей лопаток крыльчатки:

1 – обрабатываемая заготовка;
2 – фреза

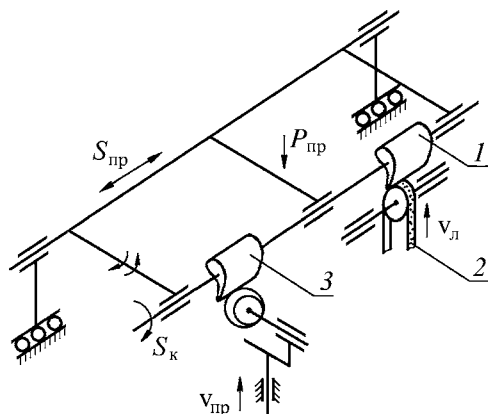


Рис. 6.11. Схема ленточного шлифования профиля пера лопаток компрессора:

1 – лопатка; 2 – абразивная лента; 3 – копир; $v_{пр}$ – скорость продольного перемещения ленты

явления 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 (лопаткой) и абразивной лентой, которое определяется весом стола и регулируется компенсирующими пружинами.

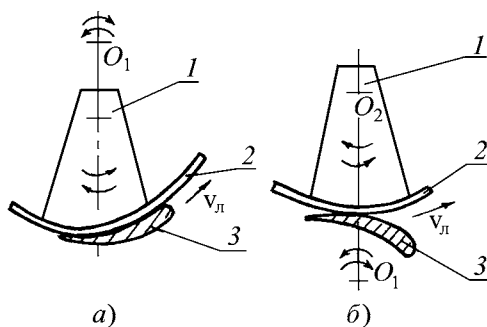


Рис. 6.12. Схема процесса ленточного шлифования корыта (а) и спинки (б) лопатки

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).

Спинка и корыто обрабатываются раздельно. 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.

6.3. Средний объем металла, снимаемого при обработке лопаток шлифованием

Материал лопатки	Вид ленточного шлифования	Средний объем металла, снятого одной лентой, г/см ³		Среднее число лопаток, обработанных одной лентой, шт	
		по корыту	по спинке	по корыту	по спинке
BT8	обычное	76	71	5	4
	прерывистое	108	103	8	7
BT9	обычное	84,2	79,8	6	5
	прерывистое	120,6	116,9	9	8

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 табл. 6.3 приведены сравнительные данные по объему металла, снимаемого при обработке лопаток из титановых сплавов.

Сложной и трудоемкой операцией при изготовлении лопаток турбин и компрессора, крыльчаток, вентиляторов, роторов и других деталей ГТД является обработка сопряженных по радиусу поверхностей, например, прикомлевых участков, обработка которых может осуществляться по методу обкатывания или копирования.

Метод обкатывания (рис. 6.13, а) целесообразно применять при обработке выпуклых поверхностей прикомлевого участка лопатки со стороны спинки. При этом методе лопатке сообщается возвратно-поступательное движение подачи обката $S_{об}$.

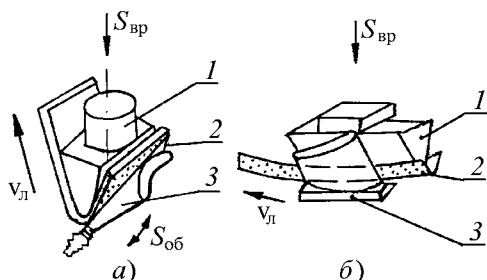


Рис. 6.13. Схема обработки прикомлевого участка лопаток ленточным шлифованием:

а – лопатки турбины со стороны спинки; *б* – лопатки компрессора со стороны корыта; 1 – копира; 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 рис. 6.14 приведены принципиальная и гидравлическая схемы 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 скоро-

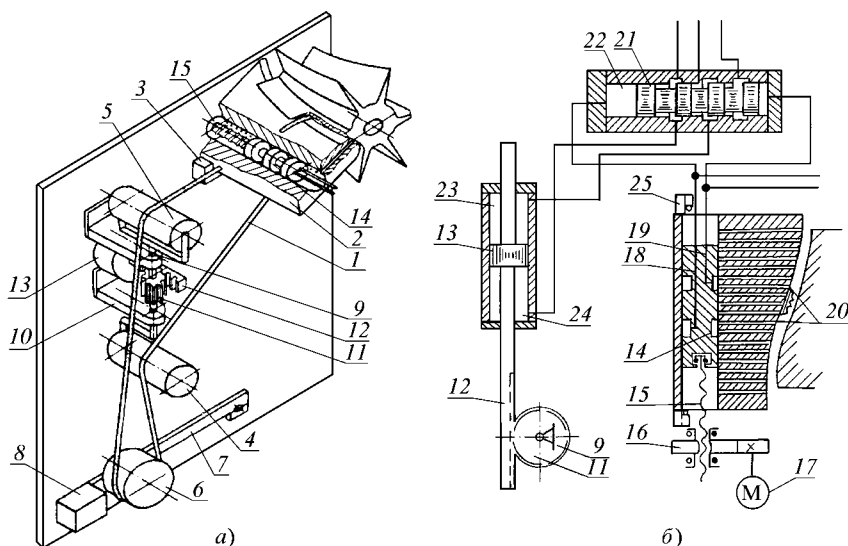


Рис. 6.14. Схема станка для ленточного шлифования лопаток вентилятора:

a – принципиальная; *б* – гидравлическая

сти поперечной подачи ленты, выполненный в виде плунжера 14, перемещаемого при помощи винта 15 и зубчатой пары 16 посредством двигателя 17 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.

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 копире, подается по обе стороны полотна к вращающейся ленте. Затем включается привод попереч-

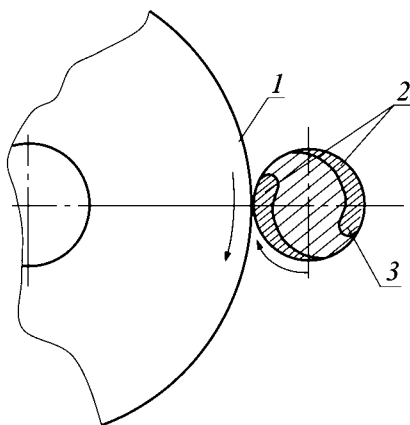


Рис. 6.15. Схема шлифования пера лопаток профильным кругом методом врезания:

1 – шлифовальный круг; *2* – обрабатываемая лопатка; *3* – оправка

ной 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), вследствие чего полотно абразивной ленты перемещается по поверхности роликов и, соответственно, поверхности копира вверх. При достижении крайнего положения плунжер нажимает на концевой выключатель *25*, 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.

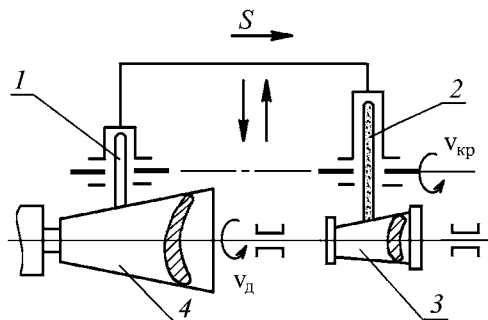


Рис. 6.16. Схема шлифования лопаток строчками по объемному копиру:

1 – ролик; 2 – алмазный круг; 3 – лопатка; 4 – копи

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. 6.15).

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 детали 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 копирувально-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 раздельно по всей ширине пера. При наличии у лопаток полок или хвостовиков их обрабатывают на профилированных 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 МО16-100 % концентрации при съеме 80 г сплава ВТЗ-І с одной детали составляет 4 мкм, что позволяет получать значительно меньшую погрешность обрабатываемой поверхности детали, чем погрешность от износа абразивного круга или ленты.

На рис. 6.16 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 детали 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 ста-

лей 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.

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 ВТЗ-1 и ВТ5-1 от 35 до 62 м/с при постоянном значении других режимов шлифования ($S_{\text{пр}} = 0,2 \text{ м/с}$; $S_{\phi} = 104,76 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$ – круговая подача детали; $t = 0,1 \text{ мм}$) приводит к появлению в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений, максимальная величина которых по корыту лопатки составляет 294 МПа.

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 рис. 6.17. 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

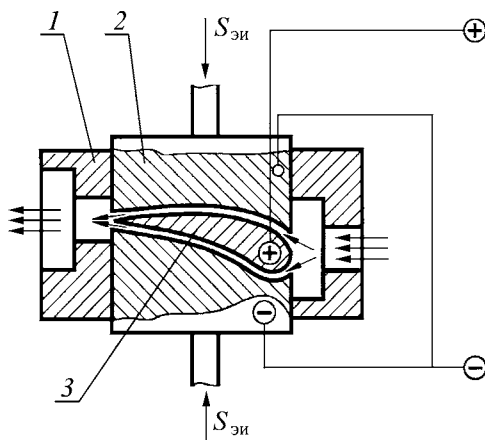


Рис. 6.17. Схема электрохимической обработки пера лопатки ГТД:

1 – рабочая камера; 2 – электрод-инструмент (катод);

3 – лопатка (анод)

при пропускании тока большой плотности интенсивно растворяется металл с поверхности анода. Интенсивная прокачка электролита между анодом (лопаткой) и катодом обеспечивает удаление продуктов анодного растворения.

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, виброконтантное 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

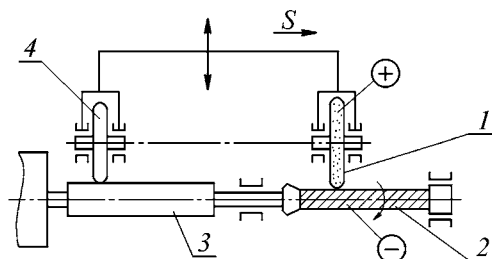


Рис. 6.18. Схема обработки профиля пера лопатки компрессора электроалмазным шлифованием по копиру:

1 – алмазный токопроводящий круг; 2 – лопатка;

3 – копир; 4 – ролик

сплавов. Схема обработки профиля пера лопаток компрессора электроалмазным шлифованием приведена на рис. 6.18.

При электроалмазном шлифовании профиля пера лопатки 2 на одной оси с алмазным токопроводящим кругом 1 устанавливается ролик 4, обкатывающийся по эквидистантному профилю копира 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 параметр шероховатости поверхности $Ra = 0,32 \dots 2,5$ мкм.

Глава 7

ОБРАБОТКА РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

7.1. ВИДЫ РЕЗЬБ

Резьбы бывают цилиндрические и конические, наружные и внутренние. Для изготовления наружной резьбы применяют: резцы, гребенки, плашки, самораскрывающиеся резбонарезные 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° для метрической резьбы и 55° – для дюймовой), или дисковые (рис. 7.1)

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 нарезку резьб точного класса, 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 рис. 7.2, а поперечная подача должна быть в направлении, перпендикулярном к оси резьбовой поверхности. На рис. 7.2, б она выполняется под углом. Для этого верхние салазки суппорта должны быть повернуты на

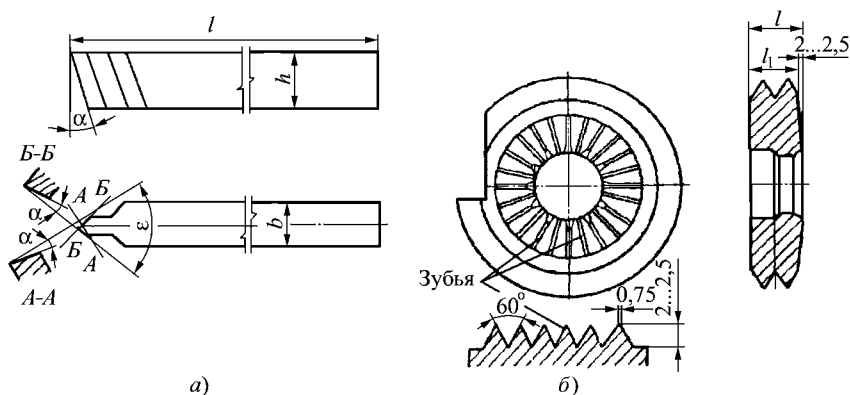


Рис. 7.1. Резьбовые резцы

30° 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 рис. 7.2, в показана работа по такому же способу, как и на рис. 7.2, б, 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. 7.2, а).

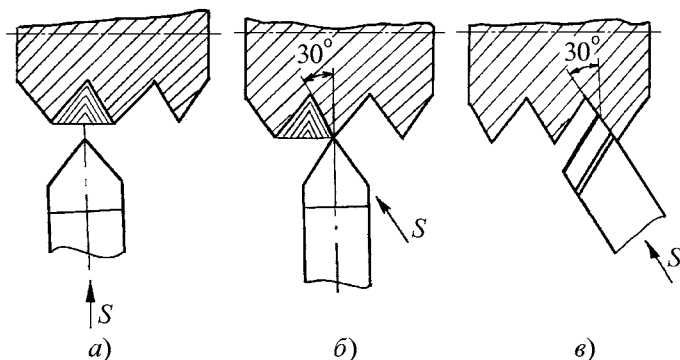


Рис. 7.2. Схемы нарезания резьбы

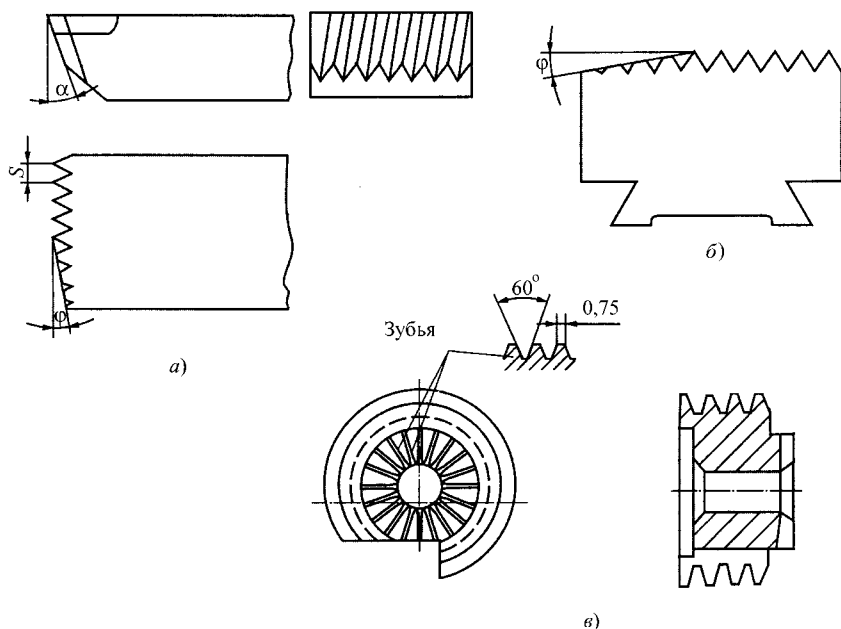


Рис. 7.3. Виды резьбовых гребенок:

a – плоская гребенка; *б* – призматическая гребенка;
в – круглая гребенка

При нарезании резьбы одним и тем же резцом, с начала и до конца, его режущая кромка быстро притупляется и 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.

Применяется этот метод в серийном производстве. Он более производительен. Точность обработки – до среднего класса. Этим методом нельзя нарезать резьбу на деталях, у которых резьба до-

ходит 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 проточек. Внутренние резьбы нарезаются только круглыми гребенками.

7.3. ВИХРЕВОЕ НАРЕЗАНИЕ РЕЗЬБЫ

Вихревое нарезание наружной 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 пластиной твердого сплава. Головка расположена эксцентрично (величина эксцентриситета a) относительно оси обрабатываемой детали, 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 детали при перемещении вращающейся головки вдоль оси на величину шага резьбы на детали будет образовываться один виток резьбы.

При нарезании внутренней резьбы деталь закрепляется в патроне, а резец в оправке головки, которая устанавливается на суппорте станка (рис. 7.5)

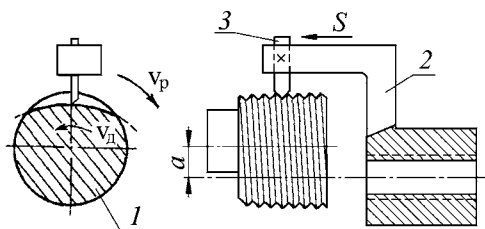


Рис. 7.4. Вихревое нарезание наружной резьбы:

1 – обрабатываемая заготовка; 2 – резцовая головка; 3 – резец

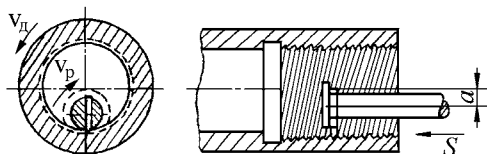


Рис. 7.5. Вихревое нарезание внутренней резьбы

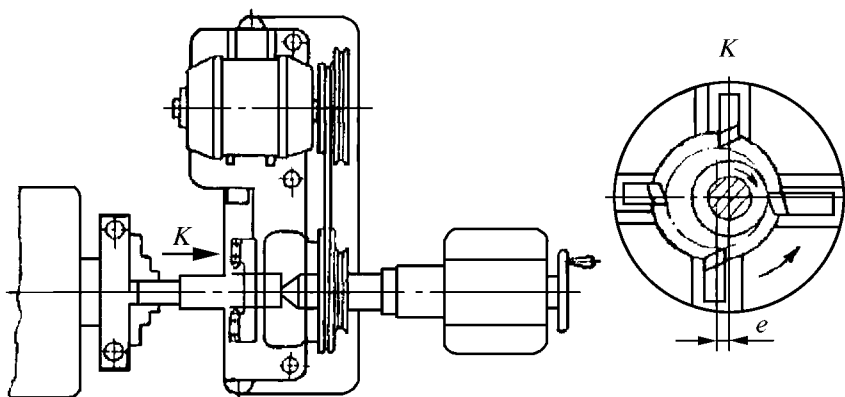


Рис. 7.6. Резцовая головка

Скорость резания при вихревом нарезании $v_p = 150 \dots 450$ м/мин.
Скорость вращения детали $v_d = 1 \dots 2$ м/мин.

Конструктивное оформление резцовой головки представлено на рис. 7.6.

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

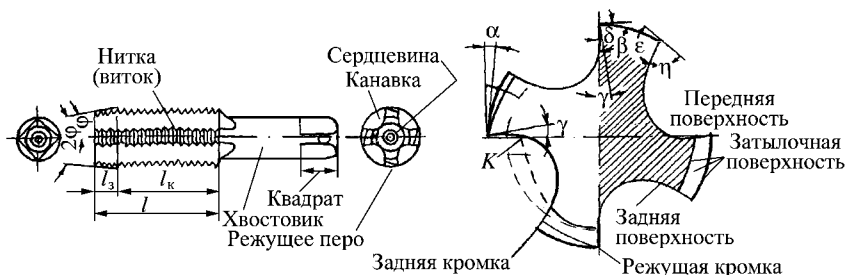


Рис. 7.7. Метчик для нарезания резьбы:

l – рабочая часть; l_z – заборная часть; l_k – калибрующая часть;
 ε – внутренний угол задней кромки; η – внешний угол задней кромки;
 параметры заборной части: ϕ – угол наклона; α – задний угол; β – угол заострения; δ – угол резания; γ – передний угол; параметры калибрующей части: 2ϕ – угол уклона; β' – угол заострения; δ' – угол резания

выпускаются диаметром до 300 мм. Метчики больших диаметров выпускаются со вставными и раздвигающимися нарезными плашками (резьбонарезные головки).

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 предназначены для резьб грубого класса и 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

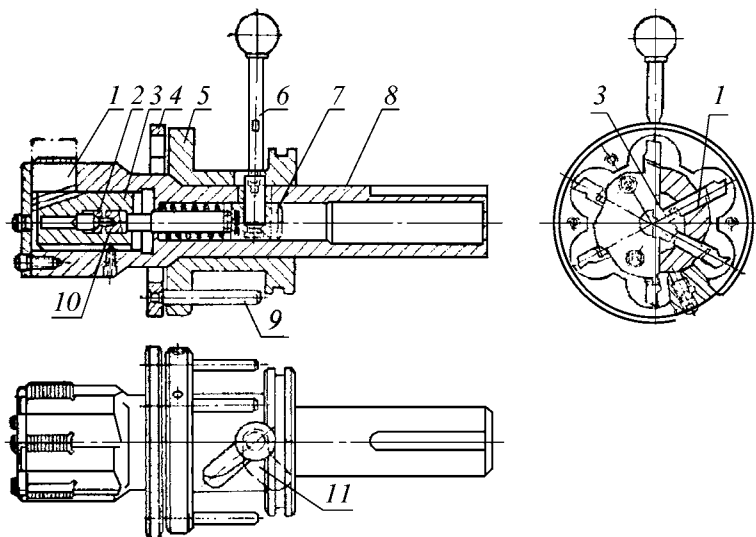


Рис. 7.8. Самораскрывающаяся резьбовая головка

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.

Нарезание **плашками** – малопроизводительный метод. Основной недостаток обработки заключается в необходимости их свинчивания по окончании нарезания резьбы, что вызывает затраты времени, снижает производительность и ухудшает качество поверхности резьбы. Скорость резания 2...4 м/мин. Плашки можно шлифовать при диаметре резьбы свыше 25 мм. Плашки обеспечивают грубый класс точности резьбы, а шлифованные плашки – средний класс точности.

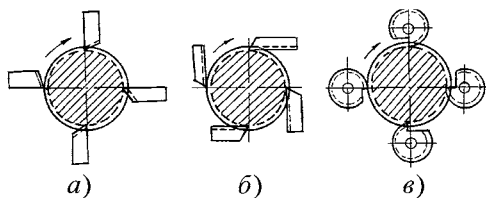


Рис. 7.9. Нарезание резьбы резьбонарезными головками

Более производительным является нарезание резьбы **резьбонарезными головками**, так как благодаря автоматическому раскрыванию головки их обратного свинчивания не требуется. Существуют головки с призматическими плашками (радиальные – рис. 7.9, *а* и тангенциальные – рис. 7.9, *б*) и круглыми плашками (рис. 7.9, *в*). Скорость резания при работе резьбонарезными головками 14...18 м/мин, точность резьбы – средний и даже точный классы.

7.5. ФРЕЗЕРОВАНИЕ РЕЗЬБЫ

Осуществляется двумя способами: дисковой и групповой фрезами. Фрезерование **групповой фрезой** применяется для коротких резьб с мелким шагом (рис. 7.10, *а*, *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. 7.10, *в*) применяется при нарезании резьбы с большим шагом и крупным профилем.

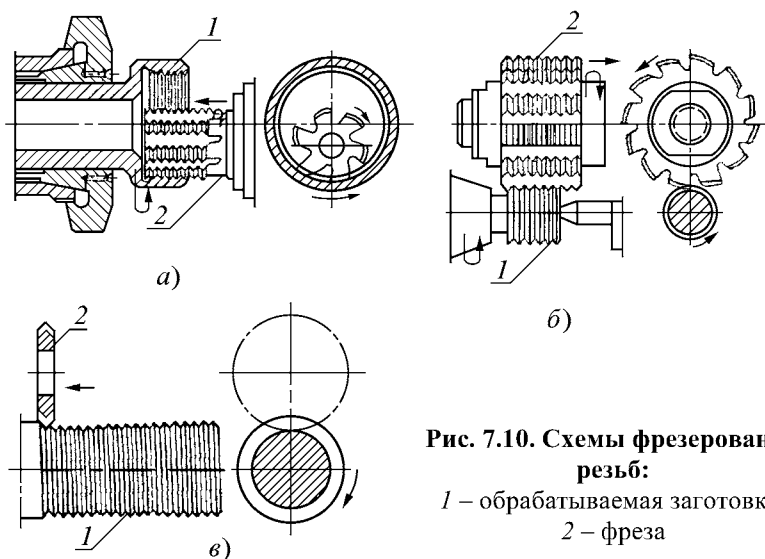


Рис. 7.10. Схемы фрезерования резьб:

1 – обрабатываемая заготовка;
2 – фреза

Нарезание может выполняться за один, два или три прохода. Профиль фрезы соответствует профилю резьбы. Ось фрезы располагается по отношению к оси детали под углом, равным углу наклона резьбы. При нарезании резьбы фреза вращается и имеет поступательное движение вдоль оси детали (за один оборот детали перемещение на величину шага).

7.6. ШЛИФОВАНИЕ РЕЗЬБЫ

Шлифование резьбы одно- или многониточным кругом аналогично фрезерованию соответственно дисковой и групповой фрезой.

Шлифование односторонним кругом осуществляется при продольном перемещении детали или круга (рис. 7.11, б). Многониточные круги применяют преимущественно при шлифовании резьбы на деталях с короткой нарезанной частью (не более 40 мм).

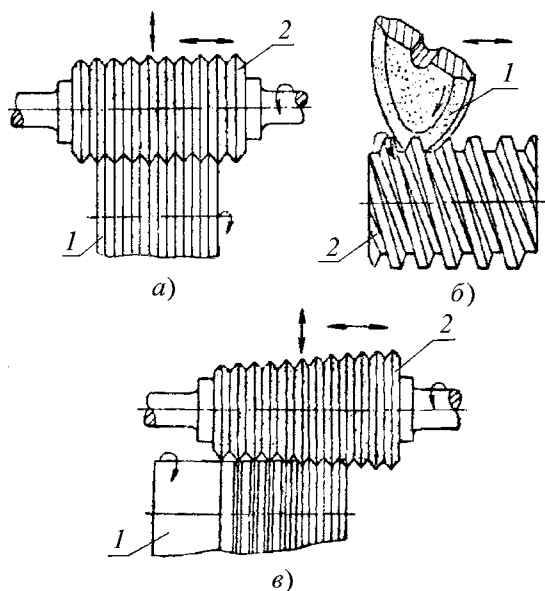


Рис. 7.11. Схемы шлифования резьб:

1 – шлифовальный круг; *2* – деталь

Ширина шлифовального круга больше длины шлифуемой резьбы на 2...4 витка (рис. 7.11, *а, в*). На круге делается кольцевая резьба с требуемым шагом. Шлифование производится при продольном передвижении детали 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 точного класса.

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

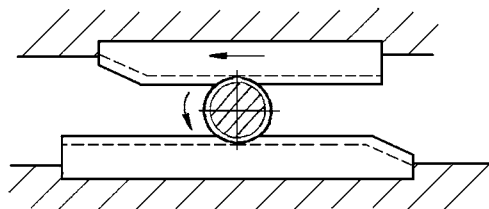


Рис. 7.12. Накатывание резьбы плоскими плашками

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.

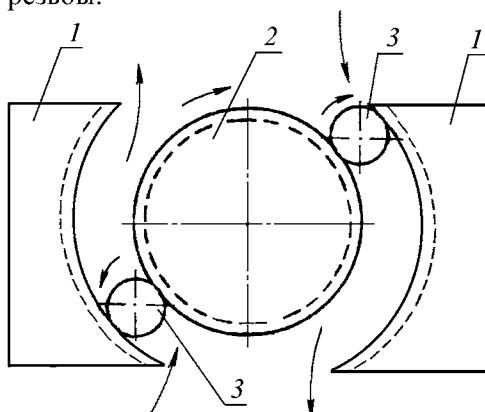


Рис. 7.13. Накатывание резьбы круглыми плашками:

1 – неподвижные плашки; 2 – вращающаяся плашка;
3 – обрабатываемые заготовки

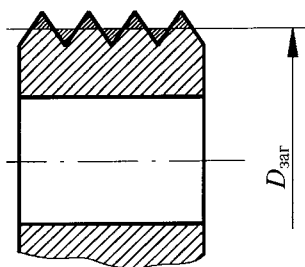


Рис. 7.14. Схема расположения металла при накатывании

Плоскими плашками накатывают преимущественно болты и винты. Точность – грубый класс. На резьбонакатных станках, работающих плоскими плашками, можно накатывать резьбу диаметром от 2 до 25 мм длиной до 125 мм.

На рис. 7.13 представлен пример *накатывания резьбы круглыми плашками*. Одновременно обрабатываются 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).

Наибольший шаг резьбы при накатывании круглыми плашками – до 6 мм. Диаметр накатываемых изделий – от 6 до 100 мм.

Глава 8

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. 8.1, *а*);
- 2) цилиндрические зубчатые передачи внутреннего зацепления с параллельными осями (рис. 8.1, *б*). Эти два вида передач осуществляются с прямозубыми и с косозубыми зубчатыми колесами;
- 3) передача с пересекающимися осями под различными углами. Применяются в основном конические ортогональные передачи под углом 90° , осуществляемые прямозубыми коническими зубчатыми колесами, косозубыми (с наклонным зубом) и с круговым зубом (рис. 8.1, *в*).

Кроме того, *используются передачи с перекрещивающимися осями*:

- 1) коническая гипоидная передача (рис. 8.1, *г*) с гипоидным смещением оси колеса;
- 2) винтовая зубчатая передача, осуществляемая из цилиндрических косозубых колес (рис. 8.1, *д*).
- 3) червячная зубчатая передача, осуществляемая червячным колесом, находящимся в зацеплении с цилиндрическим (рис. 8.1, *ж*) или глобоидным (рис. 8.1, *з*) червяком;

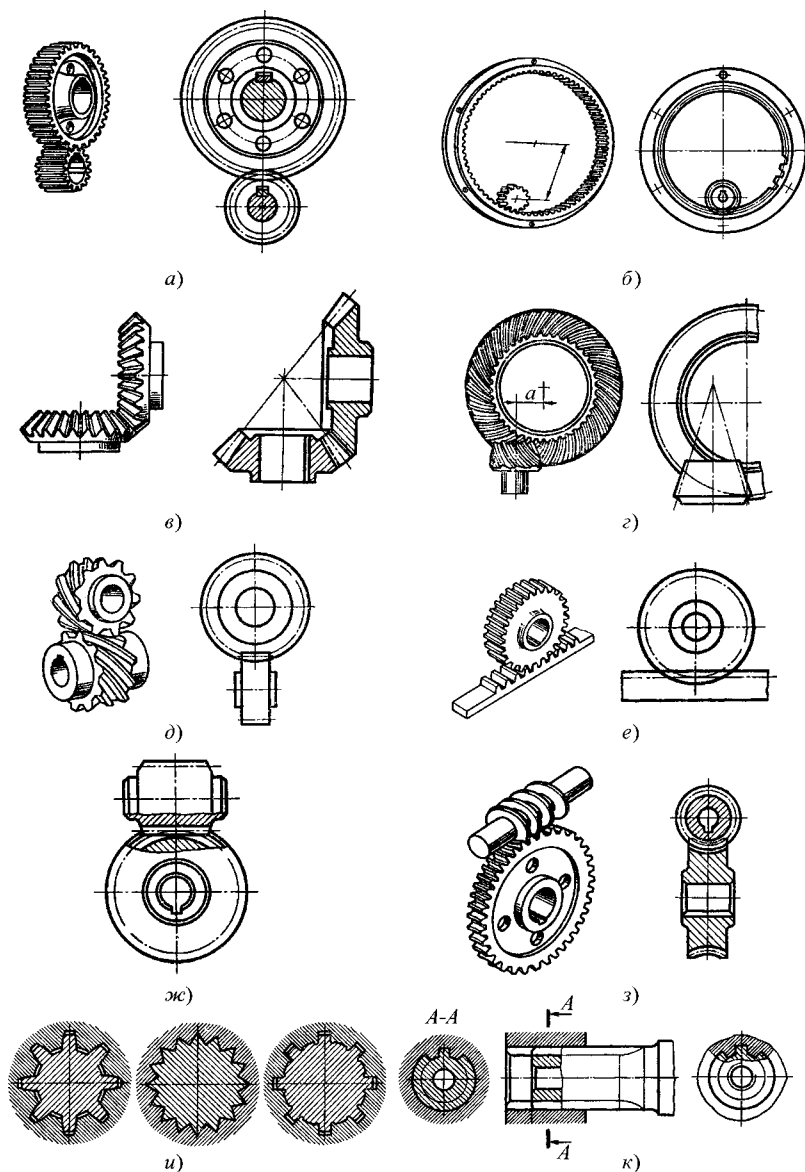


Рис. 8.1. Виды зубчатых передач

4) реечная зубчатая передача (рис. 8.1, *е*), 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. 8.1, *и*, *к*).

Применяются преимущественно зубчатые зацепления с эвольвентным профилем зуба, имеющим неоспоримые преимущества в технологическом отношении по сравнению с профилями, выполненными по циклоиде и по дугам окружности (зацепление Новикова).

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 *а*, *б*, *в*, *и*, *к* (см. рис. 8.1). Среди цилиндрических зубчатых передач наибольшее количество (более 70 %) – прямозубые, большинство конических передач с круговым зубом при современной 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 относятся 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 $m = 2 \dots 8$ 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, цементируемых и азотируемых сталей типа 12Х2Н4А, 20Х3МВФА (ЭИ415), 12Х2НВФМА (ЭИ712М), 13Х3НВФМБ (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 $h = 2,5m$;
- высокая точность зубчатых колес (не ниже степени точности 5-4-4 по ГОСТ1643–81);
- 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 высоколегированных сталей типа 18Х2НЧМА, 14ХГС2МА-Ш, 38ХНМФА;
- большие 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 авиационных 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 прошлифованных 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.

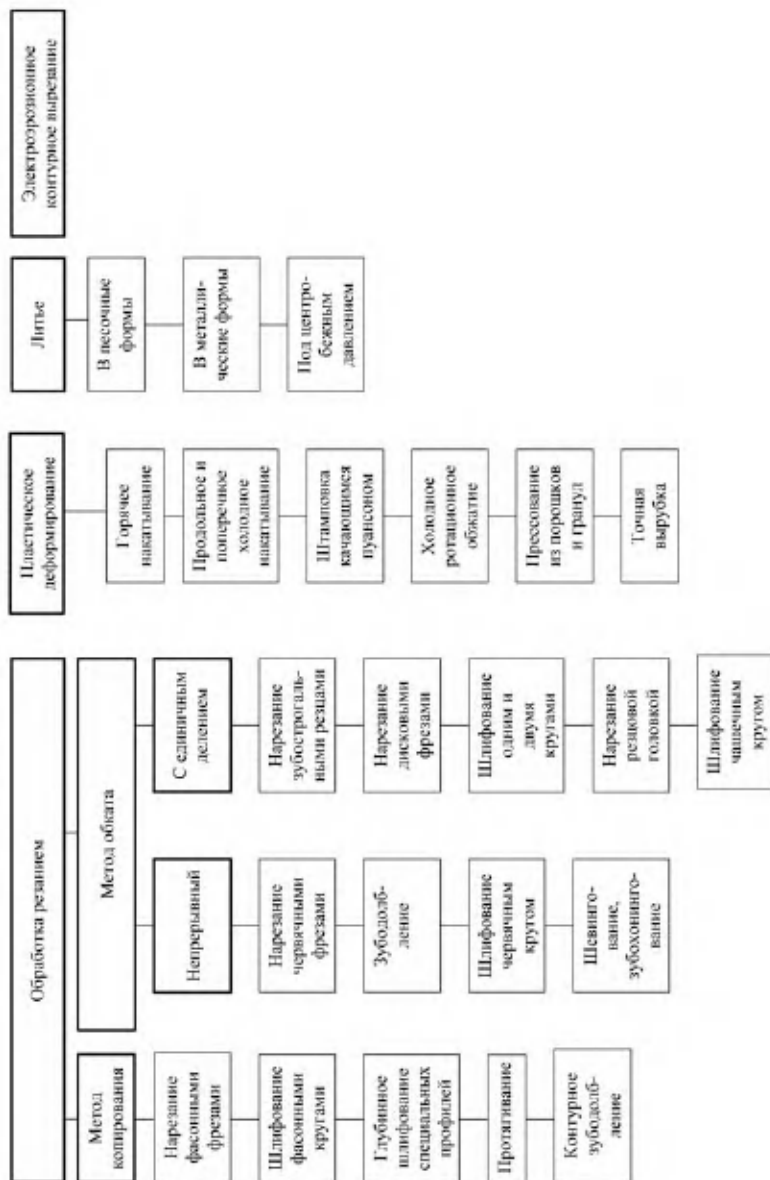
После закалки требуется операция исправления шлиц притиркой или шлифованием, после чего с выверкой от исправленного шлицевого венца следует операция восстановления фасок – базовых поверхностей для окончательного шлифования базовых шеек и зубчатого венца. После операций шлифования для ответственных зубчатых 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 табл. 8.1 приведены основные и наиболее эффективные методы образования профилей зубьев.

Новый высокоточный *метод электроэрозионного контурного вырезания проволокой по программе*, обеспечивающий шерохова-

8.1. Методы формообразования поверхностей зубьев зубчатых колес



тость 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:

- *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 шевингование конических зубчатых колес, не нашли применения в современных технологиях их производства;

- *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;

- *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 высоко-ресурсных валов из труднообрабатываемых материалов методами зубофрезерования и зубодолбления, как наиболее благоприятными для повышения усталостной прочности;

– 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.

8.4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

По конструктивным особенностям все цилиндрические зубчатые колеса можно разделить на 2 класса: *класс дисков* (рис. 8.2, а, б) и *класс валов* (рис. 8.2, в).

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. 8.2, б), т.е. не имеет достаточного выхода инструмента. На зубчатых колесах класса вал 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 (см. рис. 8.2, б) можно обработать только методом зубодолбления.

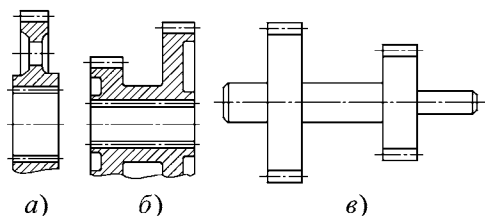


Рис. 8.2. Классификация цилиндрических зубчатых колес

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 $\alpha = 360^\circ/z$, где z – число обрабатываемых впадин. До последнего времени метод копирования считался недостаточно точным, применялся, в основном, в ремонтном деле и в случаях,

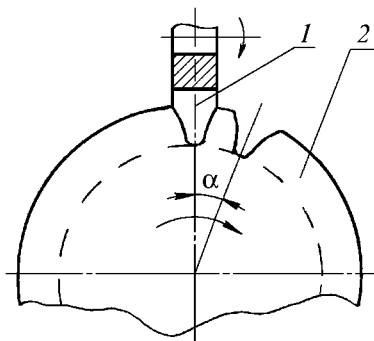


Рис. 8.3. Формообразование цилиндрического зубчатого колеса методом копирования:
1 – профильный инструмент;

2 – обрабатываемое зубчатое колесо

где другие методы неприемлемы, например, шлифование внутренних венцов шлицевых соединений. Появление специального высокоточного эльборового инструмента высокой стойкости, исключающего 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.

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, долбаки, 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 делать зуборезный инструмент более технологичным и высокоточным, упрощает его заточку и правку. Метод обкатки с использованием 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 α нарезаемого колеса (рис. 8.4).

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.

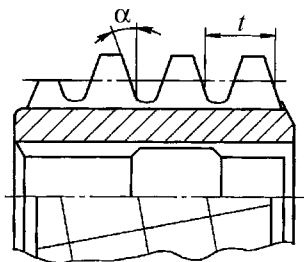


Рис. 8.4. Осевое сечение червячной фрезы для нарезания эвольвентных профилей зубчатых колес

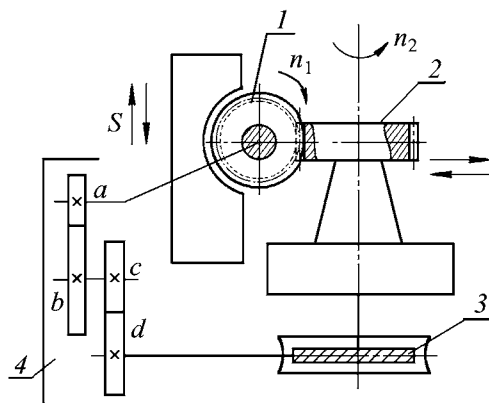


Рис. 8.5. Кинематическая схема узла вертикального зубофрезерного станка:

1 – червячная фреза; 2 – обрабатываемая заготовка;
3 – червячная передача; 4 – набор зубчатых колес (гитара деления)

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 рис. 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 шаг, на эту же величину должна повернуться обрабатываемая заготовка. Передаточное отношение между фрезой и заготовкой $i = n_1/n_2 = \kappa/z$ обес-

печивается 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:*

- 1) вращение фрезерного шпинделя с регулируемой скоростью, обеспечивающей необходимую скорость резания;
- 2) согласованное с вращением фрезы вращение стола с заготовкой зубчатого колеса для обеспечения нарезания необходимого числа зубьев z ;
- 3) осевое перемещение фрезы, обеспечивающее требуемую рабочую подачу фрезы на один оборот заготовки и обработку зубчатого колеса по всей длине зуба;
- 4) дополнительный поворот стола при нарезании косозубых зубчатых колес, обеспечиваемый настройкой дифференциального механизма;
- 5) радиальное перемещение заготовки на глубину врезания до получения необходимой высоты зуба при однопроходной или многопроходной обработке.

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:

$$T_0 = \frac{L}{S} = \frac{(B + l_1 + l_2)z}{n S_0 k}, \text{ мин},$$

где L – общая длина хода фрезерного суппорта, мм; S – рабочая подача фрезы, мм/мин; B – длина нарезаемого венца, мм; l_1 – вели-

чина 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:

$$l_1 = \sqrt{t(D_{\phi} - t)}, \text{ мм}$$

где t – глубина фрезерования, мм; D_{ϕ} – диаметр фрезы, мм.

Величину перебега для прямозубых колес принимают равной $l_2 = 3 \dots 5$ 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 $\alpha_6 = 2^\circ$.

В основном долбяки изготавливают дисковой и хвостовой конструкции (рис. 8.6). Хвостовые долбяки применяются для профилирования внутренних венцов малого диаметра шлицевых соединений.

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 поджи-

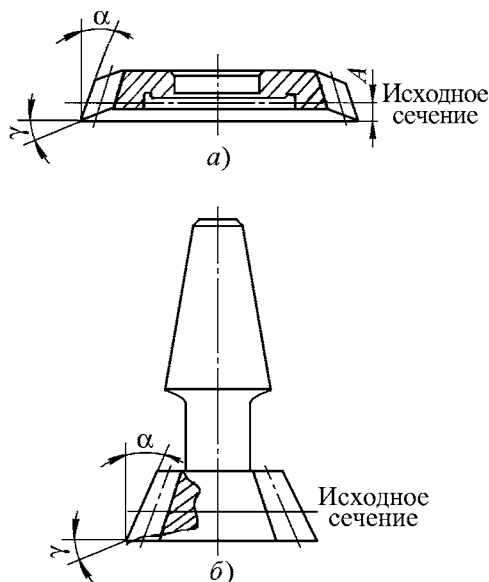


Рис. 8.6. Конструктивное выполнение долбяков:

а – дисковый долбяк; *б* – хвостовой долбяк

мом задним подвижным центром, обеспечивая выверку соосности детали с долбяком. При производстве валов ГТД повышенных длинновых габаритов, а также деталей, имеющих далеко утопленные от торца шлицевые венцы, альтернативы горизонтально-долбежным станкам нет.

Процесс зубодолбления со всеми необходимыми движениями детали и инструмента, а также режимами аналогичен процессу на станках вертикальной схемы.

Наиболее распространены на заводах авиадвигателестроения горизонтально-долбежные станки фирмы "Феллод" (США).

Для выполнения процесса зубодолбления должны быть осуществлены следующие движения (рис. 8.7):

1) вращения заготовки 1 и долбяка 2, согласованные между собой гитарой деления 3 или электронным механизмом;

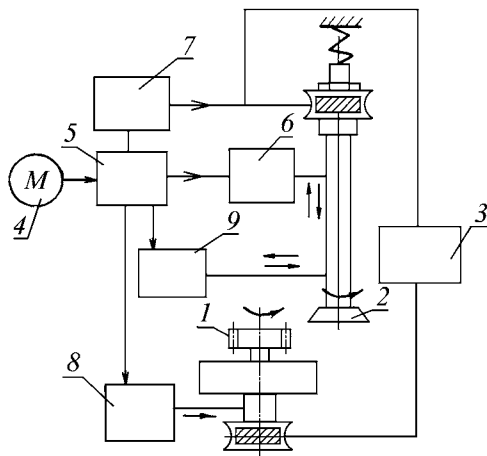


Рис. 8.7. Принципиальная структурная схема зубодолбежного станка

2) 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;

3) радиальное врезание инструмента в заготовку, настраиваемое с помощью механизма радиального врезания и гитары радиальных подач 8;

4) отвод шпинделя с долбяком на каждом обратном его ходе с помощью механизма отвода 9.

Основное время при зубодолблении определяется по формуле:

$$T_0 = \frac{\pi m z}{nS} i + \frac{h_1}{nS_{\text{рад}}}, \text{ мин},$$

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 авиационных зубчатых колес ГТД, подвергаемых химико-термической обработке и имеющих высокую поверхностную твердость по профилю зуба ($HRC \geq 60$), является **зубошлифование**. С помощью процесса зубошлифования достигается высокая точность обработки (4...6 степень точности по ГОСТ 1643–81) и параметр шероховатости поверхности в пределах $Ra = 0,32 \dots 0,63$ 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 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 рис. 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 по

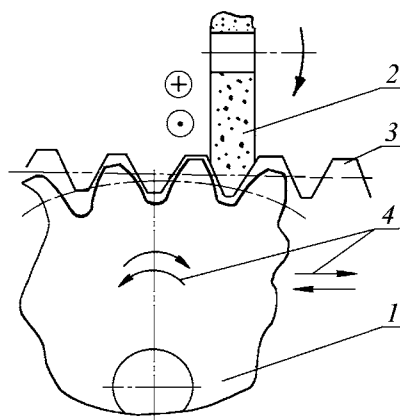


Рис. 8.8. Схема зубошлифования конусной частью дискового круга:

1 – обрабатываемое зубчатое колесо; 2 – дисковый двусторонний конусный круг; 3 – воображаемый производящий режущий исходный контур, образованный кругом; 4 – движения обкатки и деления

данному методу, выпускают также фирмы "Нейлс" и "Хефлер" (Германия), "Рейсхауер" (Швейцария). В авиационном двигателестроении метод нашел ограниченное применение.

Наиболее широко в авиационном двигателестроении применяется **метод шлифования тарельчатыми кругами** с единичным делением (метод фирмы "МААГ") и метод шлифования червячным абразивным кругом.

На рис. 8.9 показана схема шлифования тарельчатыми кругами по двум методам.

1. *Метод шлифования с наклоном оси шлифовального круга на угол $\alpha = 15 \dots 20^\circ$.* 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.

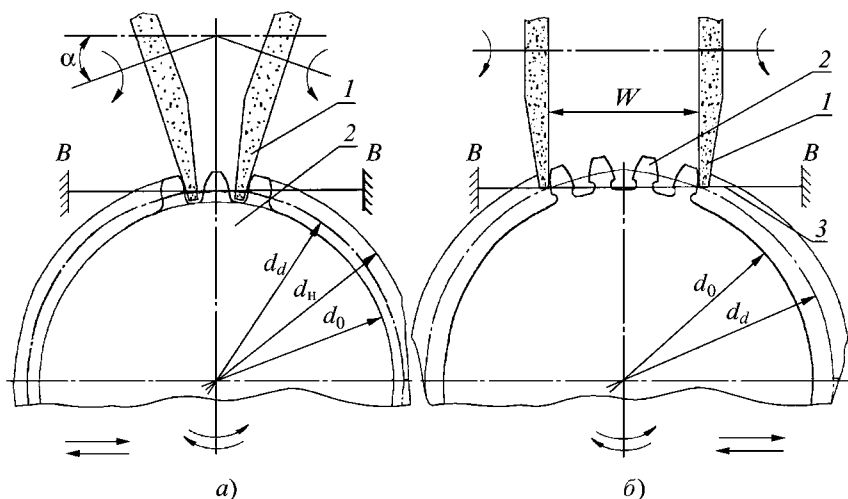


Рис. 8.9. Схема зубошлифования тарельчатыми кругами:

a – 15-градусный метод; *б* – 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

$$d_n = d_d \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_{\text{ш}}}.$$

Для косозубых зубчатых колес

$$d_n = \frac{m_n z}{\sqrt{\left(\frac{\cos \alpha_{\text{ш}}}{\cos \alpha_0}\right)^2 - \sin^2 \beta}},$$

где d_n – диаметр обкатного ролика; d_d – делительный диаметр, равный mz ; α_0 – угол зацепления обрабатываемой детали; $\alpha_{\text{ш}}$ – угол

наклона кругов (угол шлифования); m_n – нормальный модуль; β – угол наклона зуба на делительном диаметре.

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 В-В. 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 ощущается, 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 $\cos \lambda_{\text{ш}} = 1$ 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 теоретической 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 "МАОГ" (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 в авиационном двигателестроении. 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.

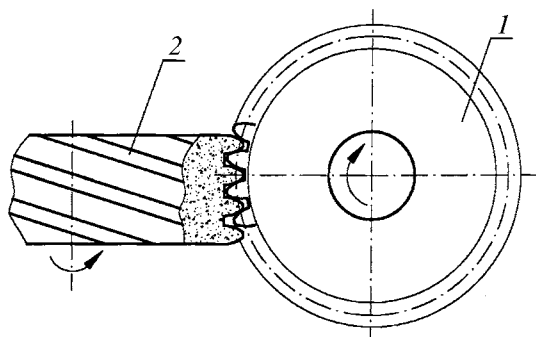


Рис. 8.10. Схема зубошлифования абразивным кругом:

1 – обрабатываемое зубчатое колесо, 2 – червячный абразивный круг

Метод отличается наивысшей из всех методов обкатного зубошлифования производительностью, может применяться в широком диапазоне модулей от 0,5 до 8 мм, причем мелкозубчатые 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 рис. 8.11, а показана традиционная схема кинематической связи по принципу "электрический вал". Синхронные электродвигатели M_1 и M_2 вращаются от одного генератора 3 со стабилизированной частотой. После разгона обороты двигателей M_1 и M_2 становятся одинаковыми, благодаря чему устанавливается теоретически настроенная кинематическая связь. Основной недостаток данной схемы заключается в запуске цикла обработки.

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 M_1 и M_2 включают зажимное устройство в виде цанги 4, и при дальнейшей обработке червячный круг 1 и обрабатываемое зубчатое колесо 2 вращаются

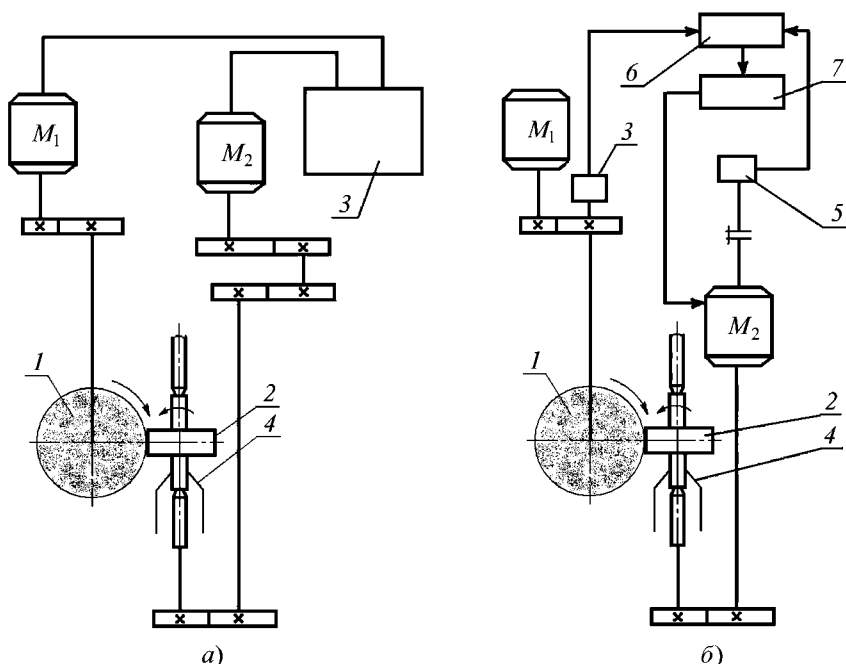


Рис. 8.11. Кинематическая связь вращения червячного круга и обрабатываемого зубчатого колеса по схеме "электрический вал" (а) и с электронной связью (б)

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 цанги мгновенное прекращение "рыскания" колеса вокруг своей оси в такт погрешностям вызывает съем части припуска в пределах величины погрешностей уже на первом обороте колеса. Повышенная теплонпряженность шлифования в этом случае 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. 8.11, б). Шлифовальный круг 1 приводится во вращение асинхронным двигателем M_1 , а зубчатое колесо 2 – серводвигателем постоянного тока M_2 . Угловой быстродействующий датчик 3, установленный соосно с вращением круга, посредством датчика 5, установленного соосно с серводвигателем M_2 , 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 проходам без резких выхватов материала и повышения теплонапряженности. Работающие по принципу электронной связи станки фирмы "Рейсхауер" по технологическим возможностям, производительности и качеству обработки значительно превосходят станки, работающие по принципу 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 табл. 8.2 приведены характеристики основных методов зубошлифования при обработке цилиндрических зубчатых колес из высоколегированных сталей типа 18Х2Н4МА, 12Х2Н4А.

8.2. Характеристики методов зубошлифования

Выходные параметры метода шлифования	Шлифование кругами			
	червяч- ными	тарельчатыми		диско- выми
		Угол наклона шлифо- вального круга		
		$\alpha = 0$	$\alpha = 15^\circ$	
Степень точности по ГОСТ 1643–81	4...5	3...5	3...5	5...6
Параметр шероховато- сти 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

В авиационном двигателестроении 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 под-тормаживанием – обрабатываемое зубчатое колесо.

На рис. 8.12 показана схема процесса зубохонингования. Абразивный инструмент – зубчатый хон 1, выполненный в виде косо-зубого зубчатого колеса с углом наклона зубьев $\beta = 10...15^\circ$, приводимый во вращение с регулируемыми 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.

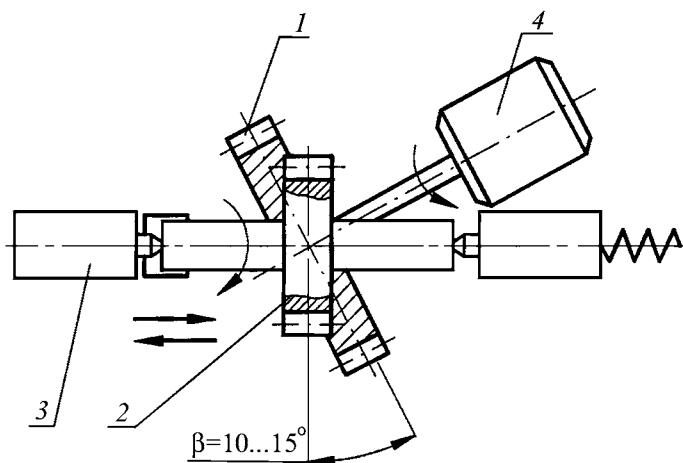


Рис. 8.12. Схема зубохонингования зубчатым хонем с наружными зубьями:

1 – зубчатый хон; 2 – обрабатываемое зубчатое колесо; 3 – тормозное устройство; 4 – электродвигатель привода вращения хона

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.

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 микро-неровностей предшествующей обработки). Скорость резания равна

$$v_p = v_0 \sin \beta,$$

где v_0 – окружная скорость хона; β – угол скрещивания осей между хонем и обрабатываемой деталью.

Так, при диаметре хона 250 мм, частоте его вращения 1000 об/мин, угле скрещивания осей β , равном $10...15^\circ$, 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 дробы, 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 цементованных 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

В авиационном двигателестроении применяются исключительно соосные конические зубчатые передачи с прямым и круговым зубом. Особенности обработки конических зубчатых колес

связаны с особенностями геометрии элементов зубчатого венца и профиля, которые заключаются в следующем.

1. Коническое зубчатое колесо не имеет 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:

$$r_{\text{д.экв}} = \frac{r_{\text{д}}}{\cos \varphi}.$$

2. Профиль впадины зуба конического колеса по мере приближения к вершине конуса не постоянен 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 $D_{\text{н}}$, расстояние A от посадочного базового торца до пересечения конусов и расстояние H от базового торца до вершин конусов (рис. 8.13).

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

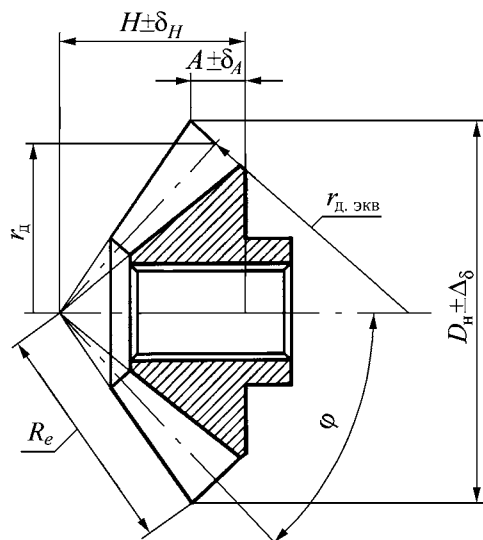


Рис. 8.13. Коническое зубчатое колесо

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 авиационные 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

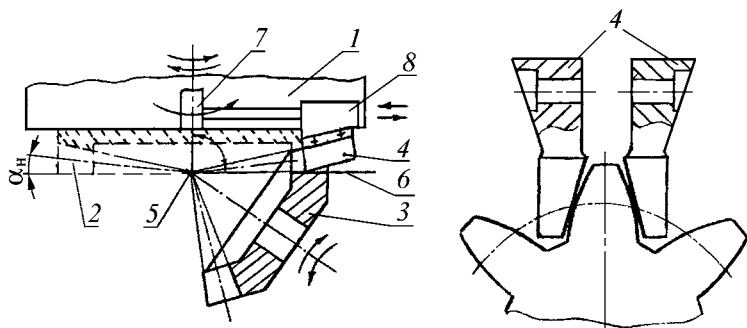


Рис. 8.14. Обработка прямозубых конических колес по схеме плосковершинного производящего колеса:

- 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

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 модели ЕЗ-40.

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 воображаемого 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

α_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, участвующие 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 ГТД производится методом зубошлифования.

Известны три **схемы зубошлифования прямозубых конических колес.**

1. *Метод шлифования тарельчатыми кругами по схеме плоского колеса с компенсацией износа режущих кромок кругов – метод фирмы "МААГ" (Швейцария).* Схема метода универсальна, обладает высокой точностью, но низкой производительностью и осуществляется на станках сложной конструкции. Метод нашел в авиационной промышленности 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 профи-

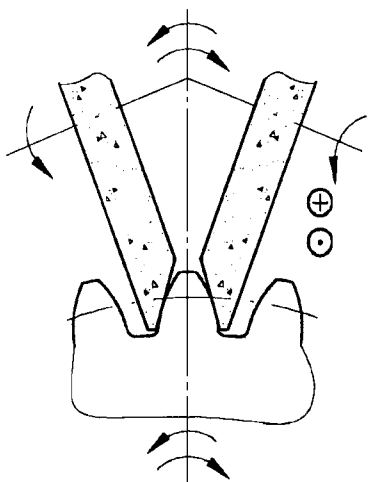


Рис. 8.15. Схема шлифования профиля зуба прямозубых конических колес конусной частью 2-х кругов

ля 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), которые не нашли широкого применения в авиационном двигателестроении.

3. *Метод шлифования конусной частью двух дисковых кругов* с их продольным движением вдоль зуба. Метод реализован на отечественных станках модели 5870М, МА-90 конструкции ЭНИМС и является основным в авиационном двигателестроении для окончательной обработки профилей зубьев прямозубых конических колес. На рис. 8.15 показана схема шлифования двумя конусными кругами.

В своей основе данная схема полностью соответствует изображенной на рис. 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 целесо-

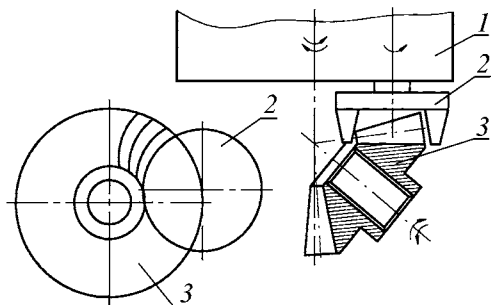


Рис. 8.16. Обработка конических зубчатых колес с круговым зубом по схеме плосковершинного производящего колеса:

1 – обкатная люлька станка; 2 – резцовая головка (шлифовальный круг);
3 – обрабатываемое зубчатое колесо

образных вариантов в авиационном двигателестроении является *поворотной-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 рис. 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.

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 463CNC фирмы "Глисон". Станок модели G-30 фирмы "Клингелнберг" (Германия) имеет кардинально новую кинематику без обкатной люльки и является наиболее прогрессивным в настоящее время.

8.5. ОБРАБОТКА ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В авиационном двигателестроении применяются в основном эвольвентные и прямобочные шлицы. Предварительное формообразование производится преимущественно методом обката. Обработка крупных шлиц производится методом зубофрезерования червячными фрезами, внутренних венцов – методом зубодолбления и, в отдельных случаях, методом протягивания.

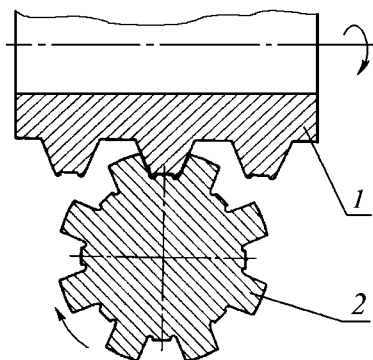


Рис. 8.17. Схема нарезания прямобочных шлиц валов методом обката червячной шлицевой фрезой:

1 – червячная шлицевая фреза;
2 – обрабатываемая заготовка

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 в авиационном двигателе-

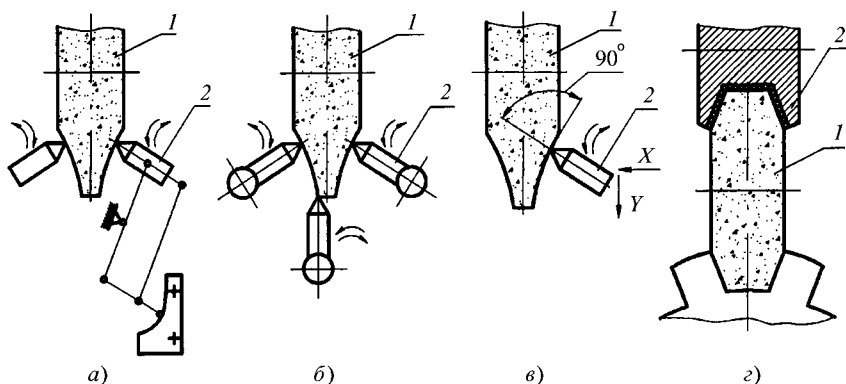


Рис. 8.18. Методы правки шлифовального круга при шлифовании шлиц:

а – по копирам; *б* – заменой эвольвенты окружностью; *в* – по программе; *з* – профильным алмазным роликом; *1* – шлифовальный круг; *2* – правящий алмазный инструмент

строении 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. 8.18, *а*).

2. *Правка с заменой эвольвентных профилей с углом зацепления 30° участком окружности* (рис. 8.18, *б*).

3. *Правка с заданием траектории относительного движения правящей кромки алмаза* или дискового алмазного ролика по любому профилю электронной системой с ЧПУ (рис. 8.18, в).

4. *Правка с помощью вращающегося профильного алмазного ролика* (рис. 8.18, г).

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 в авиационном двигателестроении. 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 производится 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 шлицевшлифовальные станки фирм "КАПП" и "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, *з*) 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 в авиационном двигателестроении 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 обработки, но имеющие некоторые препятствия для промышленного внедрения. Проблемными вопросами 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.

Важным 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 шлицешлифовальных станков. Инструмент представляет собой металлический корпус с выполненным на нем точным профилем, идентичным профилю шлифуе-

мого 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:**

1) *высокой производительностью* и возможностью повышать ее применением режимов глубинного шлифования на повышенных скоростях вращения инструмента;

2) *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;

3) *возможностью введения высотной бочкообразности* за счет модификации профиля инструмента и продольной за счет эволюции круга по высоте по мере движения вдоль зуба;

4) *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 маслonaсосов 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.

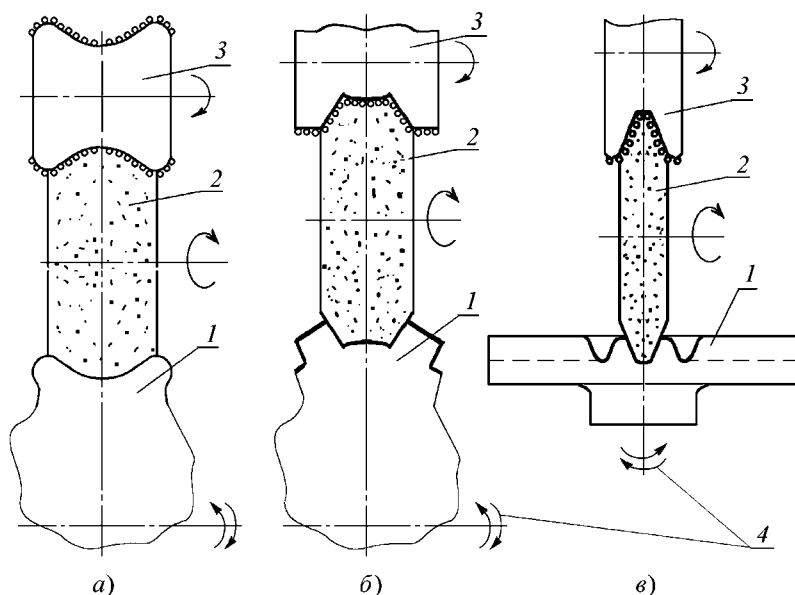


Рис. 8.19. Обработка зубчатых профилей методом глубинного шлифования:

а – циклоидальный профиль шестерен маслonaсоса; *б* – прямобоочные шлицы; *в* – торцевые шлицы (шлицы Хирта); *1* – обрабатываемая заготовка; *2* – шлифовальный круг; *3* – алмазный правящий ролик; *4* – движение деления

Механизм 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. 8.19, б) 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. 8.19, в). Достигается высокая точность торцевых шлиц и полная автоматизация процесса обработки, за исключением постановки 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 про-

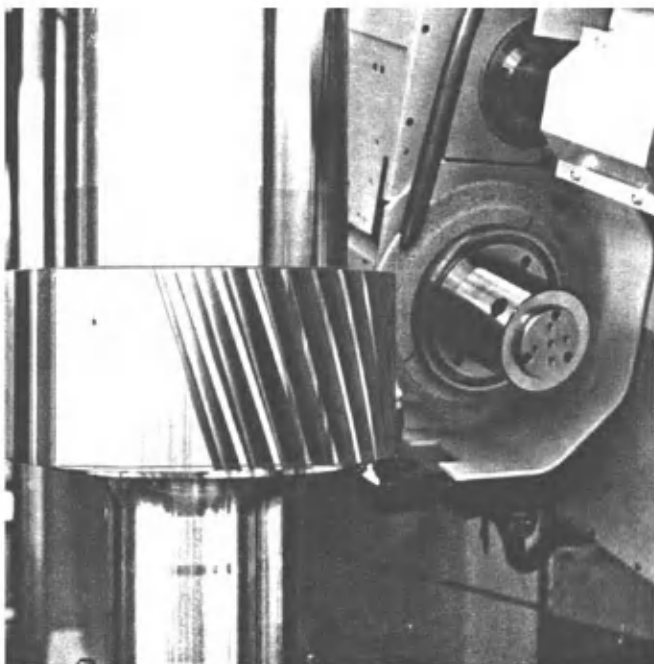


Рис. 8.20. Профилирование зубчатого венца взамен лезвийных методов обработки в режиме глубинного шлифования. Станок "Опал-80" (Германия)

грамме 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 авиадвигателестроении 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, заправляемых по необходимому профилю универсальными дисковыми алмазными роликами. К таким станкам относятся "Опал 80" фирмы "Клингельнберг" (Германия), "Р600G" фирм "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 рис. 8.20 приведен пример формообразования зубчатого колеса глубинным шлифованием на станке "Опал 80".

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), точное 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 (рис. 8.21) была реализована путем модернизации МОЦ "Горизон 3" (Италия), имеющего все необходимые движения для обработки зубчатых зацеплений.

Наличие поперечной координаты X дает преимущество этой схеме, обеспечивая обработку в разгон протяженных шпоночных лазов муфт энергетических ГТД.

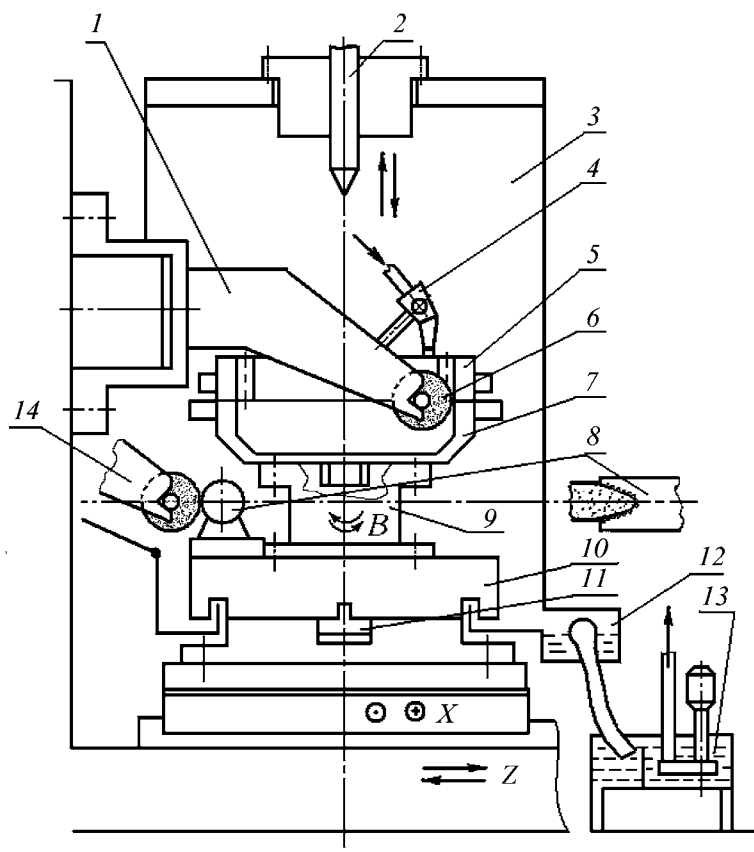


Рис. 8.21. Схема модернизированного МОЦ "Горизон 3" для шлифования профилей зубчатых зацеплений:

- 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

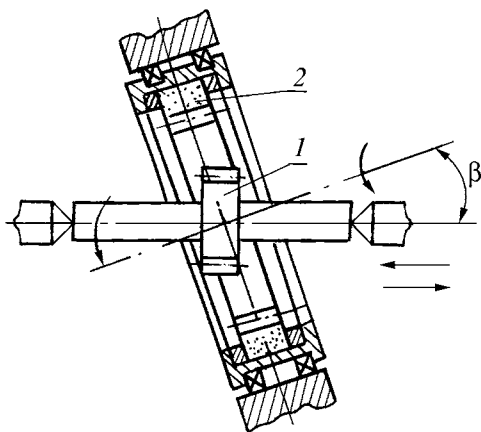


Рис. 8.22. Схема зубохонингования хонотомом с внутренним зубчатым венцом:

1 – обрабатываемое зубчатое колесо; *2* – абразивный хонотомом с внутренним зубчатым венцом

8.6.3. Зубохонингование зубчатыми хонотомомом с внутренним зацеплением

Фирма "Фесслер" (Швейцария) разработала перспективный метод зубохонингования зубчатыми хонотомомом с внутренними зубьями (рис. 8.22) в противоположность традиционному выполнению хонотомомом с наружными зубьями (см. рис. 8.12). Хонотомомом 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.

Возможна периодическая правка зубчатого хонотомомом с помощью инструментального алмазного зубчатого колеса, установленного соосно с обрабатываемым или вместо него на оправке.

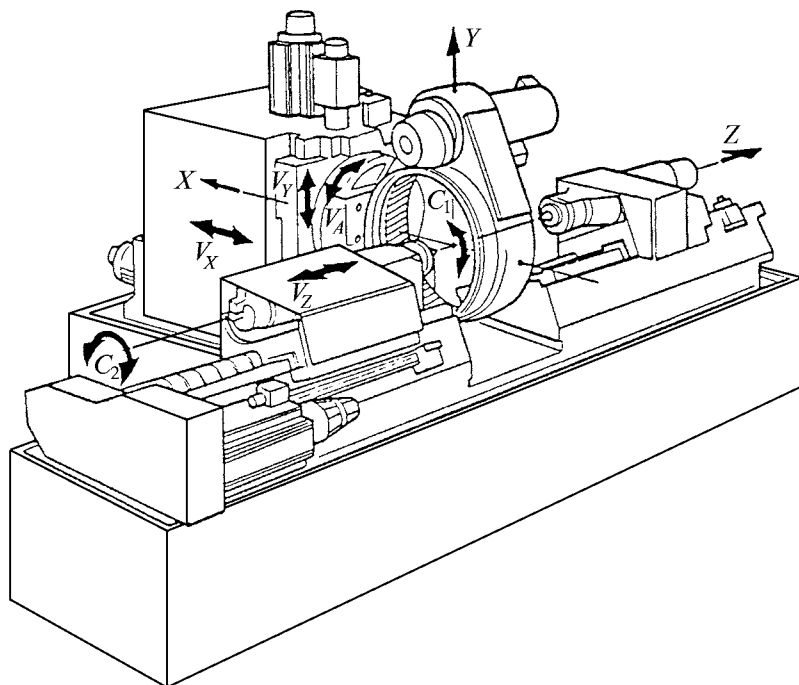


**Рис. 8.23. Компоновочная схема станка
для зубохонингования хонем с внутренним венцом**

Зубохонингование инструментом с внутренним зубчатым венцом при введении электронной кинематической связи между обрабатываемым зубчатым венцом и хонем дает возможность исправлять погрешность профиля и снимать значительный припуск в противоположность зубохонингованию при свободном обкате. На рис. 8.23 приведена компоновочная схема станка для зубохонингования.

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 для авиационного двигателестроения. 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 рис. 8.24 показана схема установки для химико-механической обработки.

Обрабатываемый венец 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 исходной шероховатости, реально получаемые поверх-

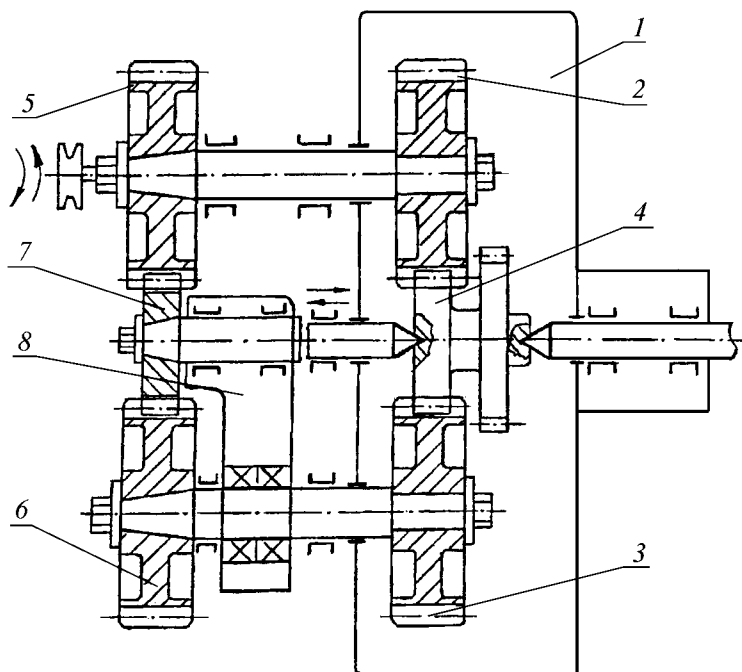


Рис. 8.24. Схема химико-механической обработки двухвенцовых цилиндрических зубчатых колес:

- 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

ности профилей зубьев имеют параметр шероховатости $Ra = 0,16 \dots 0,2$ мкм, что возможно только методом зубохонингования.

Недостатками метода химико-механической обработки являются:

- 1) малая стойкость технологического раствора, выражающаяся в ослаблении интенсивности съема материала;
- 2) вредное воздействие компонентов раствора на обслуживающий персонал;

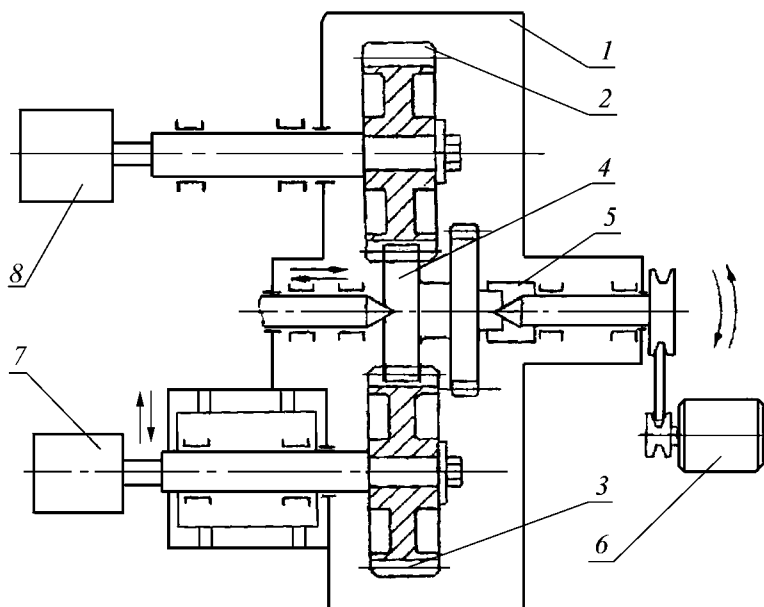


Рис. 8.25. Схема зубохонингования на параллельных осях:

- 1 – рабочая ванна; 2, 3 – корригированные прямозубые хоны;
 4 – обрабатываемое зубчатое колесо; 5 – поводковая муфта;
 6 – привод вращения; 7, 8 – тормозные нагрузочные устройства

3) трудность утилизации отработавшего раствора;

4) необходимость изготовления 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 специ-

альная операция, например, точного зубодолбления инструментальной твердоплавкой рейкой на современном станке с ЧПУ.

Отделочные методы, повышающие качество поверхности, должны снимать минимальный припуск, не нарушая полученных точностных параметров профиля зуба. Метод 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, на оси которых установлены тормозные нагрузочные устройства. Для варьирования параметрами коррегированных хонов, инструментальные бабки должны быть подвижными в поперечном направлении (см. 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.

Глава 9

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРЕССИВНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ

9.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОГРЕССИВНЫХ ТЕХПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Сосредоточение в авиационном двигателестроении новейших достижений в области материаловедения и обработки позволяет повысить эксплуатационные характеристики авиационных двигателей, их ресурс и надежность. При этом только комплексный подход к совершенствованию технологии дает наибольший эффект по повышению качества и надежности авиационных двигателей. Так, турбинные лопатки ГТД, отлитые из современных жаропрочных сплавов с применением прогрессивных методов направленной кристаллизации и имеющие окончательный профиль проточной части, требуют высокоточного распределения припуска и последующей обработки замковой и бандажной частей с высоким качеством поверхностного слоя и высокой геометрической точностью. Это достижимо только с применением современных методов глубинного шлифования, осуществляемого на полностью автоматизированных станках или на автоматических линиях. Последующее упрочнение замковой части лопатки и нанесение жаростойких защитных покрытий завершает процесс изготовления турбинных лопаток, обеспечивающих высокий ресурс и надежность.

Применение последних достижений в области вычислительной техники, программирования и точного перемещения узлов станка, а также правки кругов, позволило кардинально изменить процесс обработки профилей зубьев конических зубчатых колес с круговым зубом.

Сложные кинематические соотношения между обрабатываемым профилем и кругом в процессе обкатки, реализуемые на обычных зубообрабатывающих станках за счет взаимного вращения обкатной инструментальной люльки и обрабатываемого изделия, заменены простыми взаимно перпендикулярными прямолинейными движениями инструмента относительно вращающегося обрабатываемого профиля вокруг рабочей оси. Кинематика станка резко упростилась, точность обработки возросла до недостижимых ранее величин, сам кропотливый и трудоемкий процесс получения профиля кругового зуба с обеспечением необходимого пятна контакта превратился в процессе внесения определенных коррекций в программу. Появилась возможность автоматического внесения коррекции в технологическую обрабатывающую программу на станке непосредственно с измерительной машины.

Комплексное применение последних достижений науки и техники в производстве ответственных деталей ГТД в условиях полной автоматизации требует значительных затрат и не всегда экономически оправдано. Но в современную технологию изготовления ответственных деталей ГТД должны быть заложены все существующие в настоящее время прогрессивные методы и решения, обеспечивающие наивысшую работоспособность и надежность авиационной техники. Эти затраты практически всегда экономически обоснованы, если повышают технические данные выпускаемых изделий, а значит, их конкурентоспособность на мировом рынке. *Так, одним из существенных достижений в авиационном двигателестроении за последнее время стало широкое применение прогрессивного процесса глубинного шлифования при обработке различных поверхностей наиболее ответственных деталей ГТД (лопатки, диски и др.).* Основные особенности и закономерности развивающегося и до конца не исчерпанного процесса рассмотрены ниже.

9.2. ГЛУБИННОЕ ШЛИФОВАНИЕ

Глубинное шлифование в авиационном двигателестроении занимает одно из важнейших мест среди методов абразивной обработки. Применение этого процесса позволяет комплексно решить проблему обработки сложных поверхностей ответствен-

ных деталей (елочный хвостовик турбинных лопаток и др.) с высоким качеством и высокой производительностью. Глубинное шлифование характеризуется съемом больших припусков от 0,1 до 5 мм и выше на пониженной скорости подачи стола, называемой иногда "ползучая подача".

Процесс глубинного шлифования характеризуется следующими **отличительными признаками** по сравнению с обычным шлифованием:

1) *специальное оборудование*, удовлетворяющее условиям повышенной жесткости и точности и применяемое как для высокопроизводительного предварительного съема больших объемов материала, так и для окончательной высокоточной обработки ответственных поверхностей;

2) *значительно увеличенная мощность электродвигателя* шлифовального круга, достигающая до 50...100 кВт;

3) *применение специальных высокопористых шлифовальных кругов* твердостью ВМ1–ВМ2;

4) *правка кругов осуществляется принудительно вращающимися алмазными роликами*;

5) *полностью автоматическое протекание всего цикла однопроходной или многопроходной обработки, включая правку круга*;

6) *подача в зону обработки большого количества СОТС* в пределах 200 л/мин на 1 круг при повышенном давлении до 1...1,5 МПа;

7) *полная изоляция зоны обработки в процессе рабочего цикла и надежная защита от разбрызгивания СОТС*.

При обработке конструкционных сталей процесс глубинного шлифования конкурирует по производительности с лезвийными методами обработки, занимая место после токарной обработки и фрезерования. При обработке жаропрочных труднообрабатываемых материалов преимущество лезвийных методов обработки утрачивается и глубинное шлифование выходит на первое место.

Так, при фрезеровании елочных хвостовиков турбинных лопаток из литейного жаропрочного сплава типа ЖС6У-ВИ производительность фрезерования составляет 1000 мм³/мин, а глубинного

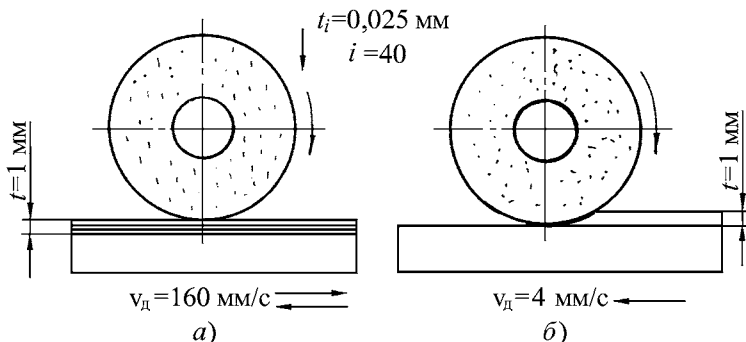


Рис. 9.1. Схема снятия припуске при маятниковом (а) и глубинном (б) шлифовании с одинаковой удельной производительностью $z = 4 \text{ мм}^3/\text{с} \cdot \text{мм}$

шлифования – $4000 \text{ мм}^3/\text{мин}$. Применение непрерывной правки круга в процессе резания позволяет повысить производительность еще в несколько раз и делает процесс глубинного шлифования вне конкуренции по производительности обработки жаропрочных труднообрабатываемых материалов. При этом обеспечивается высокая точность сложнопрофильных поверхностей и более стабильное и благоприятное по параметрам поверхностного слоя качество (шероховатость, остаточные напряжения, степень и глубина наклепа, искажения структурной решетки материала).

Основными параметрами режимов процесса шлифования являются снимаемый припуск t за ход стола и скорость его движения v_d . Эти параметры определяют удельную производительность процесса шлифования, отнесенную к одному миллиметру высоты круга и выражаемую как $z = t v_d$, $\text{мм}^3/\text{с} \cdot \text{мм}$. Припуск можно снимать с поверхности детали при одинаковой удельной производительности послойно с периодическим врезанием на одинарный ход стола (маятниковое шлифование) или за один ход стола (глубинное шлифование, рис. 9.1)

Распределение областей существования маятникового и глубинного шлифования удобно представить на диаграмме с логарифмическими осями.

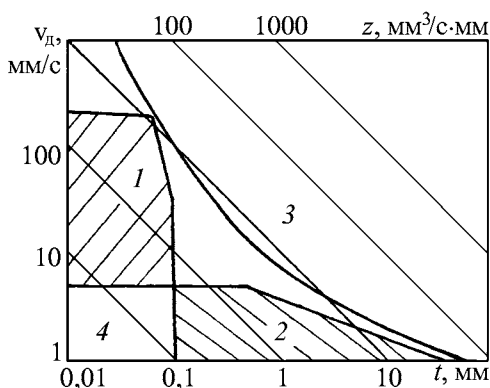


Рис. 9.2. Принципиальная схема существования областей маятникового и глубинного шлифования:

1 – зона маятникового шлифования; 2 – зона глубинного шлифования;
3 – зона недопустимых повреждений (прижогов); 4 – зона низкой производительности

рифмическими координатами по осям глубины шлифования t , скорости движения стола v_d и проведенными линиями равной удельной производительности, представляющей собой произведение глубины шлифования t , мм, на скорость подачи v_d , мм/с. На графике это линии, обозначенные 0,1; 1,0; 10; 100 мм³/с·мм (рис. 9.2). Подобную типовую диаграмму можно построить для конкретных сочетаний обрабатываемого материала, применяемого абразивного инструмента и других условий.

Общей тенденцией является то, что при увеличении глубины шлифования и перемещении в область глубинного шлифования с повышением удельной производительности отсутствие термических повреждений на обрабатываемой поверхности становится более вероятным.

По технологическим схемам глубинное шлифование можно разделить на *шлифование с попутной вращению круга подачи* и *на шлифование со встречной подачей* (рис. 9.3). Эти схемы значительно отличаются по тепловым явлениям в зоне контакта, производительности обработки и шероховатости обработанной поверхности.

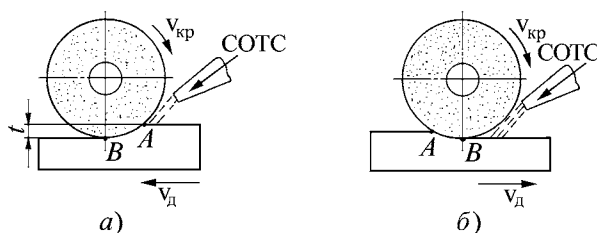


Рис. 9.3. Технологические схемы глубинного шлифования:
а – с попутной вращению круга подачи; *б* – со встречной подачей

При обработке материалов с пониженной теплопроводностью, таких как литейные жаропрочные сплавы типа ЖС6У-ВИ и титановые сплавы, предпочтительной является схема с попутной подачей (рис. 9.3, *а*). Максимальное количество выделяющегося тепла концентрируется в удаляемых слоях материала, не успевая нанести повреждение плоскости обработки. Этому также способствует обильное охлаждение наиболее нагретого участка и включение в процесс резания свежих участков абразивного круга, частично освобожденных от стружки в порах и насыщенных жидкостью. В конечную точку контакта (точка *В*) круг приходит с заполненными стружкой порами, в результате чего проявляется повышенный полирующий эффект. При попутной подаче глубинное шлифование жаропрочных и титановых сплавов производительней на 20...30 %, чем со встречной при прочих равных условиях.

Глубинное шлифование вязких конструкционных сталей с высокой теплопроводностью, таких как 13Х12ВМФА, предпочтительно осуществлять со встречной подачей (рис. 9.3, *б*). Вследствие высокой теплопроводности удаляемые слои материала являются более эффективным барьером для проникновения большого количества сконцентрированного тепла вглубь и исключения повреждения плоскости обработки, а интенсивное охлаждение именно этой плоскости способствует получению поверхности без тепловых повреждений. При обработке жаропрочных материалов по этой схеме в районе точки *А* концентрируется большое количество тепла, проникающего ниже плоскости обработки и вносящего тепловые повреждения. Обильное охлаждение срезаемых слоев мате-

риала ближе к точке B уже не гарантирует высокое качество обработанной поверхности.

При глубинном шлифовании с применением мягких абразивных кругов имеет значение объем снимаемого материала, отнесенный к количеству участвующих режущих зерен. Методом глубинного шлифования выгодней обрабатывать неплатные, разветвленные поверхности с большей режущей поверхностью, т.е. с большим количеством режущих зерен.

На рис. 9.4 приведены две обрабатываемые поверхности с одинаковой глубиной шлифования t : плоская и пилообразная. В случае 9.4, б снимается вдвое меньший объем материала при участии в резании вдвое большего количества абразивных зерен. В результате повышается кромкостойкость, снижается засаливание абразивного круга, повышается рабочая подача при сохранении высокого качества обработанной поверхности.

С повышением сложности обрабатываемой поверхности предпочтительней становится применение глубинного шлифования перед маятниковым. Так, все елочные хвостовики турбинных лопаток ГТД обрабатывают методом глубинного шлифования.

В процессе шлифования происходит затупление режущих зерен и забивание пор стружкой, вследствие этого режущие свойства круга ухудшаются, повышается удельное тепловыделение в зоне

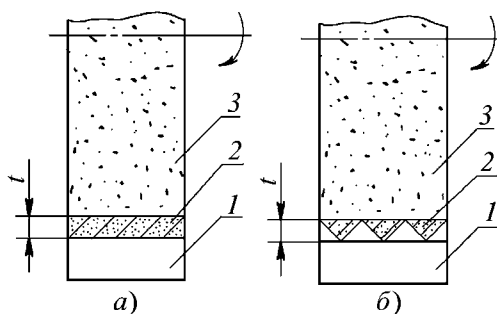


Рис. 9.4. Схема съема припуска при глубинном шлифовании глубиной t при плоском (а) и профильном (б):

1 — обрабатываемая заготовка; 2 — снимаемый материал;
3 — шлифовальный круг

контакта и при достижении определенной величины наступает тепловое повреждение поверхности. Так, при обработке жаропрочных материалов величина теплового потока 35 Вт/мм^2 может вызывать тепловые повреждения, что требует снижения тепловыделений. Это достигается обновлением режущей поверхности круга, т.е. его **правкой**. Установлено, что снятие слоя $0,08 \text{ мм}$ с режущей поверхности абразивного круга при обычном шлифовании полностью восстанавливает его режущие свойства.

Для высокопористых кругов величина *однократной правки* выбирается в пределах $0,1...0,15 \text{ мм}$, достаточных для восстановления режущих свойств круга. Иногда для восстановления геометрических размеров сложнопрофильного круга требуется правка на большую величину. При *циклической правке* засаливание круга и потеря его режущих свойств с повышением тепловыделения происходит постепенно по мере прохождения определенного пути шлифования. На рис. 9.5 показано изменение удельной энергии шлифования после циклической правки. Правка должна производиться до достижения критического теплового потока и повреждения поверхности (линия 4). Существует достаточно строгое ограничение по длине обработанной поверхности до очередной прав-

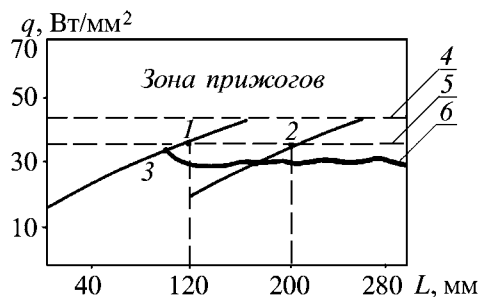


Рис. 9.5. Изменение удельной энергии шлифования q и ее ограничение циклической и непрерывной правками:

1, 2 — точки циклической правки; 3 — точка включения непрерывной правки; 4 — линия максимально допустимой удельной энергии; 5 — линия удельной энергии проведения очередной правки; 6 — линия удельной энергии при непрерывной правке; L — длина обработанной поверхности

ки. Так, при обработке елочных замков лопаток длиной 25...30 мм оптимальной является обработка на одной правке четырех лопаток (достигается точка 3 на рис. 9.5).

Обработка более протяженных поверхностей без тепловых повреждений возможна только с непрерывной правкой в процессе шлифования, включаемой чаще всего после достижения определенной мощности шлифования (теплового потока – линия б). В данном случае ограничения по длине обработки не существует и она определяется только возможностями станка.

В общем случае система правки кругов для глубинного шлифования состоит из правящего устройства с алмазным роликом, расположенным на столе станка или на станине, правящего устройства с алмазным роликом, расположенным на шлифовальной бабке над кругом, системы управления, задающей необходимые величины врезания правящих роликов с необходимой скоростью и компенсирующей мерное положение режущей кромки круга после правки (рис. 9.6).

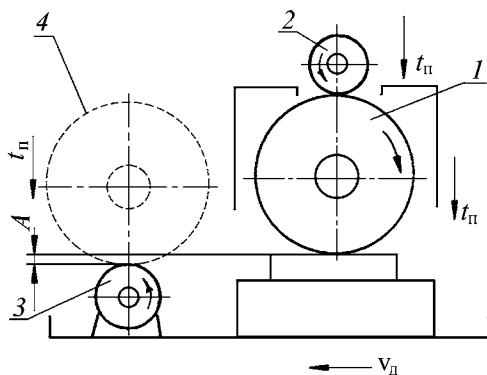


Рис. 9.6. Схема системы правки кругов при глубинном шлифовании:

1 – шлифовальный круг; 2 – правящий алмазный ролик на шлифовальной бабке; 3 – правящий ролик на столе; 4 – позиция правки круга роликом на столе; t_p – интенсивность врезания ролика в круг, мкм/об, и одновременной компенсации шлифовальной бабки; A – опорная координата ролика

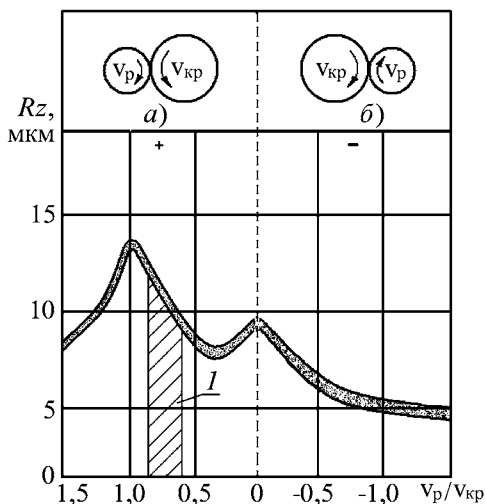


Рис. 9.7. Влияние отношения скоростей ролика и круга на шероховатость при попутной (а) и встречной (б) правках:
 1 – зона применяемых оптимальных соотношений $v_p/v_{кр}$

От выбора направления вращения алмазного ролика по отношению к направлению вращения круга зависит его режущая способность и стойкость. *Наилучшей режущей способностью круг обладает после правки в режиме накатки*, т.е. при попутном вращении круга и ролика с равными линейными скоростями. Но при таком режиме возникают наибольшие отжимающие усилия и наихудшие условия для долговечной работы ролика. Кроме того, размерная стойкость разрыхленной поверхности круга понижена. На практике применяют попутную правку с пониженной скоростью вращения алмазного ролика. Коэффициент K отношения скоростей $v_p/v_{кр}$ выбирают в пределах 0,7...0,8. При таких режимах правки круг обладает достаточными режущими свойствами и высокой размерной стойкостью.

С помощью изменения режимов правки, направления вращения и скорости алмазного ролика можно управлять параметрами производительности обработки и получаемого качества обработанных поверхностей. Это, прежде всего, касается тепловых по-

вреждений и шероховатости полученной поверхности. Косвенно величина неровностей обработанных поверхностей характеризует степень разрыхления поверхности круга и его режущую способность.

На рис. 9.7 приведена типовая картина изменения шероховатости в зависимости от соотношения и направления скоростей вращения ролика v_p и круга $v_{кр}$.

Встречное вращение ролика (рис. 9.7, б) обозначается со знаком минус. Из диаграммы шероховатости видно, что при попутной правке и соотношении $v_p/v_{кр} = 1$ реализуется режим интенсивной накатки с наибольшим разрыхлением заправляемой поверхности круга, наилучшей его режущей способностью и наиболее высокой высотой микронеровностей. При встречной правке (рис. 9.7, б) режущая поверхность круга заглажена, зерна притуплены, возможно получение наименьшей высоты неровностей, но в условиях повышенной теплонапряженности процесса резания.

Количество выхаживающих оборотов ролика без его врезания при радиальной правке (рис. 9.8) существенно влияет на сглаживание режущей поверхности круга, улучшение шероховатости при повышенной теплонапряженности резания. Выхаживающие обороты ролика без подачи на врезание целесообразно применять только на чистовых проходах, оптимизируя их количество необходимым уровнем высоты микронеровностей.

Правка роликом, расположенным на столе, осуществляется циклически после обработки поверхности определенной протяженности. Правка роликом на шлифовальной бабке может быть как циклическая, так и непрерывная. Для нее практически не требуется дополнительного времени, и она может быть совмещена с другими рабочими движениями цикла обработки. Подвижное правящее устройство не обладает достаточной жесткостью, и наиболее точные операции, такие как обработка елочного хвостовика турбинных лопаток, производятся с циклической правкой от жесткого правящего устройства на столе станка. Интенсивность врезания алмазного ролика в круг задается в микрометрах на оборот круга. При циклической правке величина врезания t_n выбирается в пределах 0,8...1 мкм/об, при непрерывной правке $t_n = 0,3...0,8$ мкм/об.

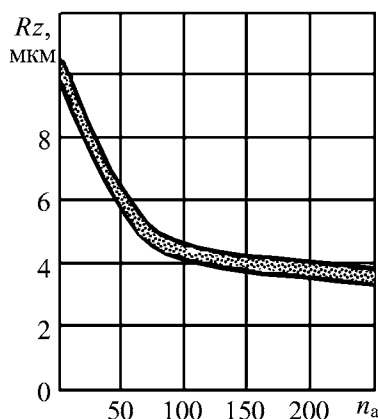


Рис. 9.8. Влияние количества выхаживающих оборотов n_a при правке без врезания ролика в круг на получаемую шероховатость обработанной поверхности Rz

Правка роликом, расположенным на столе, может производиться с радиальным и тангенциальным врезанием. При радиальном врезании абразивный круг или круги, в случае двусторонней обработки, приходят в позицию правки с совмещением в вертикальной плоскости осей круга и ролика, после чего производится правка с выбранной интенсивностью до снятия заданного припуска t . При правке второго круга вращение ролика реверсируется для

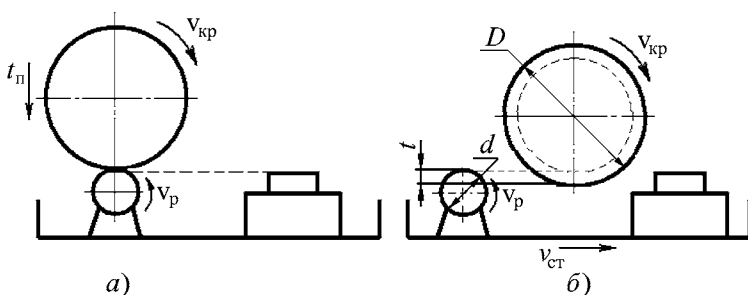


Рис. 9.9. Схемы правки кругов алмазным роликом:
 a — с радиальным врезанием; b — с тангенциальным врезанием

обеспечения попутного направления скорости ролика. При правке с тангенциальным врезанием ролика алмазный круг (круги) подается на величину срезаемого роликом припуска t и стол с правящим устройством проходит под кругом или между кругами на скорости стола $v_{\text{ст}}$. Ролик вращается в одну сторону, вращение одного из кругов реверсируется при правке. Интенсивность правки, оцениваемая величиной $t_{\text{п}}$ срезания слоя абразива за один оборот круга, определяется по формуле

$$t_{\text{п}} = \frac{\pi D v_{\text{ст}}}{60000 v_{\text{кр}}} \sqrt{\frac{t}{D + d_{\text{п}}}},$$

где $t_{\text{п}}$ – интенсивность правки, мм/об; D – диаметр круга, мм; $v_{\text{ст}}$ – скорость движения стола, м, м/мин; $v_{\text{кр}}$ – скорость вращения круга, м/с; $d_{\text{п}}$ – диаметр алмазного ролика, мм; t – срезаемый припуск, мм.

Из приведенной формулы по задаваемой интенсивности правки круга определяют скорость движения стола. Преимуществом тангенциальной правки является более высокая производительность при двухкруговой обработке и более простая система мерного вертикального врезания кругов. Наибольшее распространение в промышленности нашла правка с радиальным врезанием алмазного ролика.

Широкое применение глубинного шлифования в авиационном двигателестроении связано с его высокими технологическими показателями, позволяющими повысить одновременно качество и производительность обработки жаропрочных сплавов.

Классический способ глубинного шлифования связан с применением специальных высокопористых абразивных кругов на керамических связках твердостью ВМ1–ВМ2, допускающих работу на скорости резания не более 35 м/с. Высокие показатели процесса глубинного шлифования можно значительно повысить, перейдя в область **скоростного глубинного шлифования**. Скоростным можно считать шлифование при скорости вращения круга 50 м/с и выше. Известно, что повышение скорости резания вызывает резкое изменение всех параметров процесса. Происходит

уменьшение сил резания, удельного износа шлифовального круга, но в то же время в зоне контакта увеличивается тепловыделение.

При исследовании скоростного маятникового шлифования было установлено значительное повышение производительности за счет действия трех эффектов.

1. *Кинематический эффект*, заключающийся в том, что с изменением скорости резания пропорционально изменяется число режущих кромок, проходящих зону обработки в единицу времени. Данный эффект считается основным, но наличие других эффектов существенно может изменить суммарный результат от повышения скорости круга в конкретных случаях.

2. *Скоростной эффект*, заключающийся в изменении составляющих сил от сопротивления металла пластическому деформированию, резанию и трения. В случае уменьшения сопротивления резанию с увеличением скорости инструмента эффект является дополнительным резервом повышения производительности, но он в разных условиях может проявляться неоднозначно как в количественном, так и качественном отношениях.

3. *Статистический эффект* количественно определяется случайным расположением режущих кромок на поверхности круга, их разновысотностью и уменьшением критического отношения a_z/ρ , характеризующего момент начала резания с повышением скорости круга, где a_z – толщина среза единичным зерном; ρ – средний радиус округления вершин режущих кромок абразивного зерна.

В случае маятникового шлифования с большой скоростью движения стола при увеличении скорости круга действие скоростного и статистического эффектов ослабевает, а при скоростях резания выше 160 м/с их влияние становится незначительным. Объясняется это особенностями стружкообразования, малым временем нагрева зоны сдвига, стабилизацией интенсивности пластической деформации.

При переходе на глубинное скоростное шлифование изменение кинематических особенностей образования стружки приводит к проявлению в полной мере всех трех эффектов, более значительно повышая производительность с повышением скорости круга.

Для расчета толщины среза a_z отдельным зерном в зависимости от основных параметров процесса и абразивного инструмента, используется формула:

$$a_z = A \sqrt[3]{\frac{tv_{\text{ст}}^2}{v_{\text{кр}}^2 N_z^2 D \rho}}, \text{ мм},$$

где A – постоянная; t – глубина резания, мм; $v_{\text{ст}}$ – скорость движения стола, мм; $v_{\text{кр}}$ – рабочая скорость круга, м/с; N_z – количество режущих кромок на единицу поверхности круга, мм; D – диаметр круга, мм; ρ – средний радиус округления вершин режущих кромок, мм.

Анализ приведенной формулы показывает, что при переходе на режимы глубинного шлифования с сохранением удельной производительности толщина среза a_z уменьшается в 5...10 раз.

Увеличение скорости, в свою очередь, приводит также к уменьшению толщины среза. Так, увеличение скорости круга с 25 до 100 м/с приводит к уменьшению толщины среза a_z в 2 раза. Уменьшение толщины среза повышает возможность удаления обрабатываемого материала без скалывания абразивного зерна от усилий резания и, в итоге, катастрофического износа круга. С другой стороны, уменьшение толщины среза приводит к увеличению доли работы, затрачиваемой на упругопластическую деформацию материала, что увеличивает тепловыделение в результате повышения удельной работы шлифования. Эта тенденция наблюдается при всех видах глубинного шлифования. С переходом на скоростное глубинное шлифование снижается величина отношения a_z/ρ , тем самым снижая упругопластическую деформацию и высокие энергетические затраты на нее.

Резюмируя вышеприведенный анализ, можно констатировать, что наивысшую производительность без катастрофического разрушения абразивных зерен абразивный круг может дать в режиме глубинного шлифования, а само глубинное шлифование выгоднее применять при высоких скоростях круга, что способствует повышению производительности круга или повышению качества поверхности при неизменной производительности.

9.3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК ГТД

Турбинная лопатка ГТД является одной из самых ответственных деталей, поломка которой недопустима и приводит к нелокализованному разрушению турбины с самыми серьезными последствиями. Лопатки газовых турбин подвергаются одновременному воздействию значительных напряжений от центробежных сил, высоких температур и агрессивной среды.

Одновременные действия напряжений растяжения и изгиба от центробежных сил, изгиба и кручения от газового потока, вибрационных и термических напряжений предъявляют высокие требования к материалу лопаток, их конструктивному оформлению и технологии изготовления. Сложная пространственная форма проточной части лопатки и необходимость внутреннего охлаждения высокотемпературных ступеней продиктовали метод изготовления заготовок. Это **высокоточное литье по выплавляемым моделям**.

В настоящее время заготовки всех турбинных лопаток авиационных двигателей как охлаждаемых, так и неохлаждаемых, получают методом литья из жаропрочных литейных сплавов типа ЖС6-УВИ на никелевой основе. Профильная проточная часть пера лопаток обычно выполнена окончательно и дальнейшей обработке, кроме покрытий, не подлежит.

Общий вид и основные элементы типовой неохлаждаемой турбинной лопатки ГТД приведены на рис. 9.10.

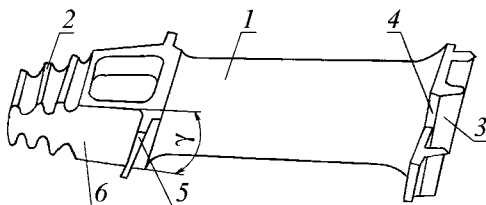


Рис. 9.10. Типовая турбинная лопатка ГТД и ее элементы:

- 1 – профильная часть пера; 2 – елочный хвостовик;
- 3 – гребешки лабиринта бандажной полки; 4 – контактная площадка;
- 5 – уплотнительное крылышко; 6 – скос замка

Прогрессивный технологический процесс изготовления лопаток должен обеспечить:

- 1) *высококачественное литье*, исключающее наличие пор и раковин с равномерным распределением припуска по обрабатываемым элементам относительно пера;
- 2) *высокую точность расположения обработанных элементов замка и бандажной полки относительно пера*;
- 3) *высокую точность выполнения всех геометрических элементов слочного хвостовика*;
- 4) *отсутствие наклепа на наиболее теплонапряженной части – профиле пера*;
- 5) *отсутствие растягивающих напряжений на механически обработанных поверхностях лопатки*;
- 6) *наличие качественного жаростойкого покрытия на поверхностях лопаток, соприкасающихся с газовым потоком*.

Современный жаропрочный материал, прогрессивные методы литья и эффективные жаростойкие покрытия создают металлургическую базу, гарантирующую высокую работоспособность и надежность лопаток ГТД. Анализ развития литейных жаропрочных сплавов за последние годы позволяет выделить устойчиво достигнутые результаты и направления движения по повышению жаропрочности.

Особое внимание уделяется **жаропрочным сплавам**. Успешно применяются литейные жаропрочные сплавы поликристаллической структуры, поверхностно модифицированные при литье. Находят применение литейные сплавы с ориентированной структурой (направленная кристаллизация). В дальнейшем перспективными могут быть литейные сплавы на основе интерметаллидного соединения типа Ni_3Al , имеющие более низкую плотность и более высокие жаропрочные характеристики при температуре 1200 °С, чем у широко применяемого сплава ЖС6-УВИ. В этом же ряду стоят сплавы с более тугоплавкой, чем у никеля, металлической основой, например, ниобием, и, наконец, материалы на основе керамики.

Литье с направленной кристаллизацией выполняется путем направленного отвода тепла от формы с жидким сплавом. Грани-

цы немногочисленных зерен в лопатке располагаются параллельно оси пера, чем устраняются ослабленные плоскости, перпендикулярные рабочим растягивающим напряжениям. При литье с направленной кристаллизацией обеспечивается однородная структура материала и его плотность во всех сечениях и элементах отливки. В результате пластичность повышается в несколько раз, термоциклическая стойкость по числу циклов нагружения увеличивается в 1,5...2 раза.

Одной из разновидностей литья с направленной кристаллизацией является получение лопаток с монокристаллической структурой, в которых полностью исключено образование границ зерен и вся лопатка состоит из одного выращенного специальными методами зерна.

Для защиты поверхностей турбинных лопаток от окисления, эрозии и преждевременного разрушения применяются *алюминидные покрытия, заключающиеся в насыщении поверхностного слоя алюминием*. Эти покрытия увеличивают ресурс работы лопаток в 2...3 раза. Еще более высокие результаты могут быть достигнуты за счет легирования алюминиевого покрытия элементами Cr, Si, B, Pt.

Применяемые методы алитирования в порошковых смесях с галогенидными активаторами затрудняют нанесение качественного легированного слоя. В связи с этим все более широко применяется прогрессивный *метод вакуумной плазменной технологии высоких энергий* (метод ВПТВЭ). Метод заключается в осаждении на предварительно очищенную поверхность при помощи плазменной вакуумной технологии слоя заданной толщины из алюминия или сплава алюминия с легирующими добавками с последующим вакуумным отжигом. При отжиге расплавленный алюминиевый сплав формирует в поверхностном слое диффузионное покрытие, состав и структура которого определяется режимом отжига. В зависимости от температуры и продолжительности отжига можно получить покрытия с содержанием алюминия от 14 до 36 %. Оптимальным для сплава ЖС6У является отжиг при $T = 1000$ °C продолжительностью 4 часа. При этом содержание алюминия в диффузионном слое из соображений высокой пластичности не должно

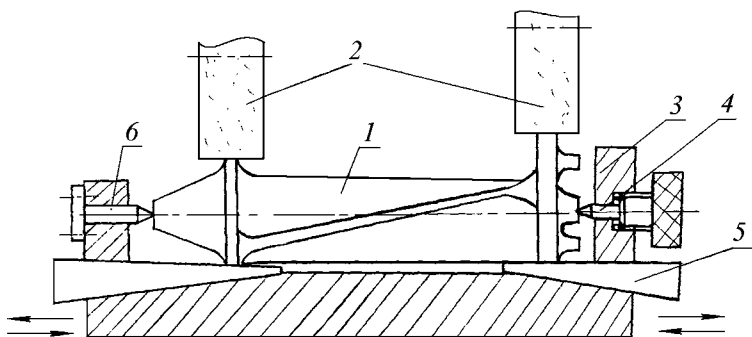


Рис. 9.11. Схема обработки базовых поверхностей лопаток от накерненных лунок:

- 1 – заготовка лопатки; 2 – шлифовальные круги; 3 – приспособление;
4 – подвижный центр; 5 – клиновидная подводимая опора;
6 – неподвижный центр

превышать 20 %. Применение метода ВПТВЭ обеспечивает высокую воспроизводимость параметров нанесенного слоя по толщине и составу, что является одним из его преимуществ. Кроме того, метод позволяет наносить переменный по толщине слой покрытия на различных участках пера лопатки, а также дает возможность наносить покрытия на окончательно обработанные детали, что исключает случаи растрескивания алитированного слоя в процессе механической обработки.

Распределение припуска и обработку базовых поверхностей можно отнести к важнейшим операциям в технологии изготовления литых турбинных лопаток.

Получил распространение метод накернивания базовых лунок на замке и бандажной полке непосредственно на оптико-механическом приборе (типа ПОМКЛ) после распределения припуска по нескольким сечениям пера и оптимального ориентирования оси лопатки в пространстве. По трем накерненным лункам лопатка устанавливается в приспособлении, и после подведения клиновых опор для восприятия усилий резания формируются технологические базовые поверхности для дальнейшей обработки основных элементов лопатки (рис. 9.11).

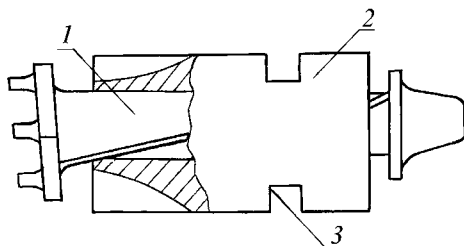
Вследствие недостаточной величины и точности накерненных базовых лунок возникает значительная погрешность установки и обработки технологических баз, поэтому *данный метод не обеспечивает высокой точности расположения елочных замков и контактных площадок относительно пера лопатки.*

В ряде случаев используют установку и зажим лопаток с точным профилем пера и кромкой в кассету с выполненными ложементами, представляющими собой теоретический профиль двух максимально разнесенных сечений, затем обрабатывают хвостовик и другие поверхности. Однако зажим ответственных лопаток по окончательно выполненному перу крайне нежелателен и допускается только для мелких лопаток, например, турбостартера. При этом, постоянный зажим по узкому ложементу приводит к его смятию, потере точности и необходимости восстановления или замены. Применение кассет для обработки базовых поверхностей или непосредственно элементов лопаток будет целесообразным, если точно выполняемые ложементы и упоры будут служить только для установки лопатки, а силовой зажим будет производиться по другим более жестким и безопасным элементам лопатки.

Перспективным и весьма точным является метод образования базовых поверхностей путем *заливки лопаток по перу* легкоплавким, но достаточно жестким материалом после ориентирования их в пространстве с помощью современных методов измерения. Сформированный этим методом брикет (см. рис. 9.12) дает возможность обработать все поверхности лопатки и применяется чаще всего на автоматических линиях с полной автоматизацией процесса обработки.

Рис. 9.12. Схема базирования заготовки лопатки по профилю пера путем заливки в брикет:

1 – заготовка лопатки;
2 – брикет из легкоплавкого материала; 3 – поверхности брикета, используемые в качестве технологических баз



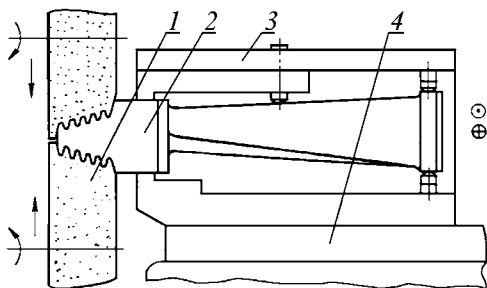


Рис. 9.13. Схема двусторонней обработки елочных хвостовиков турбинных лопаток:

1 – шлифовальные круги; 2 – обрабатываемая лопатка; 3 – кассета;
4 – зажимной элемент стола

Отечественная оптоэлектронная компьютерная система типа "Оптел КЛ-2000" для измерения профилей лопаток бесконтактным лазерным способом может в перспективе найти применение при решении задач распределения припуска и формирования точных технологических базовых поверхностей.

В современном техпроцессе изготовления турбинных лопаток для механической обработки основных элементов (елочный хвостовик, скосы замка, контактные площадки) широко применяется **процесс глубинного шлифования**. При обработке жаропрочных литейных сплавов процесс дает наивысшую производительность из всех известных методов, обеспечивая одновременно высокую точность обработки и благоприятные параметры качества поверхностного слоя.

Обработка клина хвостовика и елочного профиля производится на специальных станках для *двустороннего глубинного шлифования* с непрерывной или циклической правкой кругов алмазными роликами (см. рис. 2.49). Скосы обрабатываются на станках для плоского одностороннего глубинного шлифования с непрерывной правкой.

На рис. 9.13 приведена схема двустороннего шлифования елочных хвостовиков на станке ЛШ-233. Обработка ведется про-

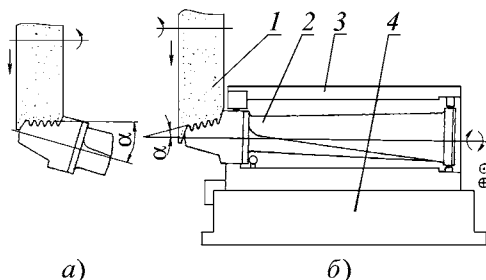


Рис. 9.14. Схема односторонней обработки елочных хвостовика турбинных лопаток:

1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемая лопатка; 3 – кассета;
4 – магнитная плита станка с упорной планкой

фильными абразивными кругами 1. Лопатка 2 закрепляется в кассете 3, установленной на зажимном элементе стола 4. Одновременно могут обрабатываться несколько лопаток.

Иногда при изготовлении турбинных лопаток малой серии возможна обработка елочного хвостовика *по одной стороне с переворотом кассеты* (рис. 9.14). Шлифование может производиться *с наклоном оси лопатки* (рис. 9.14, а) или *без наклона* (рис. 9.14, б). При использовании схемы с наклоном оси лопатки на угол конусности елочного хвостовика упрощается конструкция алмазного правящего инструмента, уменьшается расход абразивного круга и улучшается процесс резания за счет равномерных скоростей по всему профилю хвостовика. Эти обстоятельства могут стать существенными при обработке замков крупных лопаток.

При обработке контактных площадок бандажной полки возможно применение станков для глубинного шлифования упрощенной конструкции, но приспособленных именно для этой операции. Для обработки двух лопаток одновременно требуется жесткий рабочий шпиндель и правящий механизм с двумя алмазными роликами. Лопатка, базируемая по елочному хвостовику, устанавливается сначала для обработки контактной площадки со стороны спинки, а после обработки переворачивается на другую позицию,

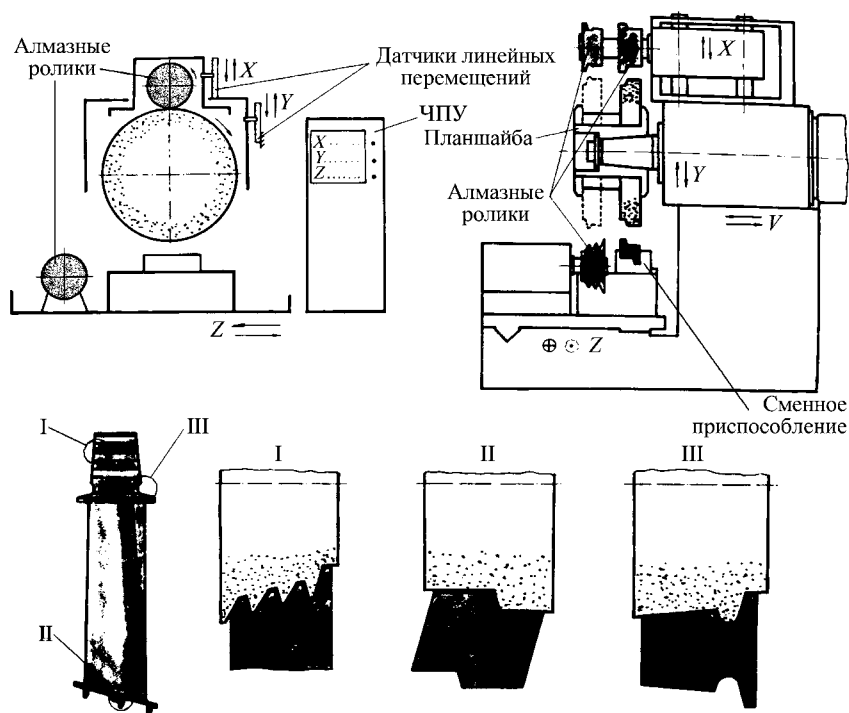


Рис. 9.15. Схема станка для многооперационного глубинного шлифования элементов турбинной лопатки

где опорной базой является обработанная на первой позиции контактная площадка.

Перспективным направлением при обработке контактных площадок турбинных лопаток является применение *скоростного глубинного шлифования* в двух вариантах:

1) *скоростное глубинное шлифование специальными высокопрочными абразивными кругами на скорости 80...100 м/с с периодической подправкой рабочего профиля круга алмазными правящими роликами;*

2) *скоростное глубинное шлифование эльборовыми профильными кругами с нанесением эльбора на профильную металлическую ступицу гальваническим методом.* Скорость круга в пределах 100...120 м/с. Обработка больших партий деталей осуществляется без правки профиля до принудительного снятия круга и возобновления рабочего слоя эльбора на точно выполненной ступице. Эта технология при ее комплексном освоении может оказаться наиболее экономичной.

Для обработки ответственных элементов турбинных лопаток малой серийности полезным и экономически целесообразным является применение плоскошлифовального однокругового станка – обрабатывающего центра для *многооперационного глубинного шлифования* элементов лопаток (рис. 9.15). На станке устанавливаются три алмазных правящих ролика – два на шлифовальной бабке и один на столе. С минимальными затратами на переналадку путем смены кругов и рабочих приспособлений возможно последовательное выполнение трех операций: шлифование елочного профиля хвостовика, шлифование контактных площадок и шлифование скосов. Использование станка в подобном варианте существенно сокращает затраты на оборудование и производственные площади при изготовлении лопаток малой серии и позволяет легко перестраиваться, в случае необходимости, на другие детали, имеющие сложнопрофильные поверхности.

Для полной автоматизации обработки турбинных лопаток создаются **обрабатывающие ячейки и линии** на их основе. На рис. 9.16 приведена трехпозиционная обрабатывающая ячейка, предназначенная для обработки хвостовой части турбинной лопатки. Несколько ячеек, объединенных транспортными, загрузочно-разгрузочными, измерительными и другими системами образуют автоматическую линию. Подобная линия разработана фирмой "Элб-Шлиф" (Германия).

Известны также автоматические линии по обработке турбинных лопаток, состоящие из плоскошлифовальных двухкруговых и однокруговых станков обычной компоновки, объединенных в единую систему транспортными, погрузочно-разгрузочными, измерительными и управляющими устройствами.

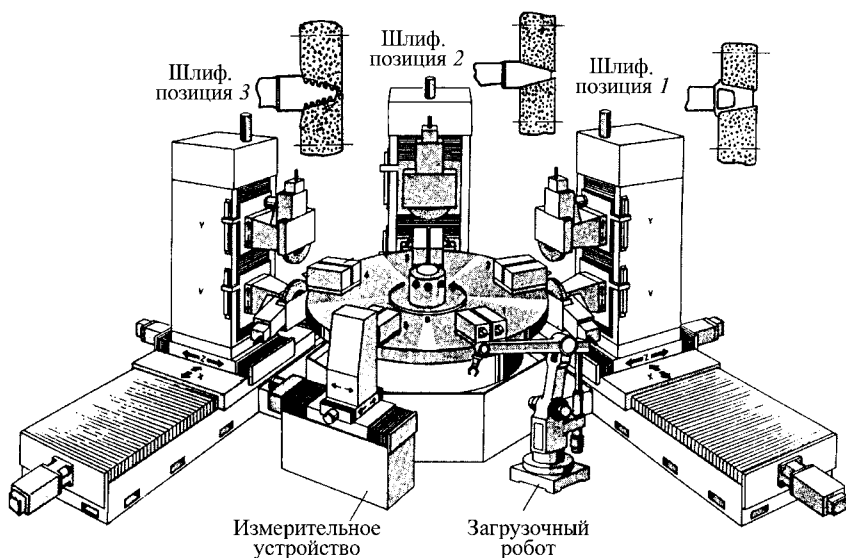


Рис. 9.16. Трехпозиционный автоматический обрабатывающий центр для обработки замковой части турбинных лопаток

Обработка радиусных поверхностей лабиринтных уплотнений бандажной полки на автоматических линиях принципиально возможна *методом профильного глубинного шлифования с круговой интерполяцией*, т.е. при сложном относительном движении круга по двум координатам. При этом точность обработки относительно профиля замка должна быть такой, чтобы при сборке всех лопаток в рабочую катушку лабиринтные уплотнения совпали по всем размерам. Обработка профиля бандажной полки осложняется конструкцией, имеющей тонкие гребешки с фаской на вершине, что не дает возможности изготовить алмазный правящий ролик идентично профилю, что в свою очередь вызывает необходимость последовательно обрабатывать профиль по элементам, в лучшем случае с применением двух алмазных роликов.

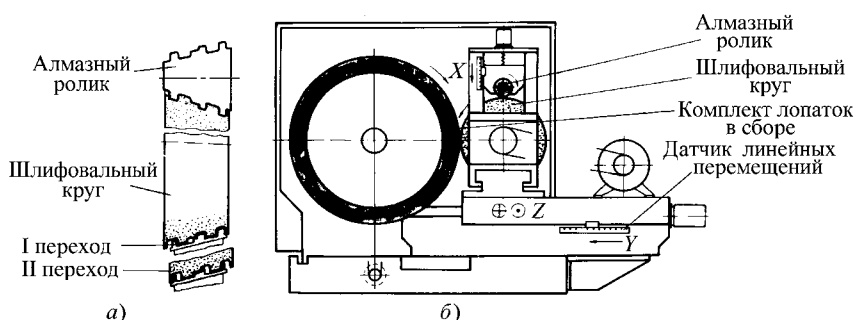


Рис. 9.17. Схема двухпереходного профильного шлифования гребешков лабиринтного уплотнения бандажных полок турбинных лопаток:

а — схема шлифования; *б* — компоновка специального станка с ЧПУ для выполнения данной операции

На рис. 9.17 приведена *прогрессивная схема формирования полного профиля лабиринтных уплотнений бандажной полки и компоновочное решение специального станка для круглого двухпереходного профильного шлифования с непрерывной правкой круга одним алмазным роликом*. Алмазный ролик имеет все элементы профиля бандажной полки, но разнесенные по ширине на величину, позволяющую изготовить профиль ролика. На первом переходе производится обработка всех левых элементов профиля, затем шлифовальная бабка с кругом сдвигается поперечно (координата Z) на величину утолщения гребешков ролика и производится обработка правых элементов профиля путем врезания по координате Y до необходимого размера.

Эту схему обработки лабиринтов бандажной полки можно осуществить также на карусельном шлифовальном станке модели ЛШ-278 производства Липецкого станкостроительного завода.

9.4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК ГТД

Компрессорные лопатки – многочисленные и наиболее ответственные детали современного ГТД. Отличаются значительным диапазоном размеров, начиная от больших вентиляторных лопаток (до 1000 мм) на входе компрессора и кончая лопатками размером 30...40 мм по перу у последних ступеней высокого давления.

Большинство компрессорных лопаток изготавливается из титановых сплавов ВТ3-1, ВТ8М, а последние высокотемпературные ступени – из стали 10Х15Н35В3ТЮ и др. Конструктивно компрессорная лопатка (рис. 9.18) состоит из профильной проточной части пера *1*, антивибрационных полок *2* со стороны спинки и корыта, замковой части *3*. Антивибрационные полки имеют более крупные лопатки первых ступеней. Крупные вентиляторные лопатки имеют елочный хвостовик вместо традиционного хвостовика типа "ласточкин хвост" у большинства компрессорных лопаток.

Широкий диапазон геометрических размеров компрессорных лопаток, конструктивные особенности некоторых лопаток (наличие антивибрационной полки), особенности применяемого материала (титановые сплавы) определили разнообразие методов получения заготовок, отличающихся в основном формированием профиля пера и степенью приближения его размеров к окончательному. В отличие от современной технологии изготовления

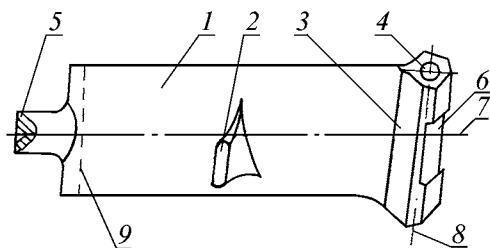


Рис. 9.18. Заготовка типовой компрессорной лопатки:

1 – профильная часть пера; *2* – антивибрационная полка; *3* – хвостовик типа "ласточкин хвост"; *4, 5* – базовые фаски; *6* – выемка на торце замка; *7* – продольная ось лопатки; *8* – ось хвостовика; *9* – линия отрезки

турбинных лопаток, где профиль пера получают окончательно точным литьем и все проблемы сосредоточены на механической обработке элементов хвостовика и бандажной полки, при изготовлении компрессорных лопаток методы окончательного получения профиля пера разнообразны и еще далеки от совершенства. В технологическом процессе присутствует много ручных шлифовальных и других доводочных работ.

В зависимости от уровня развития технологии и традиций отдельных предприятий *методы получения окончательного профиля пера могут быть следующими:*

- 1) штамповка, обработка на копировально-фрезерных станках, алмазное шлифование, ручное полирование;
- 2) точная штамповка, метод ЭХО, освежение профиля виброполированием или ручным полированием;
- 3) изотермическая штамповка, полирование;
- 4) горячее изотермическое вальцевание, холодное вальцевание;
- 5) точная штамповка, холодное вальцевание;
- 6) точное литье, изостатическое прессование.

Метод ЭХО для формирования профиля пера лопатки, широко применяемый на заре развития газотурбинных двигателей, не утратил своего значения и по настоящее время. Особенно целесообразно применение метода в опытном производстве при изготовлении лопаток малой серии. Не изнашиваемый в процессе обработки инструмент-электрод позволяет получить серию лопаток с окончательным профилем пера из любой упрощенной заготовки. В дальнейшем требуется только снятие растравленного поверхностного слоя механизированными методами.

Изотермическая штамповка является одним из перспективных путей повышения точности и приближения профиля пера заготовки к окончательному. Метод деформирования в изотермических условиях при постоянной температуре заготовки и штампов обеспечивает стабильность деформации при меньших нагрузках, однородность структуры и механических свойств. Изотермической штамповкой получают заготовки повышенной точности с полотнообразной малой толщины и высокими тонкими ребрами. Метод ус-

пешно применяется при формообразовании заготовок титановых компрессорных лопаток различных размеров как с открытыми профилями, так и с антивибрационными полками.

Применение заготовок, полученных деформированием в изотермических условиях, позволяет резко повысить коэффициент использования материалов и сократить трудоемкость получения окончательного профиля пера. С появлением метода изотермической штамповки стоит задача окончательного формообразования профиля пера компрессорных лопаток за один или несколько переходов. Выполнение этой задачи осложняют явления адгезионного взаимодействия на границе заготовка–инструмент и увеличенная неравномерность деформации при ее большой степени за один переход, что приводит к образованию застойных зон и дефектов.

Многопереходная штамповка приводит к возникновению газонасыщенного твердого слоя, снижающего стойкость штампов, и к необходимости его дальнейшего удаления. Стойкость материалов штампов для изотермической штамповки является одним из решающих факторов снижения точности заготовок. Большие перспективы имеет применение для штамповой оснастки интерметаллидных сплавов, выдерживающих температуру деформирования титановых и других заготовок до 1100 °С. Основой такого сплава являются аллюминиды титана типа TiAl (γ – фаза). Температура начала рекристаллизации такого сплава (0,5...0,6) $T_{пл}$ (температуры плавления), в то время как у чистых металлов и легированных растворов – (0,3...0,4) $T_{пл}$.

Стремление к уменьшению числа переходов или к получению готовой лопатки за одну деформирующую операцию привело к созданию *методов деформации с уменьшенными усилиями и улучшенной схемой течения и заполнения формы материалом*. Эти методы основаны или на совмещении кинематических элементов классической штамповки с прокаткой (вальцевание) или на чистой кинематике вальцевания. В первом случае пуансон в процессе объемной изотермической штамповки в наклонном положении формирует замковую часть лопатки, затем получает поворотное движение, локально выдавливая металл и формируя перо, после чего производится объемная калибровка всего профиля. Этот ме-

тод применим для изготовления крупных компрессорных лопаток, в том числе с антивибрационными полками, за один переход.

Применение **методов горячего и холодного вальцевания** позволяет получить профиль пера титановых и стальных компрессорных лопаток с необходимой точностью без применения других формообразующих методов. Метод вальцевания применяется преимущественно для малогабаритных лопаток (до 100 мм длиной) без антивибрационных полок. Применение вальцевания заготовок более крупногабаритных лопаток резко сокращает объем доводочных операций, особенно ручных полировальных работ.

Специфика титановых сплавов до сих пор не дает возможности получать ответственные отливки без внутренних дефектов в виде раковин и пор, к которым особенно чувствительны показатели предела усталости. Технологи имеют ограниченное количество приемов и средств воздействия на качество титановых отливок в отличие от других материалов, например, жаропрочных сплавов. Это связано с тем, что титановый сплав обладает теплопроводностью в десятки раз меньшей, чем другие материалы, и формообразование отливки происходит в условиях тепловой самоизоляции.

Обнадеживающие результаты по повышению прочностных свойств титановых отливок получены при применении **метода горячего изостатического прессования**. Метод состоит в том, что отливки помещаются в особо прочную камеру и подвергаются совокупному воздействию высокой температуры (900...1400 °C) в среде аргона и высокого давления (100...150 МПа). Нагрев резко снижает предел текучести сплава, а высокое давление вызывает пластическую деформацию, течение материала и залечивание внутренних дефектов за счет некоторого уменьшения объема отливки.

Однако выяснилось, что чем меньше пористость, особенно округлой формы газового происхождения, тем хуже она залечивается. Это связано с более высокими прочностными характеристиками радиусных арок малого размера (0,1 мм) и требующимся более высоким давлением для их разрушения. В то же время выяснилось, что при залечивании более крупных дефектов литой пористый металл фактически пронизывается волокнами деформирован-

ного металла, что напоминает структуру композиционных материалов. Из теории композитов известно, что упрочняющая фаза не обязательно должна быть непрерывной и достаточно пятикратного превышения длины над диаметром, чтобы она работала как волокно. *Отсюда следует парадоксальный, на первый взгляд, вывод, что чем более пористую отливку подвергают горячему изостатическому прессованию, тем выше ее конечные свойства.*

Это, практически, новый метод получения композиционных титановых материалов с непредсказуемо широкими возможностями изготовления ответственных деталей ГТД, в том числе и вращающихся. Метод горячего изостатического прессования бурно развивается, особенно в США. Многие фирмы, специализирующиеся на производстве титановых отливок, стопроцентно подвергают их горячему изостатическому прессованию.

Прогрессивный техпроцесс изготовления компрессорных лопаток ГТД должен содержать:

1) *метод формирования проточной профильной части пера лопатки с окончательной геометрической точностью;*

2) *оптимальные прочностные свойства материала (особенно титановых сплавов) и минимальный дефектный поверхностный слой;*

3) *равномерное распределение припуска на поверхностях, подлежащих дальнейшей механической обработке относительно окончательно сформированного пера;*

4) *точные и надежные базовые поверхности для обработки замка и других элементов относительно сформированного профиля пера;*

5) *метод обработки замка с минимальными усилиями и повышенной точностью;*

6) *наличие более твердого и износостойкого слоя материала на контактных площадках антивибрационных полок;*

7) *максимально механизированные методы доработки элементов пера (радиусы перехода от замка к перу, антивибрационные полки, входные и выходные кромки);*

8) *механизированные методы снятия поверхностного дефектного слоя пера, освежения и придания профилю необходимой шероховатости;*

9) *механизированные методы упрочнения профиля пера и замка;*

10) *достоверные и надежные методы контроля геометрической точности и качества поверхностного слоя.*

В зависимости от габаритов, конструктивных особенностей компрессорной лопатки и метода получения профильной части пера дальнейший техпроцесс может отличаться количеством доработочных операций. Так, заготовка для вальцевания должна иметь предварительно обработанный замок, после вальцевания требуется доработка радиусов перехода и кромок лопатки.

Важными в техпроцессе изготовления лопаток компрессора являются операции образования промежуточных базовых поверхностей и обработки хвостовика, который служит базой для всех дальнейших операций и для измерения. Распределение припуска и заливка лопатки в брикет позволяют обработать хвостовик любым методом, в том числе протягиванием с большими силами. Применение методов обработки хвостовика с незначительными силами резания делает приемлемой обработку, особенно малогабаритных лопаток, в кассете с точно выполненными ложементами и механическим зажимом. Необходимость последующего удаления дефектного слоя делает менее опасным деформирование поверхности лопаток при зажиме.

Одним из эффективных методов создания баз для обработки компрессорных лопаток с полностью геометрически сформированным профилем пера является нанесение трех засверленных углублений с точными фасками – двух со стороны торцов хвостовика и одной на периферийной части пера – после точного ориентирования лопатки в пространстве относительно профиля на специальной установке. На этой же установке производится обработка базового торца хвостовика. Эти базовые поверхности однозначно ориентируют ось лопатки в приспособлении и принципиально позволяют обработать хвостовик любыми методами резания, но предпочтение отдается методам, обеспечивающим наименьшие

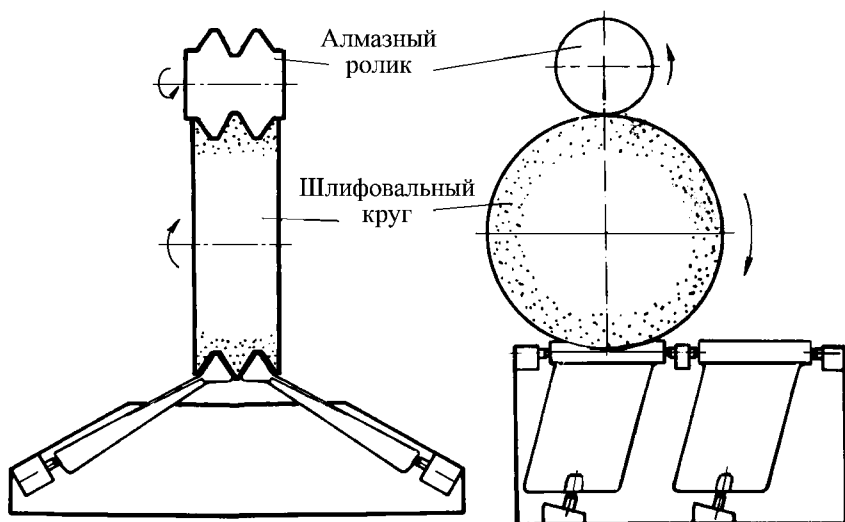


Рис. 9.19. Схема односторонней обработки (станок типа ЛШ-220)

усилия, что значительно влияет на точность расположения хвостовика относительно пера при обработке и сохраняет долговечность приспособления. Наиболее приемлемым является метод глубинного шлифования с перспективой дальнейшего совершенствования путем применения метода скоростного глубинного шлифования.

Обработка хвостовика типа "ласточкин хвост" методом глубинного шлифования возможна по двум схемам.

1. *Односторонняя двухпереходная обработка с перестановкой лопаток на плоскошлифовальном однокруговом станке типа ЛШ-220 (рис. 9.19).* Шлифовальный круг заправляется по профилю алмазным двухручьевым роликом, содержащим все элементы хвостовика по каждой стороне. Припуск на подошве хвостовика распределяется на два перехода.

2. *Однопереходная обработка на двухкруговом станке типа ЛШ-233.* Два одноручьевых алмазных ролика формируют на

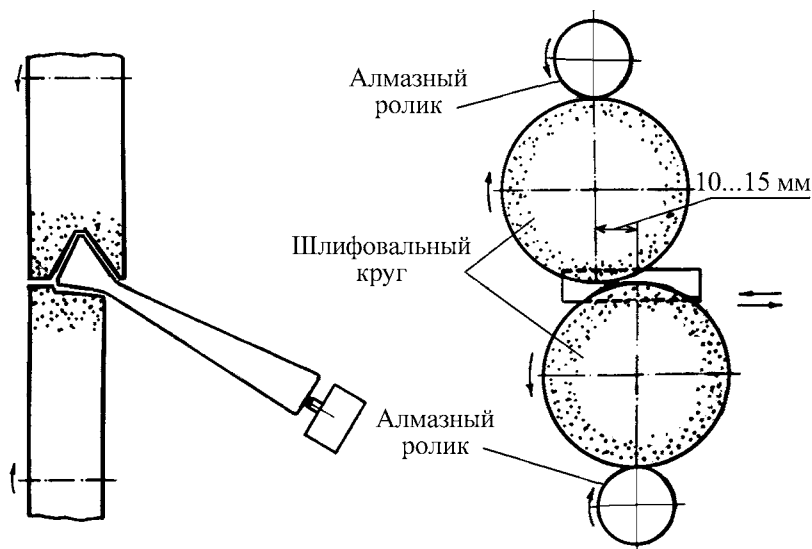


Рис. 9.20. Схема двусторонней обработки (станок типа ЛШ-223)

верхнем и нижнем кругах профили, в совокупности создающие при замыкании общий профиль хвостовика типа "ласточкин хвост" (рис. 9.20).

По производительности обработки обе схемы практически равнозначны, так как одновременно обрабатывается одинаковое количество поверхностей. Количество устанавливаемых лопаток в продольном направлении ограничивается длиной стола станка, так как обработка производится с непрерывной правкой. В первой схеме потери времени связаны с перестановкой лопаток для второго перехода. Первая схема осуществляется на универсальном плоскошлифовальном станке на более простых по конструкции рабочих приспособлениях. Для второй схемы требуется станок в специальном исполнении со смещением центров кругов в продольном направлении. Это требуется для исключения касания кругов при замыкании профиля, что оставляет по линии замыкания полоску неснятого материала и требует ручной доработки. Кроме

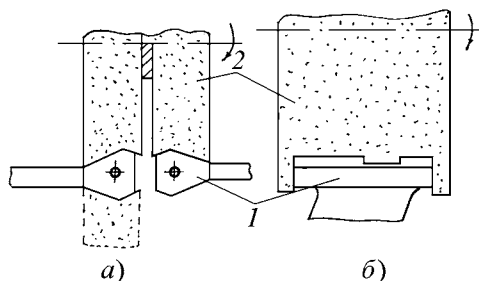


Рис. 9.21. Схема раздельной обработки методом глубинного шлифования элементов хвостовика типа "ласточкин хвост":

а – шлифование профильной части по односторонней и двусторонней схемам; *б* – шлифование подошвы торцов и выемки; 1 – обрабатываемые детали; 2 – шлифовальные круги

того, приспособления кассетного типа более сложны конструктивно, а также в доводке и настройке. Преимуществом второй схемы является возможность автоматической загрузки и выгрузки кассет с обрабатываемыми лопатками при полной автоматизации обработки на автоматических линиях.

Как для односторонней, так и для двусторонней обработки возможно применение раздельной схемы образования профильной части хвостовика и подошвы. Так как обработка торцов лопатки и выемки на подошве при любой схеме формирования рабочей части замка выделяется в отдельную операцию, то целесообразно, усложнив несколько эту операцию, обрабатывая одновременно и подошву, значительно упростить схему образования ответственной размерной части хвостовика лопатки типа "ласточкин хвост" (рис. 9.21).

Существенно упрощаются по конструкции и становятся более универсальными правящие алмазные ролики профильной части (рис. 9.21, *а*). Для упрощения конструкции и повышения универсальности алмазного правящего инструмента для торцов и подошвы с выемкой целесообразно, в свою очередь, разделить операции на две – обработка торцов, затем подошвы с выемкой.

Применение метода глубинного шлифования для обработки замков типа "ласточкин хвост" титановых компрессорных лопаток

вместо метода протягивания кардинально меняет весь техпроцесс, позволяет максимально его автоматизировать, вплоть до создания автоматических линий, подобно существующим для обработки турбинных лопаток.

9.5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК

Сопловые лопатки турбин ГТД работают в высокотемпературном газовом потоке, направляя его на рабочие лопатки. Заготовки сопловых лопаток изготавливают методом точного литья по выплавляемым моделям из жаропрочных сплавов типа ЖС6К. В процессе работы сопловые лопатки испытывают тепловые удары, неравномерные расширения, подвержены газовой коррозии и термической усталости.

Конструктивно сопловые лопатки могут быть одинарными и соединенными по несколько штук в блоки. Последний вариант (рис. 9.22) более сложен в литейном производстве, но предпочтителен с точки зрения повышения экономичности двигателя за счет уменьшения перетоков газа.

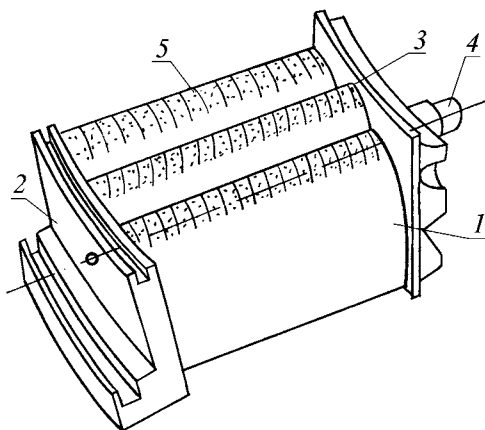


Рис. 9.22. Блочная сопловая лопатка:

1 – профильная часть пера; 2 – наружная полка; 3 – внутренняя полка;
4 – базирующая цапфа; 5 – отверстия для охлаждения

Сопловая лопатка (блок лопаток) состоит из окончательно сформированной точным литьем профильной части пера 1 и двух полок – наружной 2 и внутренней 3 для соединения лопаток с наружным и внутренним кольцами соплового аппарата. Каждая из полок имеет точно обработанные относительно пера поверхности для базирования и восприятия нагрузок с учетом температурного расширения. Лопатки выполнены внутри пустотелыми, наиболее высокотемпературные имеют большое количество отверстий малого диаметра для пленочного охлаждения поверхности пера.

Задача технологического процесса механической обработки сопловых лопаток состоит в формировании точных поверхностей полок относительно окончательно выполненного профиля пера. Совершенство техпроцесса и степень его автоматизации зависят от технологичности поверхностей и возможности применения современных методов обработки. Так наличие на полке канавок с вертикальными стенками усложняет процесс автоматизированной обработки и часто требует для их обработки введения отдельной операции.

Традиционно сопловые лопатки обрабатываются в полном наборе, часто с заливкой по перу специальным скрепляющим составом. Обработка производится методом круглого шлифования по элементам с индивидуальным получением каждого размера. Операция требует высокой квалификации работающего, дает повышенный разброс размеров и ограничивает взаимозаменяемость лопаток или блоков в приспособлении.

Прогрессивный техпроцесс обработки сопловых лопаток ГТД должен обеспечивать в необходимой последовательности:

- 1) *точное высококачественное литье с минимальными припусками* для механической обработки;
- 2) *точную обработку базовых поверхностей* – осевой цапфы и боковых поверхностей полок;
- 3) *высокоточную автоматизированную обработку всех поверхностей полок*, в том числе канавок, на карусельно-шлифовальном станке с правкой круга алмазным правящим роликом;

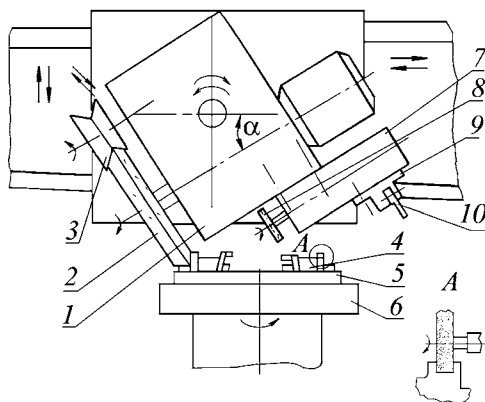


Рис. 9.23. Схема карусельно-шлифовального станка:

- 1 – поворотная шлифовальная бабка; 2 – шлифовальный круг;
3 – алмазный ролик; 4 – обрабатываемая лопатка; 5 – приспособление;
6 – вращающийся стол; 7 – скоростной шпиндель; 8 – прорезной круг;
9 – резцедержатель; 10 – резец

4) механическое крепление любого количества лопаток в приспособлении, возможность их легкой переустановки;

5) обработку профильной части внутренней полки методом профильного глубинного шлифования по радиусной поверхности на плоскошлифовальном станке с круговой интерполяцией;

6) высокопроизводительные методы электроэрозионной обработки охлаждающих отверстий в профиле пера;

7) наличие жаропрочного защитного покрытия (алитирование).

Обработка поверхностей наружных и внутренних полок производится методом круглого профильного шлифования на карусельно-шлифовальном станке типа ЛШ-278, схема которого приведена на рис. 9.23.

Шлифовальная бабка 1 со шлифовальным кругом 2 и находящимся с ним в соприкосновении алмазным правящим роликом 3 подвижна в горизонтальной и вертикальной плоскостях и может поворачиваться на угол α в пределах от 0 до 90° вокруг горизон-

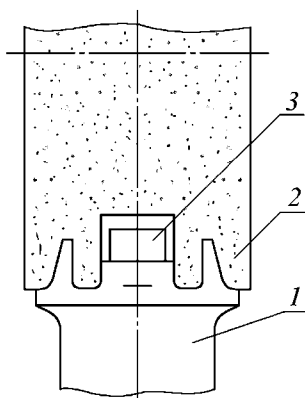


Рис. 9.24. Схема обработки методом глубинного шлифования профильной части внутренней полки сопловой лопатки:

1 – обрабатываемая лопатка;
2 – профильный шлифовальный круг; 3 – базисующая цапфа

тальной оси. Поверхности лопаток 4 обрабатываются последовательно в приспособлении 5, установленном на вращающемся круглом столе 6, путем врезания по взаимно перпендикулярным координатам с непрерывной правкой круга в процессе резания алмазным правящим роликом. Возможно изменение угла α при переходе на очередную поверхность. Все координаты снабжены высокоточными датчиками линейных и угловых перемещений.

Для обработки канавок установлен высокоскоростной шпиндель 7 со специальным скоростным кругом 8 и резцедержатель 9 с канавочным резцом 10 для подчистки предварительно прошлифованной канавки. Все операции обработки лопаток по доступным поверхностям выполняются в автоматиче-

ском цикле по настроенным размерам. Для повышения точности и стабильности обработки целесообразно шлифовальную бабку устанавливать на постоянный угол α , при этом на шлифовальном круге необходимо иметь элементы для обработки всех поверхностей, а ось дополнительного канавочного круга с резцом необходимо повернуть при настройке на угол α относительно оси шлифовального круга. При необходимости производится переустановка лопаток и обработка поверхностей с другой стороны.

Обработанные поверхности полки и цапфа являются базами для обработки профильной торцевой поверхности внутренней полки. Обработка всего профиля производится за один проход методом глубинного шлифования с непрерывной правкой (рис. 9.24).

Перемещение шлифовального круга по вертикальной координате X в процессе продольного движения колонны по координате Z

(круговая интерполяция) позволяет обработать единичные или блочные сопловые лопатки по необходимой радиусной поверхности. Создание автоматических линий для обработки отработанных конструкций сопловых лопаток ГТД с применением существующих методов механической обработки весьма проблематично. Требуется значительное изменение в сторону большей технологичности конструктивных элементов лопатки и большее приближение литых поверхностей к окончательным, что не всегда реально.

Известны попытки создания автоматических линий по обработке сопловых лопаток ГТД исключительно с применением современных высокопроизводительных и высокоточных методов размерной электроэрозионной обработки для формирования на литой заготовке всех поверхностей относительно окончательно выполненного пера.

9.6. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДИСКОВ ТУРБИН ГТД

Диски газотурбинных двигателей относятся к наиболее ответственным быстровращающимся деталям (10000 об/мин и более) и требуют выполнения технических требований на изготовление со стопроцентной надежностью. Особенно это относится к дискам турбины, работающим при повышенных температурах. Разрушение диска, как правило, приводит к катастрофе, так как относится к наиболее серьезному виду нелокализованного разрушения, выводящего из строя не только дефектный двигатель, но и соседние системы, и агрегаты самолета.

Турбинные диски работают в сложном напряженном состоянии с силовым воздействием на них разнообразных факторов:

- 1) *центробежных сил* вращающихся масс самих дисков и закрепленных в них лопаток;
- 2) *температурных напряжений*, вызываемых неравномерным нагревом дисков по радиусу и толщине;
- 3) *напряжений, вызываемых изгибными усилиями потока газов*;

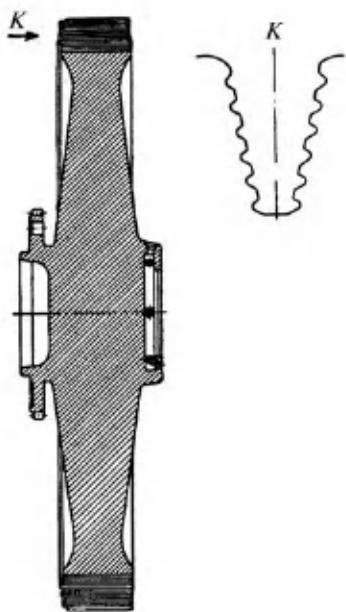


Рис. 9.25. Диск турбины
ГТД

4) *резонансных колебаний и вибраций* на разных режимах работы двигателя.

Конструктивно диск турбины состоит из полотна, на периферии которого выполнены равноотстоящие друг от друга пазы с елочным профилем, и поверхностей для центрирования и закрепления диска с валом (рис. 9.25).

Замковые пазы с елочным профилем, как правило, наклонены под некоторым углом относительно оси диска. Направление зубьев елочного паза прямолинейное у всех дисков современных авиационных ГТД. В мировой практике существуют конструкции елочных хвостовиков лопаток турбин и, соответственно, пазов дисков с криволинейным (круговым) направлением зубьев, применяемых в основном в энергетических и дру-

гих крупногабаритных турбинах наземного применения.

Прогрессивный техпроцесс изготовления дисков турбин с высокой степенью надежности должен обеспечить:

1) получение заготовок с высокими механическими характеристиками, однородностью структуры, равномерностью свойств по различным направлениям и отсутствием внутренних дефектов;

2) рациональные методы обработки всех поверхностей дисков, гарантирующие высокое качество поверхностного слоя;

3) применение специальных методов отделки полотна диска, дающих сжимающие остаточные напряжения, упрочненную поверхность и отсутствие концентраторов напряжений;

4) высокую точность выполнения замковых елочных пазов с благоприятным качеством поверхностного слоя;

5) применение специальных методов обработки и упрочнения елочных пазов и, особенно, нижней галтельной части, где наиболее вероятно зарождение усталостных трещин.

Диски турбин изготавливаются из традиционных никелевых жаропрочных сплавов типа ХН77ТЮР, ХН79МБТЮ и более современных типа ЭП741, ЭП962. Повышение эксплуатационных свойств турбинных дисков, их надежности и ресурса работы напрямую связано с прогрессивностью методов получения заготовок с минимальными внутренними дефектами и наличием методов их достоверного выявления.

Действующая до сих пор технология производства заготовок дисков основана на отливке массивных слитков и последующей их деформации традиционными методами с приданием заготовке формы, в той или иной степени приближающейся к форме диска. Данная технология имеет ряд *существенных недостатков*:

1) *наличие дефектов крупногабаритных слитков*, развивающихся из-за низких скоростей охлаждения в виде литейных пор, раковин и других несовершенств строения слитка;

2) *потребность в огромных силах прессового оборудования* для обжатия и залечивания внутренних дефектов литья;

3) *многооперационность* при изготовлении заготовок дисков со значительными потерями материала;

4) *низкая точность процессов формообразования*, большой дефектный слой и, в итоге, большие припуски и низкий коэффициент использования материала при дальнейшей механической обработке;

5) *высокая трудоемкость процесса получения заготовки и последующей обработки*.

Штамповка в изотермических условиях в закрытых штампах позволяет сократить число переходов и получить более высококачественные заготовки с меньшими припусками. Иногда целесообразно изотермическую штамповку применять только на заключительной стадии формообразования диска для придания ему необходимого качества и максимального приближения к окончательным размерам. Изотермическая штамповка крупных заготовок типа диска в закрытых штампах ставит ряд труднораз-

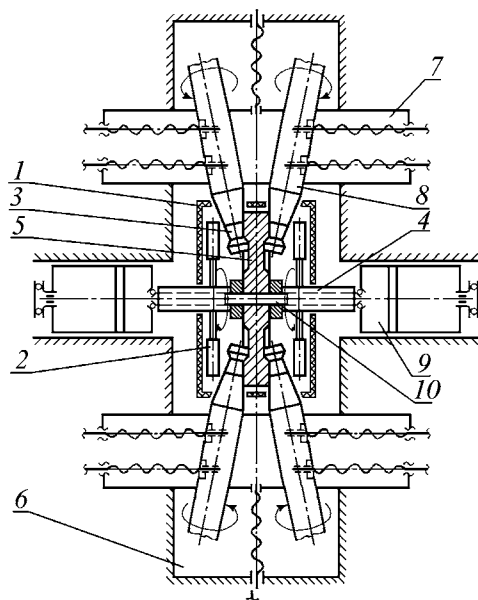


Рис. 9.26. Принципиальная схема горячей раскатки дисков ГТД:

1 – блок нагрева; 2 – карбидокремниевые нагреватели; 3 – раскатной ролик; 4 – пиноль; 5 – заготовка диска; 6 – станина; 7 – подвижная каретка; 8 – раскатная головка; 9 – бабка; 10 – оправка

решимых в серийных условиях задач. Среди них значительно большая стоимость изотермических штампов и их низкая стойкость, длительное время нагрева до $T = 900...950\text{ }^{\circ}\text{C}$ массивной оснастки (до 24 часов), усложнение переналадки на новую деталь и т.д.

Дальнейшим развитием методов получения заготовок дисков в состоянии сверхпластичности является применение более сложной кинематики при формообразовании поверхностей диска более простым компактным и универсальным инструментом в виде раскатного ролика. **Локальное двустороннее деформирование диска**, находящегося в состоянии сверхпластичности, профильными роликами, совершающими программируемые движения во взаимно перпендикулярных плоскостях, формирует его поверхности (рис. 9.26).

Применение процесса автоматизированной раскатки дисков на станках, работающих по вышеприведенной схеме, имеет преимущества перед традиционными методами пластической деформации, а также штамповкой в изотермических условиях, вследствие своей универсальности, низкой стоимости инструмента, значительного снижения сил деформирования и возможности встраивания станка в виде модуля в гибкое автоматизированное производство широкой номенклатуры дисков.

Наибольшей перспективой получения заготовок дисков с наивысшими механическими свойствами и повышенным ресурсом обладает **технология их формирования из гранул и порошков**. Микрогранулирование материала с последующим горячим компактированием обеспечивает более высокие прочностные характеристики и тонкую структуру ввиду того, что этими свойствами обладает каждая гранула (микрослиток) диаметром 0,3 мм, быстро охлаждаемая при изготовлении в атмосфере гелия и не успевающая накопить дефекты в противоположность крупным, долго охлаждаемым слиткам.

Для изготовления достаточно крупных заготовок дисков из гранул с плотностью, близкой к теоретической плотности материала, применяется *метод высокотемпературного изостатического прессования*. Предварительно сформированную заготовку помещают в тонкостенную капсулу, которую подвергают одновременному нагреву до температуры, равной 0,5...0,6 температуры плавления и давлению до 200...600 МПа, производящему всестороннее равномерное обжатие заготовки в капсуле. Заготовки дисков, полученные из гранулированных жаропрочных сплавов, имеют равномерные свойства по различным зонам и направлениям, что недостижимо при других методах изготовления. Кроме того, в наиболее напряженных зонах диска возможно усиление механических свойств за счет направленно повышенного легирования в этих зонах. В табл. 9.1 приводятся сравнительные механические свойства трех гранулированных жаропрочных никелевых сплавов, разработанных НПО "ВИЛС", НПО ВИАМ и ЦИАМ и обычных, применяемых при изготовлении дисков турбин ГТД.

9.1. Механические свойства гранулированных жаропрочных никелевых сплавов

Сплав	σ_b , Н/мм ²	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	δ , %	σ_{100}^{650} , Н/мм ²	σ_{100}^{750} , Н/мм ²
ЭП741НП	1400	950	22	1000	680
ЭП962П	1500	1100	10	1050	650
ЭП968НП	1200	800	22	700	400
ХН77ТЮР	1000	650	20	600	300
ХН73МБТЮ	1150	720	17	700	400

Применение новых материалов с более высокими показателями жаропрочности и механической прочности, как правило, вызывает ухудшение их обрабатываемости лезвийным режущим инструментом. Наиболее ответственной в технологии обработки турбинных дисков является **операция формирования елочных замковых пазов**. Обработка пазов производится традиционно методом протягивания. При необходимости обработки крупногабаритных дисков из новых труднообрабатываемых материалов возникают технологические трудности при применении только метода протягивания.

Для предварительного формирования клинового паза требуется применение большого количества дорогостоящих протяжек (до 20 шт.) в трудно автоматизируемом процессе обработки. Перспективным направлением обработки пазов елочного профиля в дисках турбин является глубинное шлифование с непрерывной правкой круга в процессе резания (рис. 9.27).

Для этой цели созданы станки для глубинного шлифования специальной компоновки или универсальные типа ЛШ-265 Липецкого станкостроительного завода. Станки отличаются большой мощностью привода шлифовального круга (до 70 кВт), повышенной жесткостью и позволяют в автоматическом режиме с большой производительностью (1 мин на паз) обрабатывать диски различной номенклатуры с незначительным временем перестройки.

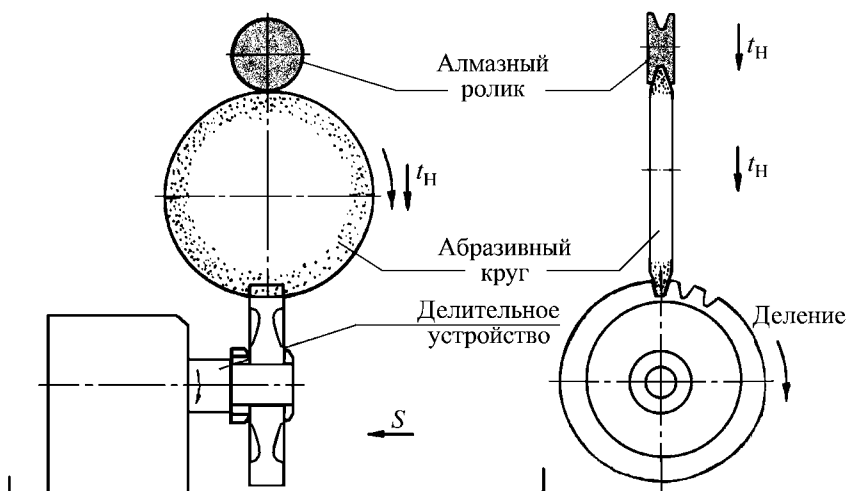


Рис. 9.27. Схема процесса глубинного шлифования с непрерывной правкой круга пазов дисков турбин ГТД:

t_H – интенсивность непрерывной правки круга, мкм/об, и компенсации

Окончательное формирование елочных профилей производится методом протягивания на максимально автоматизированных протяжных станках с применением протяжек из твердого сплава. Изготовление точных елочных протяжек, особенно твердосплавных, отличается большой трудоемкостью, требует значительных затрат дефицитного режущего материала и становится экономически невыгодным при опытном производстве. В данном случае, наиболее целесообразна технология электроэрозионной вырезки пазов проволочным электродом на современных высокоточных электроэрозионных станках. Технические характеристики станков "Ажикут" (Швейцария), дающие возможность получения точности профиля в пределах ± 3 мкм и шероховатость в пределах 0,3... 0,5 мкм, позволяют в автоматическом режиме с минимальными затратами обрабатывать елочные пазы любого профиля.

Для повышения прочностных свойств елочных пазов применяется полирование и упрочнение стальными микрошариками диаметром 0,1...0,2 мм на дробеметной установке. Полирование выкружек замков со съемом до 0,1 мм повышает предел выносливости на треть по сравнению с протянутыми замками на режимах, дающих растягивающие напряжения.

Упрочнение микрошариками полированной поверхности и наведение сжимающих остаточных напряжений повышает предел выносливости на 40 %. Специальными испытаниями образцов, вырезанных из обработанных дисков, установлено, что для материала ХН73МБТЮ по дну паза (выкружке) после полирования и упрочнения микрошариками предел выносливости $\sigma_{-1} = 240$ МПа и сопоставим с пределом выносливости стандартных круглых образцов из данного материала с радиусным надрезом ($R_H = 0,3$ мм). Испытание проводилось при $T = 650$ °С на базе $N = 20 \cdot 10^6$ циклов.

Окончательная турбоабразивная обработка дает возможность навести на полотно диска равномерную эксплуатационную шероховатость без наличия рисков и концентраторов напряжений, с наведенными сжимающими остаточными напряжениями и умеренной глубиной и степенью наклепа.

9.7. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Передовые достижения в области вычислительной техники, программирования, измерения, станочных узлов и систем позволили создать станок для шлифования конических зубчатых колес с круговым зубом по принципиально новой схеме. Станок модели WNC-30, G-30 фирмы "Клингельнберг" (Германия) не имеет традиционных обкатной люльки и кинематических цепей. Сложные взаимные обкатные движения инструментальной люльки и изделия заменены вращением детали в совокупности с прямолинейными относительными движениями инструмента (чашечного круга) и формируемого профиля зуба. На рис. 9.28 приведена схема современного зубошлифовального станка.

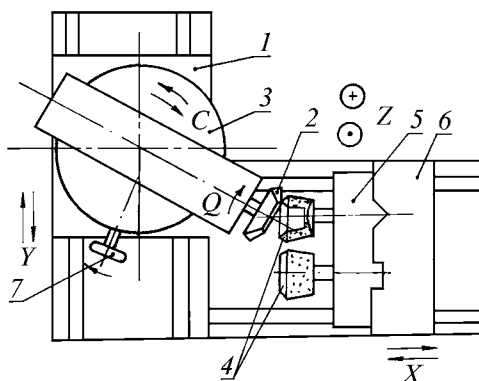


Рис. 9.28. Схема современного зубошлифовального станка для шлифования конических зубчатых колес с круговым зубом (модели WNC-30, G-30)

Бабка изделия 1 с обрабатываемым зубчатым колесом 2, расположенным на поворотном основании 3, совершает прямолинейное движение по координате Y . Два шлифовальных чашечных круга 4, расположенные на подвижной в вертикальной плоскости каретке 5, которая, в свою очередь, расположена на подвижной инструментальной бабке 6, совершают движения по координатам X и Z . Прямолинейные движения обрабатываемых профилей относительно вращающегося инструмента по координатам X , Y и Z и их вращение вокруг оси (координата Q) задают все математически рассчитанные передвижения, с теоретической точностью имитирующие обкатное движение инструментального производящего колеса в зацеплении с обрабатываемым. Обработка производится по одной стороне зуба с периодическим делением с помощью точного электронного делительного механизма. Вторая сторона зуба обрабатывается другим шлифовальным кругом, переход на вторую позицию легко осуществляется изменением координат X , Y , Z . Правка кругов по необходимому профилю с заданием рабочего радиуса по выпуклой и вогнутой стороне производится автоматически по программе с помощью правящего алмазного ролика 7 с

периферийной радиусной поверхностью, расположенного на поворотном основании 3.

Отсутствие механических кинематических связей при правке кругов и при шлифовании в совокупности с точными мерными передвижениями по координатам с помощью датчиков линейных и угловых перемещений, установленных непосредственно на конечных движущихся элементах станка, дают возможность изготавливать зубчатые пары по 3...4 степени точности. Подобная точность недостижима на станках с традиционной кинематикой, включающей в себя механические цепи.

Станок более прост по конструкции, имеет минимум соединений повышенной жесткости. Высокая жесткость станка, простота системы правки круга и высокая стойкость правящего инструмента дают возможность применять его как для высокоточной чистовой обработки, так и для предварительного формообразования профилей зубьев в пределах модулей от 1 до 8 мм без зубонарезания резцовыми головками. Шлифовальные шпиндели с кругами расположены во вращающихся эксцентриковых гильзах. При черновом зубонарезании покачивание круга при вращении гильзы создает прерывистое резание, улучшает охлаждение, что в совокупности снижает тепловыделение.

При разработке технологических процессов изготовления зубчатых колес значительное внимание уделяется **контрольным операциям**.

Современные достижения в области программирования и измерительной техники привели к коренному изменению способа измерения зубчатых колес. Разница заключается в способе воспроизведения на приборе заданной геометрии зубчатого венца.

Традиционные измерительные устройства предназначены для измерения точности отдельных элементов зубчатого венца (профиль, шаг и т.д.). Эталонная (заданная) геометрия зубчатого венца воплощается при помощи механических передаточных элементов, например, качением обкатной линейки по основной окружности в эвольвентомере. Измерительный элемент движется по истинному профилю и с помощью передаточных звеньев в определенном масштабе замеряет и регистрирует отклонения от задан-

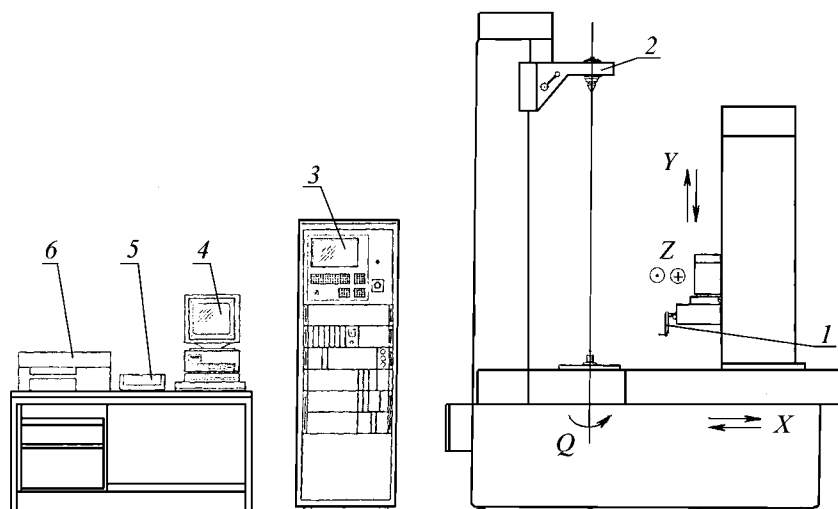


Рис. 9.29. Измерительный центр:

1 – измерительный наконечник; *2* – подвижный центр;
3 – стойка ЧПУ; *4* – компьютер; *5* – принтер; *6* – графопостроитель

ного профиля. Такие механические системы сопряжены с рядом погрешностей, и, кроме того, проявляются износ, загрязнение поверхностей и температурные колебания.

В современных измерительных устройствах механическое воспроизведение заданного профиля заменено теоретически точной математической моделью зубчатого венца. Точечный измерительный наконечник, двигаясь с высокой точностью по программе, в режиме сканирования ошупывает с определенным усилием реальный профиль, регистрирует отклонения с выводом их на дисплей, и при необходимости возможен вывод нужных параметров на принтер и графопостроитель. Существенным преимуществом такого измерения является то, что все точностные комплексы кинематической погрешности и комплексы плавности регистрируются путем однократного ошупывания всех зубьев измеряемого колеса по высоте профиля. Для оценки погрешностей направления

зуба требуется ошупывание вдоль профиля. Существует *два типа современной измерительной техники для зубчатых колес*.

Во-первых, *специальные измерительные центры с управлением от ЭВМ*, имеющие вращающийся столик с центрами для установки зубчатых колес на центровые фаски или на оправке. Математическая модель профиля измеряемого зубчатого колеса воспроизводится на измерительном наконечнике чувствительного датчика путем перемещения его по координатам X , Y , Z и вращения зубчатого колеса вокруг оси. На рис. 9.29 показана схема измерительного центра для измерения зубчатых колес. Измерение зубчатых поверхностей с внутренним венцом осуществляется с установкой колес непосредственно на вращающийся столик. К машинам подобного типа относятся измерительный центр EMZ-F фирмы "Хефлер" (Германия) и измерительный центр типа ZMC-550 фирмы "Оптон" (Германия).

Во-вторых, более универсальные координатно-измерительные машины, оснащенные матобеспечением и программами для измерения всех типов зубчатых зацеплений. К ним относятся координатно-измерительная машина типа УММ-500 фирмы "Оптон" (Германия), координатно-измерительная машина типа KMZ-S фирмы "Маузер" (Германия) и координатно-измерительная машина РММ12106 фирмы "Лейтц" (Германия).

Программа измерения цилиндрических зубчатых колес на этих универсальных измерительных машинах дает возможность измерить и записать *следующие параметры точности зубчатого венца* (рис. 9.30):

1) *диаграмму предельных отклонений окружного шага f_{pt}* – параметра плавности, сопоставимого по нормам с отклонением основного шага f_{pb} (запись по левым и правым профилям венца);

2) *по предельным отклонениям окружных шагов* построение диаграммы накопленных погрешностей окружных шагов F_p – параметра кинематической точности;

3) *по точечным замерам профилей зубьев с двух сторон* построение диаграммы биения зубчатого венца F_r – параметра кинематической точности.

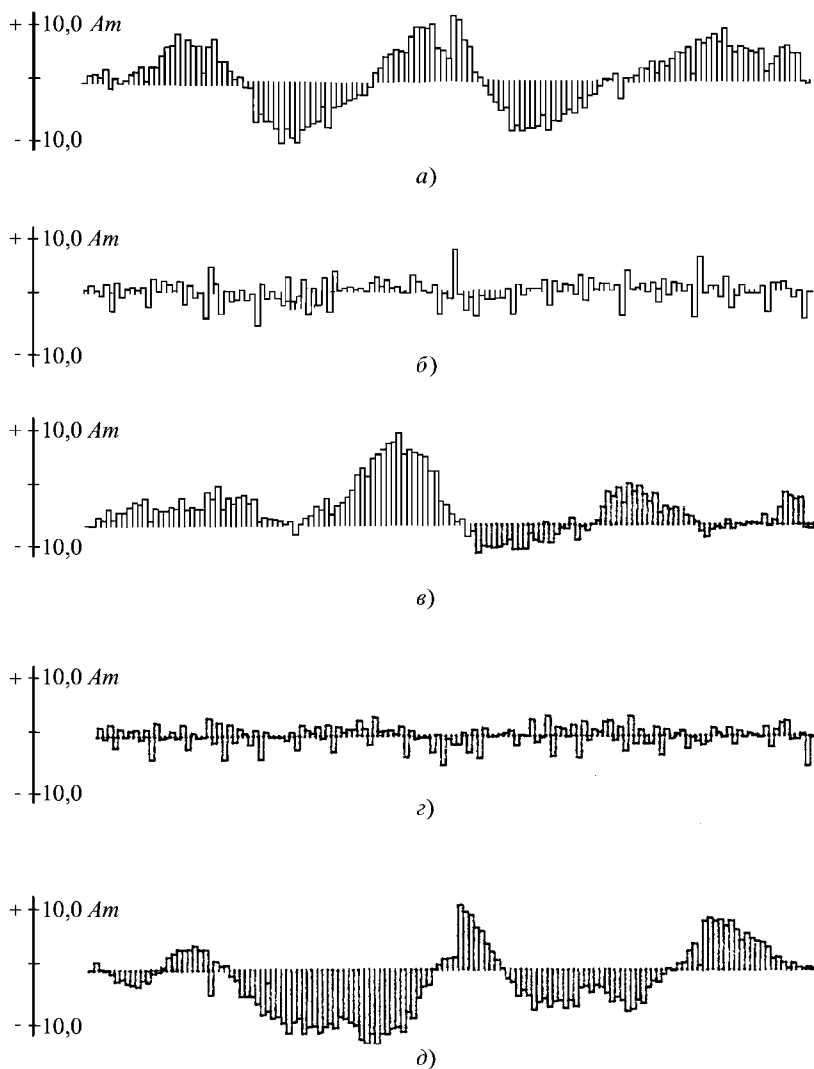


Рис. 9.30. Графики записей предельных отклонений окружных шагов по левой (*a*) и правой (*б*) сторонам профиля зуба, накопленной погрешности (*в*) по левой стороне и (*г*) по правой, биения зубчатого венца (*д*)

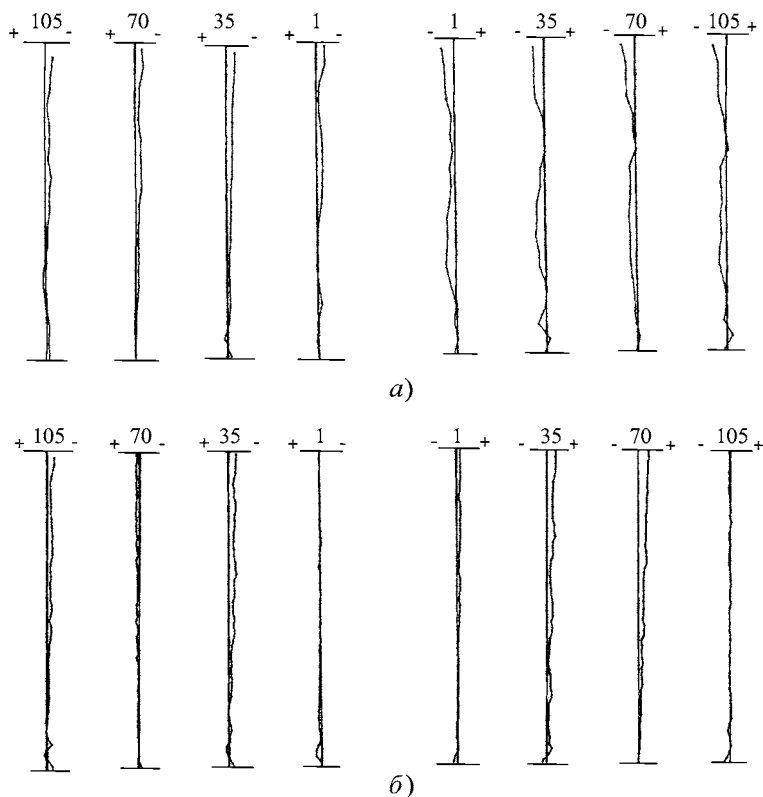


Рис. 9.31. Графики записей эвольвентных профилей 4-х зубьев по левой и правой сторонам (а) и направления 4-х зубьев по левой и правой сторонам (б)

Замер в режиме сканирования четырех равномерно распределенных в пределах венца зубьев по высоте и вдоль дают параметры (рис. 9.31):

1) суммарное отклонение профиля зуба F_a (f_f по ГОСТ 1643–81) – параметр плавности;

2) отклонение в направлении зуба F_β – норма контакта.

Для шлифованного на модернизированном МОЦ "Горизон 3" (см. рис. 8.21) зубчатого колеса внутреннего зацепления с параметрами $m = 3$, $z = 140$, $\alpha_0 = 25^\circ$, $B = 30$ мм, приведенные записи точностных параметров, замеренные на измерительной машине фирмы "Лейтц", оценивают его по нормам ГОСТ 1643–81, как выполненное по степени точности 4–4–4. Всесторонняя достоверная оценка точностных параметров высокоточных зубчатых колес с помощью универсальных измерительных средств затруднительна и не дает объективных результатов.

Идентичное матобеспечение при воспроизведении профиля конического зубчатого колеса с круговым зубом на станке WNC-30 и измерительных центрах при измерении обработанного зубчатого колеса дает возможность корректировать рабочую программу станка и изменять профиль зуба путем автоматической подналадки непосредственно с измерительной машины при отклонении отдельных параметров, заданных для обеспечения необходимого пятна контакта, и других элементов профиля на центральном управляющем компьютере – носителе математической модели обрабатываемого профиля и управляющем как рабочим станком, так и измерительной машиной.

Глава 10

ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ В ТЕХПРОЦЕССАХ НА ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ МАТЕРИАЛОВ, КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ЕГО ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ

10.1. ВИДЫ ДЕФЕКТОВ. ПРИЧИНЫ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

Отказы авиационных двигателей при эксплуатации и 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 наплавки 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 алюминиевых деталях (дисках, корпусах, лопатках). Происходит межкристаллитное разрушение на большую глубину (0,1...0,2 мм). Введение антикоррозионного анодирования на алюминиевых деталях, алитирования 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:

- 1) неравномерное нагружение деталей;
- 2) неудачное сочетание металлов;

- 3) нарушение правильного сопряжения деталей;
- 4) неправильный выбор типа подшипников;
- 5) неудовлетворительные условия смазки;
- 6) 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 три основные группы: дефекты металла, дефекты 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. Удается 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* связаны с дефектами литого материала (рис. 10.1).

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 не удаленной и несварившейся при обработке давлением усадочной раковины или усадочной рыхлости слитка.

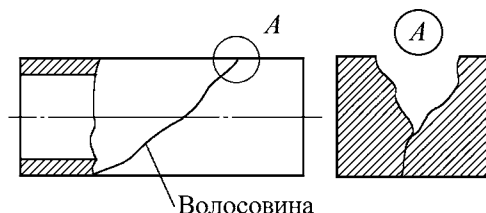


Рис. 10.1. Дефект пластической деформации

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 шлифованного 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 являются причиной поломки различных деталей (резьбовых соединений, зубчатых зацеплений, подшипниковых узлов).

Неправильно отрегулированные зазоры 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.

10.2. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ

К *неразрушающим методам контроля*, выявляющим дефекты непосредственно на деталях, относятся:

1. *магнитные методы контроля*, позволяющие контролировать качество только стальных (ферромагнитных) деталей. При этом методе могут быть выявлены следующие *поверхностные и подповерхностные дефекты*:

а) *трещины всех видов* (шлифовочные, закалочные, ковочные);

б) *дефекты материала в виде надрывов, волосовин, расслоений*.

Дефекты выявляются в виде резко очерченных линий осевшего магнитного порошка в местах концентрации силовых линий на границе повреждений, надразов, трещин. Подповерхностным дефектам соответствуют менее четкие рисунки, так как сцепление порошка с поверхностью ослаблено;

2) *капиллярные методы*, к которым прежде всего относится люминесцентный метод контроля, основанный на проявлении действия эффектов капиллярной пропитки, сорбции, диффузии, люминесценции, цветового контраста. Сущность метода заключается в следующем: на предварительно очищенную поверхность контролируемой детали наносится слой индикаторного вещества (пенетрант). Под воздействием капиллярных сил жидкость проникает в поверхностные дефекты и удерживается в них. Затем пенетрант

удаляется с поверхности очистителем, но в дефектах он остается. Под действием проявителя, тонкий слой которого наносится на контролируемую поверхность, за счет сорбционных или диффузионных процессов индикаторный пенетрант извлекается из дефекта, образуя его след под действием ультрафиолетового света (ЛЮМ-контроль). Выявляются дефекты величиной раскрытия 0,12... 0,5 мкм.

Аналогичным является *метод цветной дефектоскопии*, отличающийся от люминесцентного тем, что дефект проявляется в виде цветного следа, наблюдаемого непосредственно без применения ультрафиолетового света. Капиллярные методы выявляют только поверхностные дефекты;

3) *рентгеновские методы контроля* основаны на просвечивании деталей жесткими рентгеновскими лучами большой мощности с регистрацией различными методами полученного изображения внутреннего строения изучаемых участков или всей конструкции. Чаще всего регистрация производится на фотопленку. Наличие внутренних дефектов в виде пор, рыхлот, трещин, включений инородных материалов влияет на более свободное прохождение или ослабление рентгеновских лучей, что на пленке регистрируется в виде потемнений или, наоборот, светлых пятен.

Недостатком рентгеновского метода является зависимость положения внутреннего дефекта, особенно плоского, например, в виде расслоения, относительно направления рентгеновских лучей на его выявление. Так, лучи, направленные перпендикулярно плоскости трещины, практически ее не выявляют;

4) *ультразвуковые методы контроля* основаны на генерировании и пропускании через участки деталей ультразвуковых колебаний с последующей регистрацией интенсивности отраженных или поглощенных колебаний в местах внутренних дефектов. Метод обладает более высокой чувствительностью, чем рентгеновский и независимо от направления излучения относительно расположения дефекта выявляет значительно меньшие повреждения и поры. Метод применяется для выявления как внутренних, так и наружных дефектов (трещин, несплошностей);

5) *токовихревые методы контроля* основаны на генерировании на контролируемых поверхностях вихревых токов (токов Фуко) и регистрации преобразованных в местах нахождения дефектов сигналов на экране прибора и звуком. Метод предназначен для выявления поверхностных дефектов в виде трещин на плоскостях и криволинейных поверхностях (в отверстиях) с помощью компактных приборов-дефектоскопов, состоящих из сменных ощупывающих датчиков, в зависимости от контролируемой поверхности и регистрирующей аппаратуры с экраном. В комплект дефектоскопа входят технологические имитаторы дефектов и рабочие образцы с эталонными дефектами, по которым настраивается прибор. Метод производительно и успешно применяется для контроля входных и выходных кромок компрессорных лопаток на наличие трещин, забоин и т.д.

В особо ответственных случаях для подтверждения выявленных одним методом наружных или внутренних дефектов контроль может быть сдублирован с применением другого метода.

Выявление дефектов методами цветной дефектоскопии, ультразвуковым и токовихревым может осуществляться непосредственно на авиационном двигателе в условиях эксплуатации.

10.3. 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.

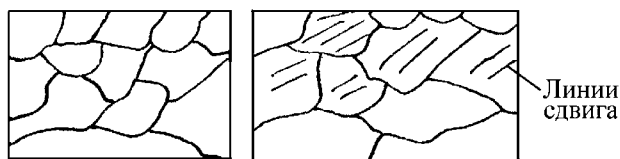
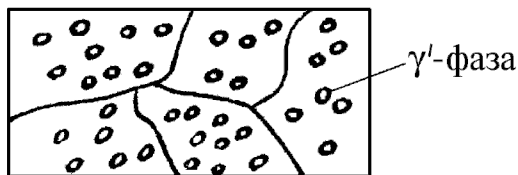


Рис. 10.2. Микроструктура поверхностного слоя:
a – исходная структура; *б* – структура после деформации

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. 10.2).

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⁻², а при скорости 18 м/мин – величину $45 \cdot 10^{12}$ см⁻². Жаропрочные сплавы на никелевой основе, такие как ЖС6К, ЭП220 и другие, имеют в своей структуре упрочняющую интерметаллидную, так называемую, γ' -фазу, которая представляет из себя большое количество вкрапленных включений типа $Ni_3(AlTi)$, хорошо видимых на *электронно-микроскопических фотографиях* (рис. 10.3).

Рис. 10.3. Интерметаллидная γ' -фаза

Под влиянием механической обработки γ' -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 °С, изменение связано в основном с силовым воздействием. Интерметаллидная γ' -фаза имеет раздробленный и вытянутый в направлении действующей силы характер. При действии высоких температур и при высоких степенях пластической деформации γ' -фаза может быть локально растворена и разрушена.

При шлифовании выделяющееся тепло воздействует на поверхностный слой детали, изменяя его микроструктуру. *Тепловой режим при шлифовании характеризуется следующими особенностями:*

- 1) поверхностные слои металла нагреваются со скоростью 2000 °С/с;
- 2) температура поверхности достигает 800...1300 °С;
- 3) продолжительность воздействия высоких температур незначительна;
- 4) поверхностные слои охлаждаются со скоростью порядка 1000 °С/с.

Эти особенности теплового режима неизбежно приводят к структурным и фазовым изменениям в поверхностном слое (прижогам).

По характеру структуры *прижоги* подразделяются на:

- 1) *прижоги отпуска*: вторичные структуры состоят из трооститно-сорбитной или трооститно-мартенситной структур, свой-

ственных отпуску при нагреве, не превышающем критической точки AC_1 ;

2) *прижоги закалки с отпуском*: вторичные структуры закалки над слоем отпущенного металла, постепенно переходящего в структуру исходного материала. При этом температура превышает точку AC_1 .

Структурные и фазовые превращения в поверхностных слоях неизбежно связаны с изменением удельного объема металла. Это является причиной образования растягивающих остаточных напряжений.

Появление прижогов сопровождается ощутимым колебанием микротвердости в различных участках поверхности. Микротвердость вторично закаленного слоя составляет 9000...11000 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 в сталях взаимосвязаны (рис. 10.4). По известной глубине структурных изменений можно определить твердость на поверхности, и наоборот: по результатам измерения твердости можно судить о глубине отпущенного слоя.

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

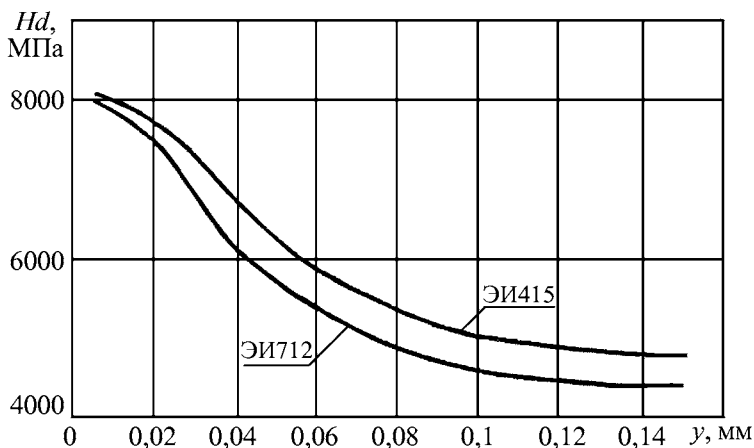


Рис. 10.4. Зависимость микротвердости от глубины структурных изменений материала детали

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 надсернической аммонии более чувствителен к выявлению прижогов малой интенсивности и является предпочтительным.

10.4. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ ГТД ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Старение. Требование повышения ресурса работы современных ГТД при одновременном повышении их тактико-технологических данных, требующих, в свою очередь, повышения температуры газового потока перед турбиной, осложнило проблему обеспечения долговечности деталей, работающих при высокой

температуре, прежде всего турбинных лопаток. Вследствие большого числа переходных режимов двигателей лопатки во время выработки ресурса подвергаются переменным термическим и механическим нагрузкам, что является причиной малоцикловой усталости и появления повреждений.

Процессы старения влияют также на длительную прочность и ползучесть. Теория высокотемпературного старения до настоящего времени полностью не разработана. Обычно старение связывают с переходом материала из недостаточно стабильного в стабильное состояние. Этот переход, обусловленный предшествующим нарушением кристаллической решетки при механической обработке (наклеп, остаточные напряжения), связан с последующими структурными превращениями или с релаксационными процессами. Механизм этих превращений весьма сложен, и на характер их протекания наиболее существенное влияние оказывает рабочая температура. В процессе старения сплавов наблюдается коррозионное растрескивание по границам зерен и зарождение очагов разрушения.

Износ и его закономерности. *Износ* – это результат постепенного изменения размеров под действием внешних сил, действующих в неблагоприятной среде, часто при повышенных температурах. Сам процесс изменения размеров поверхностей называется изнашиванием. *Изнашивание* – это сложное многофакторное явление, зависящее также от начального состояния рабочих поверхностей, сформированных в процессе изготовления деталей.

Наряду с изнашиванием за счет микрорезания абразивными частицами, ускоряемыми газовыми потоками и усталостным изнашиванием с образованием кратеров разрушения (питтинг) на поверхностях качения, чаще всего на зубчатых колесах и подшипниках существуют виды изнашивания, связанные с исходным качеством поверхностного слоя и проявляющиеся при повышенных температурах. К такому виду относится *коррозионно-механическое (окислительное) изнашивание*. Пластически деформированный при обработке и насыщенный кислородом поверхностный слой разрушается под действием многократно повторяющихся нагру-

зок, после чего в процесс вступают нижние слои металла. Особенно интенсивно процесс протекает в высокотемпературных зонах.

Фреттинг-коррозия, являющаяся разновидностью коррозионно-механического изнашивания, представляет собой процесс разрушения металла на плотно контактирующих поверхностях в результате повторяющихся тангенциальных микроперемещений поверхностей относительно друг друга, чаще всего при вибрациях. Для образования фреттинг-коррозии достаточно перемещения с амплитудой 0,025 мкм. Разрушение заключается в образовании на поверхностях взаимного касания осповидных разрушений, появлении продуктов коррозии, эрозии в виде пятен и порошка. Фреттинг-коррозия протекает на любых материалах, даже коррозионно-стойких жаропрочных лопаточных сплавах. Основным условием прогрессирования процесса является микроперемещение контактирующих поверхностей, в результате чего происходит удаление разрушенных поверхностных слоев и дальнейшее протекание процесса в глубь материала.

Типичным случаем проявления процесса фреттинг-коррозии является износ контактных площадок (зигов) турбинных и компрессорных лопаток. Износ может быть значительным, и, в конечном итоге, приводит к разбандажированию лопаток и понижению их жесткости. Изнашивание контактных площадок бандажных полок лопаток значительно снижает ресурс их работы и ресурс двигателя в целом.

При ремонте лопаток на контактные площадки напаивают пластинки материала со значительно более высокими износостойкими при высоких температурах свойствами.

Есть примеры прогрессивных техпроцессов придания повышенных износостойких свойств контактным площадкам при первоначальном изготовлении лопаток. При традиционном изготовлении лопаток для снижения интенсивности начального протекания фреттинг-коррозии и продления ресурса работы лопаток до первого ремонта важно обеспечить высокую точность выполнения геометрии контактных площадок (зигов) и *оптимальные параметры качества поверхностного слоя*. К ним относятся: оптимальная начальная шероховатость, которая за короткое время пе-

реходит в эксплуатационную, оптимальные по величине и знаку остаточные напряжения и умеренные глубина и степень наклепа.

Процесс глубинного шлифования контактных площадок (зигов) отвечает всем этим требованиям. Однако исследования по влиянию остаточных напряжений на износ при фреттинг-процессе поверхностей из титанового сплава ВТЗ-1 показали, что при установившемся износе величина и знак остаточных напряжений не влияют на его интенсивность. Полученные данные были также подтверждены при фреттинг-износе никелевого сплава ХН77ТЮР. Эти исследования еще раз подтверждают, что наиболее эффективным технологическим мероприятием против высокотемпературного фреттинг-износа является придание контактным поверхностям противоизносных свойств путем наплавки или нанесения более твердого или износостойкого слоя.

Особым видом изнашивания является **газовая эрозия**, возникающая вследствие размягчения и окисления участков рабочей поверхности. Горячий газовый поток отрывает и уносит частицы материала с разрушаемых поверхностей. Газовая эрозия может наблюдаться на сопловых и турбинных лопатках, особенно первых ступеней, подверженных наибольшим температурам. В начальный период эрозия на гладкой поверхности развивается весьма медленно, но после появления пораженных мест скорость эрозионных процессов увеличивается. Процессу начального образования очагов эрозии способствует несовершенство технологических процессов обработки, выражающееся в образовании на поверхностях, подверженных эрозионным явлениям, участков с повышенным наклепом, растягивающими остаточными напряжениями и, особенно, наличием микротрещин.

10.5. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Обеспечение требуемых эксплуатационных свойств деталей авиационных двигателей может осуществляться непосредственно путем назначения условий обработки. Это возможно на основе

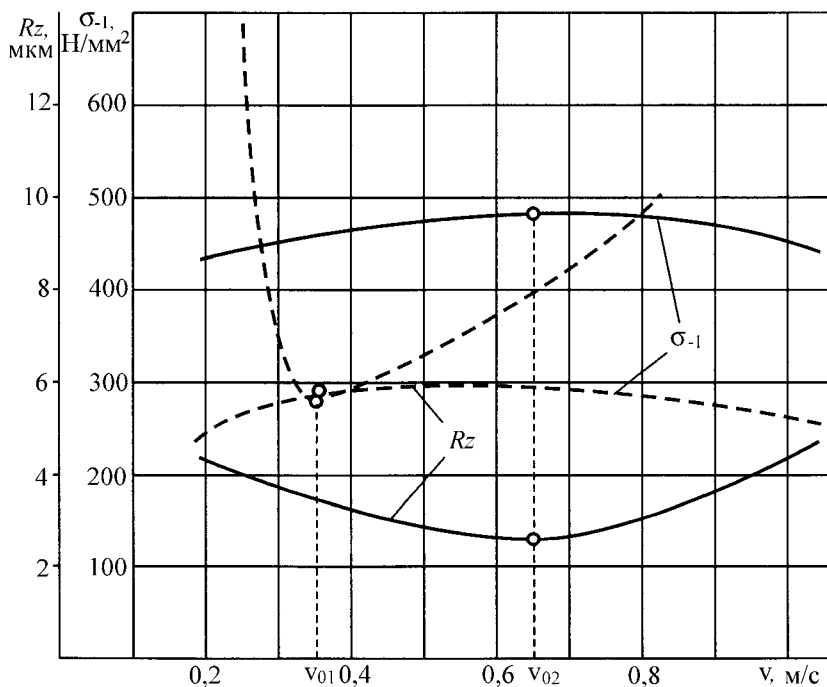


Рис. 10.5. Влияние скорости резания v на усталостную прочность σ_{-1} :

$S = 0,2$ мм/об, $t = 1$ мм, $\alpha = 10^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 15^\circ$, $r = 1$ мм;
 при обработке ХН73МБТЮ $\gamma = 10^\circ$; при обработке ВТ9 $\gamma = 0^\circ$
 (— — ХН73МБТЮ, ---- — ВТ9); v_{01} — оптимальная скорость резания для ХН73МБТЮ; v_{02} — соответственно для ВТ9

изучения, анализа взаимосвязи технологических условий обработки и эксплуатационных свойств деталей.

Как видно на рис. 10.5, наибольшая усталостная прочность σ_{-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.

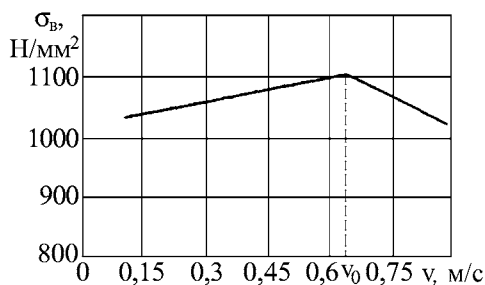


Рис. 10.6. Зависимость прочности на разрыв σ_B от скорости резания v (обрабатываемый материал ВТ9, инструмент из ВК8; условия обработки те же, что и для усталостных испытаний)

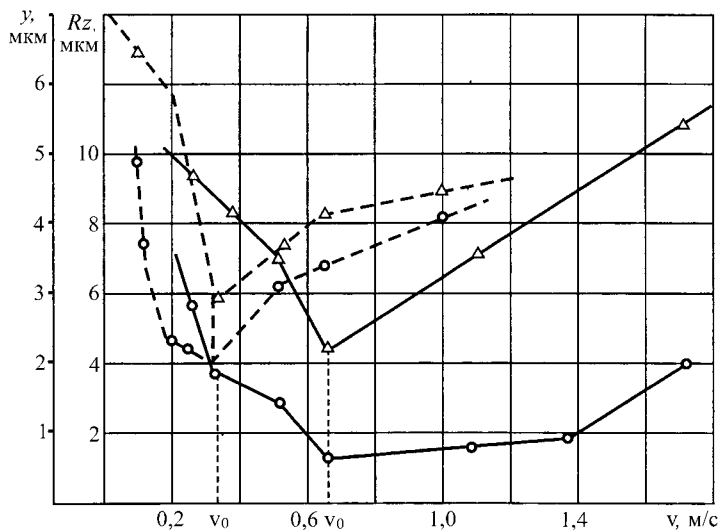


Рис. 10.7. Зависимость сближения контактирующих поверхностей y от скорости резания v при их обработке:
 $\alpha = 10^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 15^\circ$, $r = 1$ мм, $S = 0,2$ мм/об (резец из ВК8);

- $-y$ } обрабатываемый материал ВТ9, $\gamma = 0^\circ$;
- △— $-Rz$ }
- $-y$ } обрабатываемый материал ХН73МБТЮ, $\gamma = 10^\circ$
- △--- $-Rz$ }

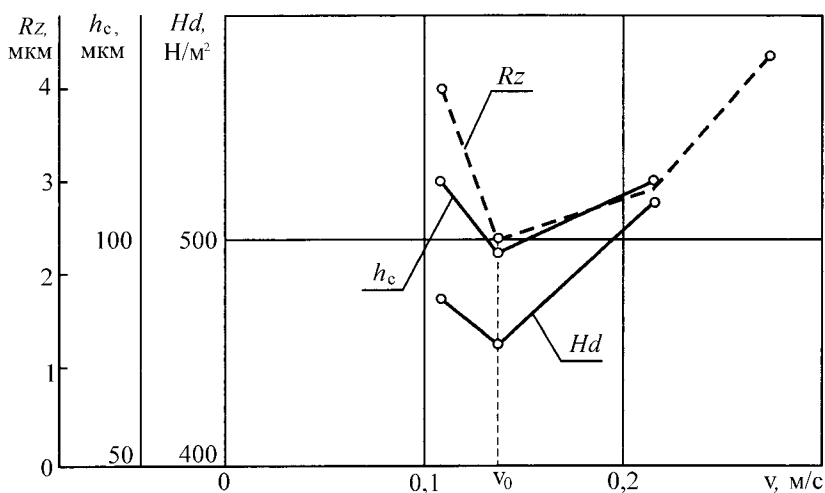


Рис. 10.8. Зависимость характеристик качества обработанной поверхности от скорости резания при фрезеровании сплава ЭП99 цилиндрической фрезой из Р18:

$S = 0,08$ мм/об; $t = 1$ мм; $\alpha = \gamma = 10^\circ$; Rz – высота микронеровностей; h_c – глубина наклепа; Hd – микротвердость поверхности

При обработке на оптимальной скорости резания обеспечивается максимальная прочность на разрыв σ_b (рис. 10.6), а также минимальное сближение или максимальная жесткость контактирующих поверхностей (рис. 10.7).

Это объясняется тем, что при оптимальной скорости резания обеспечивается минимальное или минимально стабилизированное значение параметров шероховатости и наклепа (рис. 10.8).

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. 10.9). Наибольшая стабильность их наблюдается при обработке с постоянной температурой резания (линия 2). Однако сле-

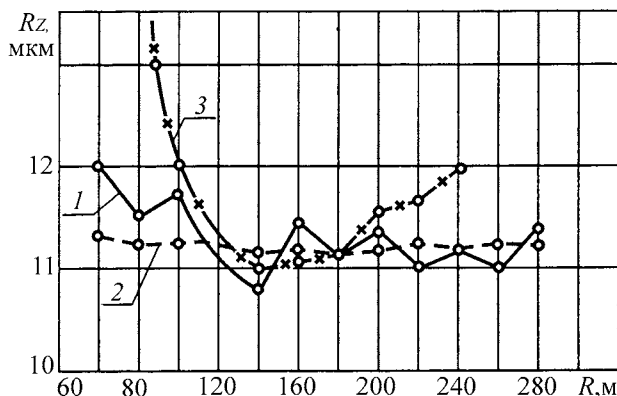


Рис. 10.9. Высота неровностей при обработке на различных режимах:

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)

дует отметить, что различные оптимальные сочетания технологических условий обработки обеспечивают различные значения параметров качества поверхностного слоя, а, следовательно, и эксплуатационных свойств (рис. 10.10).

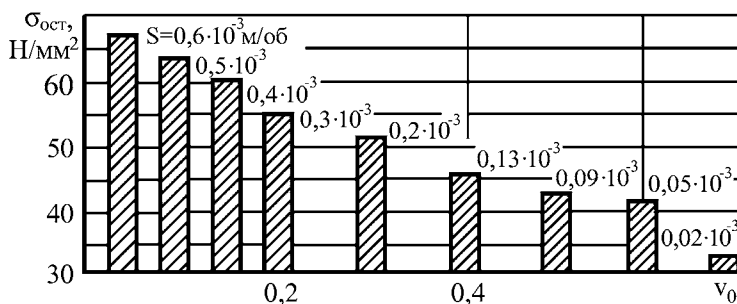


Рис. 10.10. Изменение максимума остаточных напряжений в поверхностном слое при различных оптимальных сочетаниях скорости резания и подачи: обрабатываемый материал ХН73МБТЮ; резец из ВК8:

$t = 1$ мм, $\rho_1 = 20 \cdot 10^{-6}$ м, $\alpha = 10^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 15^\circ$

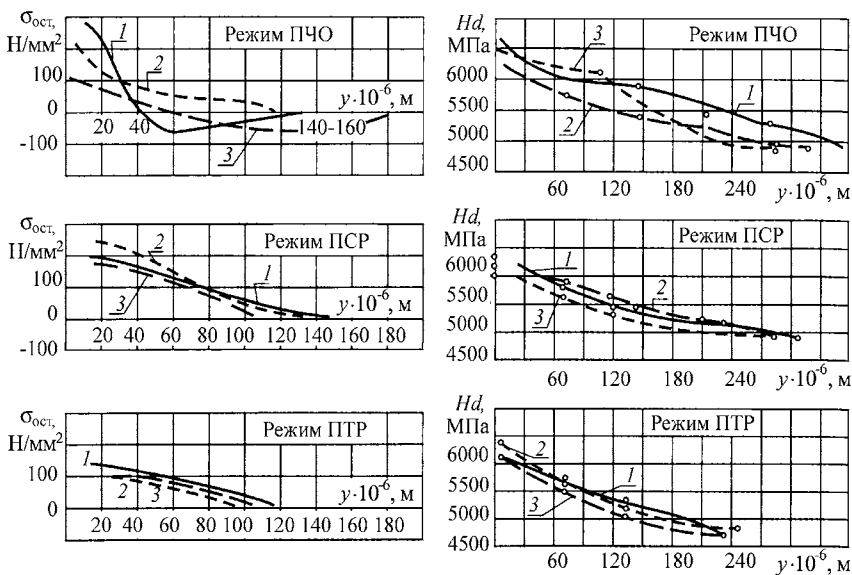


Рис. 10.11. Остаточные напряжения и микротвердость в полотно диска из ХН73МБТЮ при токарной обработке диска

на различных режимах: y – глубина слоя от поверхности;

режим ПЧО: $n = 0,62$ об/с; режим ПСР: $v = 0,35$ м/с; режим ПТР:

$\theta = 750^\circ$. 1 – $R = 0,3$ м; 2 – $R = 0,18$ м; 3 – $R = 0,08$ м; $S = 0,2$ мм/об;

$t = 1$ мм; $r = 1$ мм; $\alpha = \gamma = 10^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$

При обработке с *постоянной температурой резания* (режим ПТР) обеспечивается минимальный разброс величины и глубины залегания остаточных напряжений, а также микротвердости обработанной поверхности (рис. 10.11). При обработке с *постоянным числом оборотов* (режим ПЧО) и *постоянной скоростью резания* (ПСР) разброс значений остаточных напряжений и глубины наклепа выше.

Таким образом, для обеспечения требуемого качества поверхностного слоя необходимо определить требуемое оптимальное сочетание технологических условий обработки.

10.6. ВИДЫ ПОЭТАПНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ГТД

Для обеспечения надежности ГТД особое значение приобретает контроль качества материалов, их эксплуатационных свойств, воплощенных в конкретных деталях ГТД и обеспечиваемых технологией изготовления путем придания оптимальных свойств поверхностным слоям рабочих поверхностей. Взаимодействие деталей в изделии может быть проведено комплексными испытаниями. *Контроль качества ГТД имеет этапы:*

- 1) *входной контроль* поступающих материалов;
- 2) *цеховой контроль* изготавливаемых деталей, узлов и систем;
- 3) *выходной контроль* готовых изделий, предъявляемых заказчику.

Для всестороннего выявления отказов деталей и узлов ГТД и назначения ресурса испытаний этого недостаточно, поэтому проводятся летные испытания, особенно вновь создаваемых двигателей. Различия режимов и условий работы двигателей на стенде и в полете могут послужить причиной появления новых дефектов, лимитирующих ресурс ГТД.

Дефекты деталей двигателей на разных типах самолетов могут быть различными. Однократные производственный контроль и летные испытания не позволяют полностью выявить надежность деталей ГТД и правильно установить их ресурс. Для большинства деталей наиболее достоверно надежность может быть установлена путем анализа статистического материала по эксплуатации большого количества двигателей.

Длительные испытания ГТД, подтверждающие уровень надежности и устанавливающие ресурс, весьма трудоемки, энергоемки и требуют больших затрат времени. Для проведения испытаний по определению величины наработки на отказ или вероятности безотказной работы разработаны и применяются *специальные методы ускоренных испытаний, которые используют два методических подхода:*

1) *увеличение действующих нагрузок или формирование внешних воздействий;*

2) *увеличение относительного времени работы изделия на более напряженных режимах по сравнению с действительной эксплуатацией.*

В авиационных двигателях наблюдаются сложные взаимосвязи между внешними воздействиями и нагрузками. Поэтому испытания по методу форсированных нагрузок или внешних воздействий требуют специальных исследований и практически мало применяются.

Имеющийся опыт испытаний, доводки и эксплуатации ГТД показывает, что основной причиной повреждений наиболее нагруженных элементов двигателей, таких как турбинные лопатки и диски, находящихся под воздействием циклических, механических, термических нагрузок, является **малоцикловая усталость**. Нагрузки, приводящие к малоцикловой усталости, возникают в основном на переходных режимах работы двигателя при запуске и перемене режимов полета. В результате действия нагрузок на переходных, а также на установившихся режимах происходит накопление усталостной повреждаемости нагруженных деталей ГТД, причем определяющей является составляющая малоцикловой повреждаемости.

Существуют методики ускоренных эквивалентных испытаний, при которых с относительно большей наработкой на тяжелых режимах обеспечивается проверка длительной прочности турбины и всей горячей части двигателя за время, в несколько раз меньшее, чем при реальной эксплуатации. Однако ускоренные эквивалентные испытания, достаточно хорошо оценивая ресурсную наработку двигателей, не позволяют отрабатывать и оценивать фактические уровни надежности. Эти характеристики, кроме случайных нерасчетных нагружений и внешних воздействий, зависят от старения и изнашивания материала, местных температурных и вибрационных воздействий, возникающих в полете, и должны устанавливаться только в условиях реальной эксплуатации.

10.7. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

10.7.1. Методы контроля высокотемпературной прочности

Под *высокотемпературной областью* подразумевают совокупность температур, при которых явно проявляется обусловленная ползучестью зависимость деформации и механизма разрушения от времени. Регламентируются испытания на длительную прочность при температурах до 1200 °С.

Сущность методов испытания заключается в доведении образцов до разрушения под действием постоянной растягивающей нагрузки при постоянной температуре. В результате испытаний определяют предел длительной прочности, т.е. напряжение, вызывающее разрушение металла за определенное время испытания.

При приемосдаточных испытаниях устанавливают *контрольную характеристику* – время до разрушения при заданном напряжении, которое равно или превышает норму времени, указанную в стандартах или технических условиях на конкретный сплав, поставляемый предприятию.

Испытания на ползучесть, в процессе которых определяют кривую ползучести посредством измерения удлинения образца, по методике не отличаются от испытаний на длительную прочность, когда определяют время до разрушения. Испытания на ползучесть и длительную прочность проводят на одной и той же машине с рычажной системой (рис. 10.12). Для высокотемпературных испытаний на растяжение используют образцы с цилиндрической рабочей частью и резьбовым захватом.

На рис. 10.13 приведены конфигурации и основные размеры **образцов для испытания**. Диаметр D может быть от 3 до 25 мм. Цилиндрические образцы с $d_0 = 10$ и $l_0 = 50; 100$ мм считаются основными. Биение цилиндрического образца может быть не более 0,02 мм в центрах. Допускаемое отклонение по величине площади поперечного сечения не должно превышать 0,5 %.

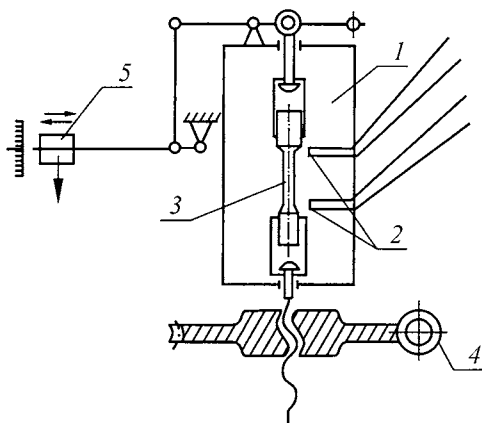


Рис. 10.12. Схема испытательной машины:

1 – нагревательная камера; 2 – термопары; 3 – испытуемый образец;
4 – нагружающий механизм; 5 – подвижный дозирующий груз

Продолжительность испытания устанавливается для каждого материала в зависимости от его назначения. Рекомендуется проводить испытания продолжительностью 50; 100; 500; 1000; 3000; 5000; 10000 ч.

Допускаются перерывы в испытаниях, во время которых нагрузка может сниматься полностью или частично.

Результаты приемосдаточных и других контрольных испытаний с перерывами считаются действительными, если суммарная продолжительность испытания образца в нагруженном состоянии при заданной температуре не ниже установленной стандартами или техническими условиями на данный сплав.

Результаты испытаний считаются недействительными, если разрыв образца произошел по разметочным рискам или кернам, а также за пределами его расчетной длины или в зоне галтелей. Результат недействителен при разрыве образца по дефектам металлургического производства (расслой, раковина и др.).

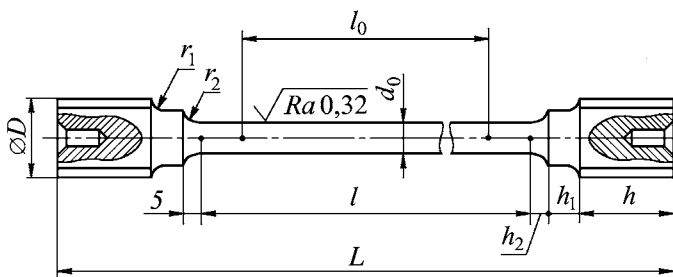


Рис. 10.13. Основные соотношения стандартного образца для высокотемпературных испытаний:

l_0 — участок рабочей длины, на котором определяют удлинение;
 $l_0 = 50$ мм (короткие образцы); $l_0 = 100$ мм (длинные образцы)

Кроме полученных контрольных данных по конкретным материалам испытания на высокотемпературную прочность позволяют построить кривые длительной прочности.

В логарифмических координатах строится зависимость напряжение—время испытания при определенных температурах. Линия построения в данных координатах называется **основной кривой длительной прочности**. Параметры ползучести чувствительны к напряжениям и температуре, а также в значительной степени

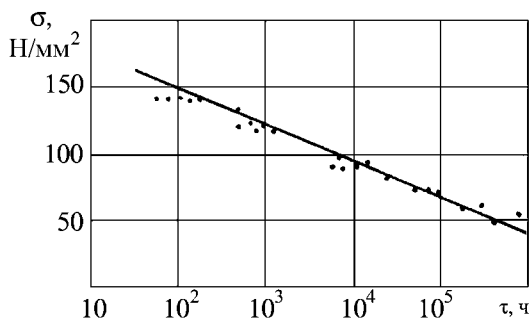


Рис. 10.14. Типовая кривая длительной прочности

определяются микроструктурой. Поэтому на результатах сказывается не только точность поддержания параметров испытаний (температура, напряжение), но и регламентированные допуски на механические свойства материалов.

Достоверную кривую длительной прочности можно получить, имея большое количество точек (порядка 10) для каждого напряжения (рис. 10.14). Установление допустимых напряжений на основе данных по длительной прочности для случаев больших ресурсов затруднительно. Это требует большого времени испытаний. Поэтому обычно прогнозируют длительную прочность, экстраполируя данные сравнительно кратковременных испытаний (порядка нескольких тысяч часов). Однако существует опасность ошибок при экстраполяции на время, превышающее имеющиеся данные по долговечности более чем в 10 раз из-за заметного изменения свойств материала.

10.7.2. Контроль усталостной прочности

Задача усталостных испытаний – дать количественную оценку способности материала работать в условиях циклического нагружения без разрушения.

В заводских условиях чаще всего сравнительные усталостные испытания проводят при введении в техпроцессы изготовления новых методов обработки и новой технологии получения заготовок для гарантированного обеспечения прочностных свойств на прежнем испытанном уровне или подтверждения более высоких прочностных свойств, закладываемых специальными методами обработки.

Современные методы усталостных испытаний весьма разнообразны. Они отличаются характером изменения напряжений по времени, схемой нагружения, наличием или отсутствием концентраторов напряжений. В процессе любого усталостного испытания на образец действуют циклические напряжения, непрерывно меняющиеся по величине и знаку.

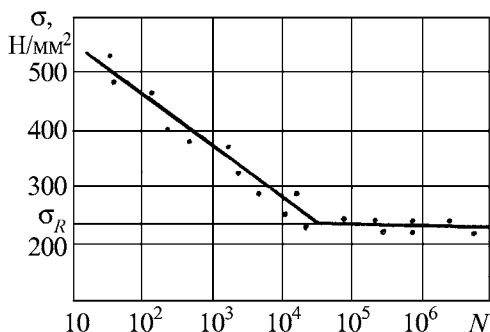


Рис. 10.15. Типовая кривая усталостной прочности

Цель испытаний образцов состоит в определении предела выносливости σ_R — наибольшего значения максимального напряжения цикла, при действии которого не происходит усталостного разрушения образца после произвольно большого или заданного числа циклов нагружения.

По результатам испытаний отдельных образцов строят кривую усталости в координатах: *максимальные напряжения цикла* $\sigma_{\max}$ — *долговечность* N (количество циклов). По мере уменьшения максимального напряжения цикла долговечность всех материалов возрастает. У большинства материалов кривая усталости асимптотически приближается к прямой, параллельной оси абсцисс. Ордината, соответствующая постоянному значению $\sigma_{\max}$, и есть **предел выносливости материала**, σ_R — наибольшее напряжение, которое не вызывает разрушения при любом числе циклов N . Типовая кривая усталостной прочности приведена на рис. 10.15.

Испытания с определением предела выносливости относятся к высокоцикловым ($N=10^7 \dots 10^8$ циклов).

В практике сравнительной прочностной оценки новых методов обработки нашли применение ускоренные малоцикловые испытания. Так, при исследовании прочностных свойств титанового

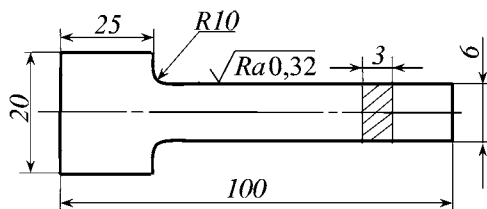


Рис. 10.16. Типовой образец для усталостных испытаний

сплава ВТЗ-1 после глубинного шлифования по сравнению с традиционным протягиванием проведены сравнительные испытания в малоцикловой области. Были изготовлены специальные образцы (рис. 10.16), плоские поверхности которых с двух сторон обработаны методом глубинного шлифования и протягивания. Испытание производилось на резонансной установке ВЭДС-400.

10.1. Результаты испытаний образцов, обработанных методом глубинного шлифования

№ образца	Начальное напряжение, Н/мм ²	Напряжение разрыва, Н/мм ²	Резонансная величина f , Гц	Число циклов до разрушения	Результаты испытаний
1	300	480	444	87870	Трещина по зажиму
2	400	580	445	183520	Сломался
3	400	600	430	296420	
4	400	540	441	286980	
5	400	560	441	24250	
6	400	560	435	54860	
7	400	500	438	90980	

Выбрано базовое число циклов $W = 3 \cdot 10^5$, начальное напряжение $\sigma_n = 300 \dots 400 \text{ Н/мм}^2$.

При достижении $W = 3 \cdot 10^5$ циклов и целостности образца напряжение переводится на следующую ступень с дискретностью $\Delta\sigma = 20 \text{ Н/мм}^2$. Процесс продолжается до достижения напряжения разрушения, на котором образец ломается до достижения очередных $W = 3 \cdot 10^5$ циклов. Резонансная частота корректируется по тензодатчику и находится в сопоставимых пределах. В таблице 10.1 приведены результаты испытаний 7 образцов, обработанных методом глубинного шлифования. Для расчета среднего напряжения разрушения образец № 1 не учитывается.

Глава 11

ЭЛЕКТРОФИЗИКОХИМИЧЕСКИЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

В современном двигателестроении при изготовлении ответственных деталей из труднообрабатываемых высокопрочных материалов находят применение прогрессивные физико-химические методы обработки. К ним относятся электрофизикохимические 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.

Электрофизикохимические и комбинированные методы обработки (рис. 11.1) отличаются технологическими особенностями от традиционных технологий, основанных преимущественно на силовом (контактном) воздействии инструмента на заготовку.

К **основным особенностям** электрохимических, электрофизических и комбинированных методов можно отнести:

- 1) *возможность обработки материалов практически с любыми физико-механическими свойствами без приложения механических сил и непосредственного контакта рабочей поверхности инструмента с обрабатываемой поверхностью детали;*
- 2) *копирование сложной формы инструмента сразу по всей поверхности заготовки при простом поступательном движении;*
- 3) *минимальное влияние технологических особенностей процессов на механические свойства и эксплуатационные характеристики деталей после обработки;*
- 4) *возможность выполнения отверстий с криволинейной и спиральной осью, в том числе и малых диаметров, узких пазов, канавок и других операций;*

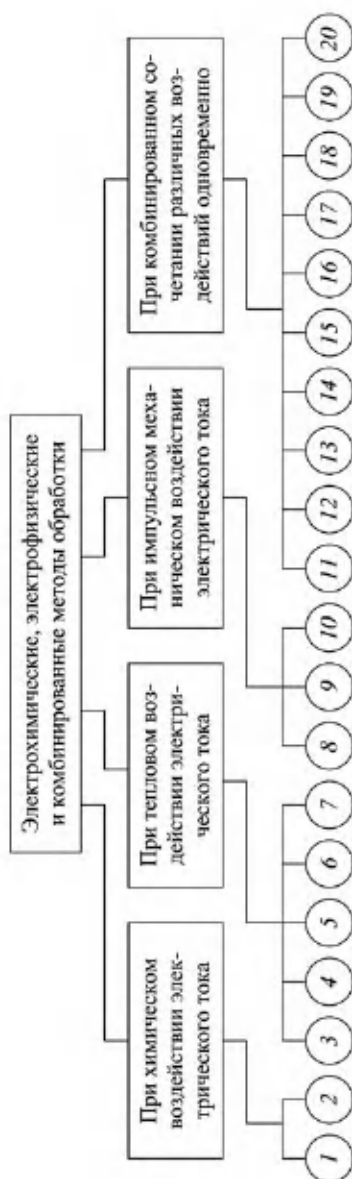


Рис. 11.1. Группы электрофизикохимических и комбинированных методов обработки:

- 1 – электрохимическая размерная; 2 – электрохимическая отделочная;
 3 – электроэрозийная; 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 – электроэрозийно-электрохимическая;
 15 – электроэрозийная абразивная; 16 – магнитно-абразивная; 17 – плазменно-механическая;
 18 – ультразвуковая абразивная; 19 – ультразвуковая механическая (резанием);
 20 – ультразвуковая давлением

5) *интенсификация процессов механической обработки* (резанием и давлением), сварки, пайки и других, выполняемых традиционными методами с большой трудоемкостью и низким качеством обработки;

6) *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.;

7) *высокая производительность обработки*, большие технологические возможности изменения формы и шероховатости, сравнительно высокая точность получения размеров;

8) *возможность сравнительно простой механизации и автоматизации.*

К **основным недостаткам** или ограничениям электрофизико-химических и комбинированных методов следует отнести:

1) *повышенную энергоемкость процессов* по сравнению с механической обработкой;

2) *применение в ряде процессов более громоздкого оборудования* и необходимость его размещения в отдельных помещениях, что вызвано пожарной безопасностью и специфическими требованиями безопасности работающих;

3) *более сложное обслуживание оборудования* и оснастки в связи с образованием коррозии при применении жидких рабочих сред;

4) *экологические проблемы.*

11.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

В авиадвигателестроении 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:

- 1) механическое воздействие, включая пластическое деформирование, трение, разрушение;
- 2) взаимодействие механических и тепловых явлений;
- 3) одновременное действие тепловых, химических, электрических, магнитных и других явлений.

Методы обработки определяют следующие **основные признаки**:

- 1) *вид энергии*, подводимой к зоне обработки (тепловая, электрическая, химическая, магнитная и др.);
- 2) *способ подвода энергии*, характеризующийся взаимным положением заготовки и рабочих поверхностей инструмента;
- 3) *механизм определяет основной физико-химический процесс*, обеспечивающий снятие материала с заготовки;
- 4) *рабочий процесс определяет совокупность явлений, обеспечивающих при использовании данного метода обработки снятие с заготовки определенного слоя материала*;
- 5) *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 табл. 11.1.

11.1. 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 ²
Электрическая	Электроэрозионная	Эрозия в импульсных разрядах	Жидкость диэлектрическая	Тепловая	$10^4 \dots 10^8$
	Электрохимическая	Анодное растворение	Электролит	Химическая	$10^3 \dots 10^4$
	Ионно-лучевая	Катодное распыление	Вакуум $10^{-2} \dots 10^{-4}$	Тепловая	$10^6 \dots 10^7$
	Электронно-лучевая	Эрозия под действием потока электронов	Вакуум $10^{-4} \dots 10^{-6}$	Тепловая	$10^6 \dots 10^8$
	Светолучевая	Световая эрозия	Газ, вода, вакуум	Тепловая	$10^6 \dots 10^8$

Продолжение табл. 11.1

Вид обработки (класс)	Способ обработки	Рабочий процесс	Технологическая среда	Энергия для обработки	Мощность (удельная), Вт/см ²
Механическая	Лезвийная	Механическое деформирование	Воздух, жидкость	Механическая	10 ²
	Абразивная	Механическое деформирование	Воздух, жидкость	Механическая	10 ²
	Ультразвуковая	Хрупкое разрушение при ударном воздействии	Абразивная суспензия	Механическая	10 ³ ... 10 ⁴
Комбинированная	Анодно-механическая	Анодное растворение, электроэрозия, механическое деформирование	Электролит	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

11.2. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

11.2.1. 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 под действием тока в раствор могут уходить ионы анода. Это явление называют анодным растворением, которое является основным механизмом процесса электрохимической обработки металлов.

Количественно процесс электролиза *подчиняется законам 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 рас-

творенного вещества пропорционально их химическим эквивалентам:

$$G \sim \epsilon_x.$$

Объединенный закон Фарадея может быть записан в виде:

$$G = \epsilon J \tau,$$

где G – количество растворенного вещества; ϵ – химический эквивалент; J – сила тока; τ – 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:

$$\epsilon_v = A/nF,$$

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*:

$$\epsilon_0 = \frac{1000\epsilon_v}{q60}, \frac{\text{мм}^3}{\text{А} \cdot \text{мин}},$$

где q – плотность вещества, г/см³.

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.

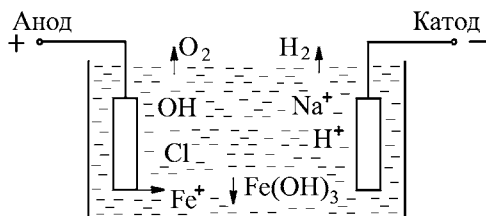


Рис. 11.2. Схема электролитической ячейки (электролит NaCl)

На рис. 11.2 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).

При использовании других электролитов общим является образование на аноде гидроокисей металлов типа Me(OH)_n , где 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 OH^- , и расходуется вода.

На рис. 11.3, а 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 рис. 11.3, б. Существует также *анодно-механический метод с распассивацией поверхности механичес-*

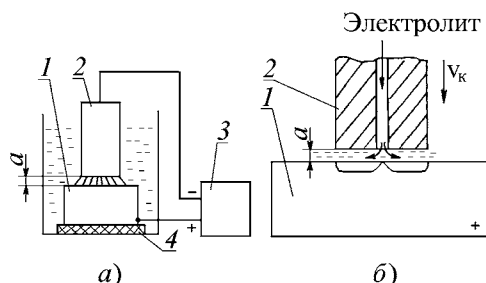


Рис. 11.3. Варианты электрохимической обработки:

а — в неподвижном электролите неподвижным катодом;

б — подвижным катодом с прокачкой электролита;

1 — анод; *2* — катод; *3* — источник питания; *4* — изолирующая плита

ким воздействием. Типичным представителем такого метода является электроабразивное шлифование (ЭАШ).

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 определенного 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. 11.4).

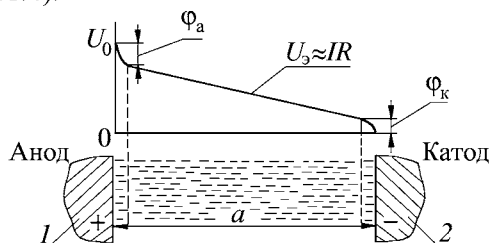


Рис. 11.4. Распределение напряжения, подведенного к электролитической ячейке с зазором a :

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; φ_a – падение напряжения в прианодной области, В; ρ – удельное сопротивление электролита, Ом·мм; a – межэлектродный зазор, мм; S – площадь обработки (электрода), мм²; J – сила тока, А; φ_k – падение напряжения в прикатодной области, В.

Решив уравнение относительно протекающего тока J , получим выражение:

$$J = \frac{U_0 - \varphi_a - \varphi_k}{\rho a} S,$$

которое можно представить в виде

$$J = j S,$$

где j – выражение плотности тока.

Суммарное падение напряжения ($\varphi_a + \varphi_k$) называют падением напряжения поляризации φ_n . В расчетах φ_n принимают равным 2...3 В.

Плотность тока в окончательном виде записывается:

$$j = \frac{U_0 - \varphi_n}{\rho a}, \frac{A}{\text{мм}^2}.$$

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 η . По плотности тока j и объемному электрохимическому эквиваленту ϵ_0 вычисляют линейную скорость растворения или скорость внедрения катода в анод

$$v_k = \eta j \epsilon_0, \frac{\text{мм}}{\text{мин}},$$

где η – коэффициент выхода по току.

Несмотря на кажущуюся схематическую простоту процесса ЭХО, он соприкасается 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 авиационных двигателей, 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 скорость анодного растворения, пропорциональную плотности тока, можно влиять, увеличивая рабочее напряжение U_0 , уменьшая межэлектродный зазор a , выбирая электролит с меньшим удельным сопротивлением ρ , 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/мм² без образования электрического искрения не удастся. На рис. 11.5 приведена ориентировочная зависимость между напряжением и рабочим зазором при протекании процесса без искрения.

Производительность процесса ЭХО зависит также от коэффициента выхода по току η , 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.

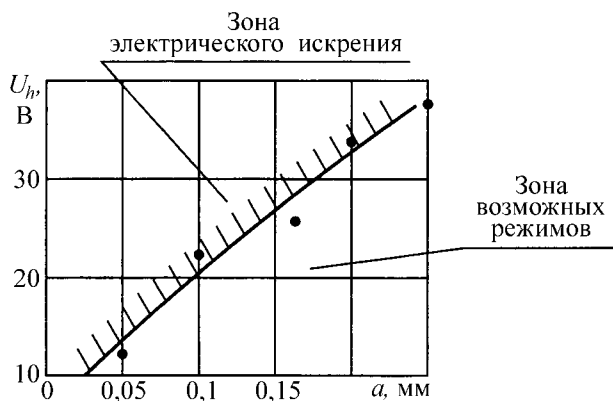


Рис. 11.5. Ориентировочные соотношения рабочего напряжения U и межэлектродного зазора a при нормальном протекании процесса ЭХО

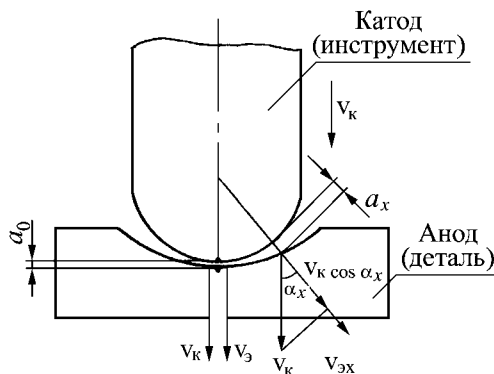


Рис. 11.6. Схема электрохимической обработки профильной поверхности

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. 11.6).

Только на периферийной части в одной точке вектор электрохимического растворения $v_э$ 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 α , 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 Δa* от базовой (расчетной) величины будет характеризовать погрешность обработки:

$$\Delta a = a_x - a_0,$$

где Δa – абсолютная погрешность обработки; a_0 – межэлектродный базовый (стационарный) зазор; a_x – действительный зазор в любой точке.

Относительная погрешность δ 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 Δa . *Суммарная абсолютная погрешность* складывается из основных составляющих:

$$\Delta a = \Delta a_{\text{эxо}} + \Delta a_{\text{и}} + \Delta a_{\text{р}} + \Delta a_{\text{в}} + \Delta a_{\text{η}},$$

где $\Delta a_{\text{эxо}}$ – органическая погрешность при обработке профильных поверхностей; $\Delta a_{\text{и}}$ – погрешность от изменения напряжения; $\Delta a_{\text{р}}$ – погрешность от изменения удельного сопротивления электролита; $\Delta a_{\text{в}}$ – погрешность от неравномерной скорости потока электролита; $\Delta a_{\text{η}}$ – погрешность от изменения коэффициента выхода по току.

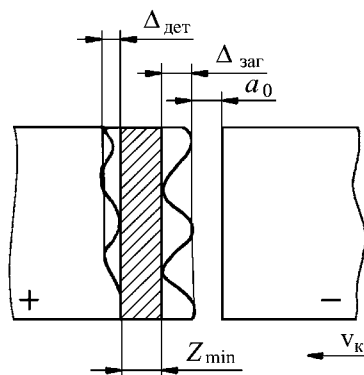


Рис. 11.7. Схема выравнивания поверхности заготовки при ЭХО

Во многих случаях реальная точность обработки сопоставима с величиной межэлектродного зазора. Так, точность профиля пера турбинных лопаток, обработанных на зазоре $0,23 \dots 0,25$ мм, находится в пределах $0,2$ мм, на зазоре $0,05 \dots 0,07$ мм – в пределах $0,05$ мм. Но без жесткой стабилизации параметров процесса ЭХО в пределах $2 \dots 4$ % достичь погрешности Δa в пределах $0,05 \dots 0,1$ 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 рис. 11.7 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:*

$$Z_{\min} = a_0 \ln \frac{\Delta_{\text{заг}}}{\Delta_{\text{дет}}}.$$

Выравнивающие свойства процесса можно оценить коэффициентом выравнивания $K_{\text{в}}$:

$$K_{\text{в}} = \frac{\Delta_{\text{заг}} - \Delta_{\text{дет}}}{Z_{\min} + \Delta_{\text{заг}}}.$$

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.

11.2.2. 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, недефицитность, невысокая стоимость, желательно минимальное коррозионное воздействие на оборудование и оснастку, образование продуктов анодного растворения в виде выпадающих в осадок гидроокисей типа $\text{Me}(\text{OH})_n$, 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 очист-

ки 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:

$$v_{эл} = \frac{Q}{0,06 S_s}, \text{ м/с,}$$

где Q – расход электролита, л/мин; S_s – площадь сечения потока электролита, мм².

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:*

- 1) обеспечение работы в длительном режиме с номинальными параметрами при колебании напряжения в сети 1...15 %;
- 2) наличие защиты от коротких замыканий;
- 3) высокая вероятность безотказной работы;
- 4) 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 25000 А.

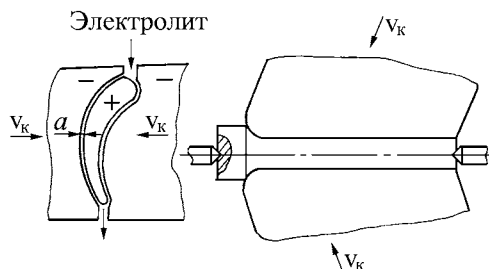


Рис. 11.8. Схема двусторонней ЭХО профиля пера лопаток с одновременной обработкой радиуса перехода к замку

В авиационном двигателестроении 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 рис. 11.8 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 некруг-

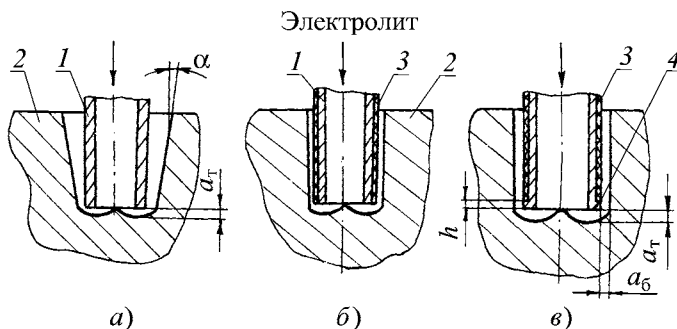


Рис. 11.9. Варианты применения конструкций электродов при обработке отверстий:

1 – металлический электрод; 2 – обрабатываемая деталь;
3 – изоляционный слой электрода; 4 – буртик на электроде; h – высота буртика; a_r – торцевой зазор; a_6 – боковой зазор

лых отверстий различной глубины. В этом случае электродом является стержень трубчатого сечения, через который подается электролит.

Возможно применение электродов 3 типов (рис. 11.9):

1) *электрод в виде металлической трубки*. В обрабатываемой полости или отверстии образуется конус с углом α . Размеры обрабатываемой полости будут иметь низкую точность;

2) *наружная поверхность электрода полностью покрыта изолятором, рабочим участком является только торец*. Обработка производится на установившемся зазоре a_r , размеры полости имеют более высокую точность. Недостатком электрода является отслаивание изоляционного слоя, примыкающего к торцу;

3) *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 б зазоре a_6 , который может быть оценен по следующей формуле:

$$a_6 = \sqrt{2a_r h + a_r^2}, \text{ мм,}$$

где a_t – 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:

- 1) *при неподвижных электродах* – калибрование, контурная обработка, маркировка;
- 2) *при поступательном перемещении электрода* – копирование, прошивка, протягивание, калибрование;
- 3) *при вращении электрода-катода* – обработка плоских и фасонных поверхностей, отрезка, кольцевая вырезка;
- 4) *при вращении электрода-анода* – обработка фасонных поверхностей (наружных и внутренних), канавок, отрезка;
- 5) *при сложном движении электрода* – вырезка проволокой или стержнем.

В авиационной технологии разработаны и применяются другие **разновидности электрохимической обработки**, к которым относятся следующие.

1. *Электрохимическое точение* выполняется при поступательном перемещении электрода-инструмента (катода) и вращении заготовки. Съем металла с заготовки происходит за счет электро-

химического растворения. Электрод-инструмент не изнашивается. Применяется для формообразования наружных, внутренних и торцевых поверхностей корпусных и тонкостенных деталей.

2. *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.

3. *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.

4. *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.

5. *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.

6. *Электрохимическое полирование* осуществляется в электролите при малых плотностях тока на аноде (I менее $0,1 \text{ А/см}^2$). 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.

7. *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.

8. *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 параметр шероховатости поверхности $Ra = 0,3$ мкм и менее. Метод применяется в основном для обработки внутренних цилиндрических поверхностей, например, силовых цилиндров, корпусных и других деталей ГТД.

9. *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.

11.2.3. Электрохимическое шлифование

Под электрохимическим шлифованием в общем случае понимают электрохимическую обработку быстровращающимся круглым инструментом-катодом, увлекающим под действием скорост-

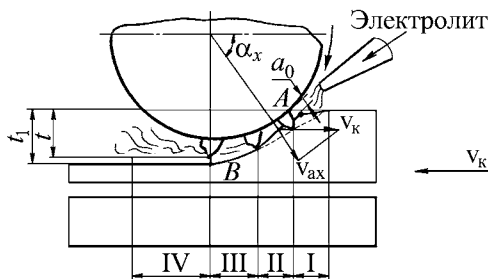


Рис. 11.10. Схема контакта токопроводящего абразивного круга при глубинном электроабразивном шлифовании:

V_K – скорость подачи катода; V_{ax} – скорость электрохимического растворения в произвольной точке; α_x – угол между векторами V_K и V_{ax} ; a_0 – начальный зазор; t – установленный припуск; t_1 – реально снятый припуск; АВ – зона термического контакта; I...IV – зоны воздействия токопроводящего круга на поверхность

ного 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 рис. 11.10 приведена *общая схема метода обработки*.

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; τ – время; v_k – скорость движения катода; α_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 α_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. 11.10).

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 эксперимен-

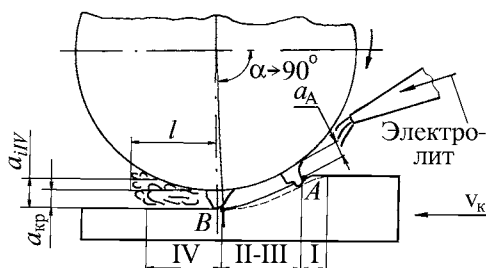


Рис. 11.11. Схема чистовой ЭАШ:

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° в окрестности точки B ; a_{IV} – произвольный зазор в пределах зоны IV

тально 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 клиновой 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. 11.11).

Выступление 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 α_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.

По формуле $\eta \epsilon_0 j_A = v_k \cos \alpha_A$, справедливой для точки A , вычисляют плотность тока j_A , а по ней – приведенный зазор $a_{кр}$. Так, например, для токопроводящих абразивных кругов на органической связке с зернами 63С (карбид кремния) зернистостью 16 приведенный зазор $a_{кр}$ составляет 0,05...0,06 мм. Переход от глубинного к чистовому шлифованию характеризуется, главным образом, увеличением скорости подачи до такой величины, чтобы в окрестности точки B (угол α_x как угодно близко приближается к 90°) выполнялось соотношение:

$$v_{k \min} = \frac{\eta \epsilon_0 j_B}{\cos(\alpha \rightarrow 90^\circ)} = \frac{\eta \epsilon_0 u}{\rho a_{кр} \cos(\alpha \rightarrow 90^\circ)}.$$

В соответствии с данной подачей устанавливается глубина шлифования $t < t_{пред}$, гарантирующая выполнение условия $a_{кр} > a_A > 0$. При достижении $t_{пред}$ и $a_A = 0$ нарушается протекание процесса электроабразивного шлифования вследствие недостаточного поступления электролита в клиновидный зазор и появления электрического искрения. При чистовом электроабразивном шлифовании режимы обработки приближаются к режимам обычного маятникового шлифования. От соотношения $K = a_A / a_{кр}$ зависит доля материала, снятого абразивным резанием. Это доля может быть равна 10 % при $K = 0,3$ и доходить до 57 % при K , близком к нулю.

Избежать растворения материала при чистовом электроабразивном шлифовании в зоне IV невозможно. Его можно уменьшить за счет подбора режимов обработки и учитывать количественно при обработке точных поверхностей по аналитическим зависимостям.

Съем в зоне IV является интегральной суммой растворения в зоне IV на постоянно изменяющихся зазорах и плотностях тока за время t , равное величине длины жидкостного клина l , поделенное на скорость движения стока v_k .

Конечное значение суммарного растворения t_{IV} в зоне IV выражается математически точной формулой:

$$t_{IV} = \left(\frac{\eta \varepsilon_0 (U - \varphi_{\Pi}) Z_0 R}{\rho V_{\kappa} \sqrt{2 R a_{\kappa p}}} \operatorname{arctg} \frac{l}{\sqrt{2 R a_{\kappa p}}} \right) \frac{\pi}{180} \text{ мм},$$

где l – длина жидкостного клина (мм).

Формула наглядно выявляет прямое влияние основных параметров процесса обработки на дополнительный съём за зоной теоретического контакта и более сложное влияние таких параметров как радиус круга R , длина жидкостного клина l и приведенный зазор на выступание абразивного зерна $a_{\kappa p}$.

Точность рассчитанной величины дополнительного съема t_{IV} зависит, прежде всего, от точности задания величин выхода по току η , падения напряжения поляризации φ_{Π} , удельного сопротивления электролита ρ , и ее сходимости с экспериментально замеренной величиной t_{IV} находится в пределах 10 %.

Закономерности плоского электроабразивного шлифования периферией круга можно распространить на *сложные профильные поверхности*. К профильной относится поверхность, нормаль к которой составляет угол β , лежащий в пределах $90^\circ > \beta > 0$. На рис. 11.12 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 β с осью вращения, можно рассматривать как образованную *с кругом другого радиуса, называемого эквивалентным* и вычисляемым с достаточной для практики точностью по формуле:

$$R_{\text{экв}} = \frac{R}{\sin \beta},$$

где R – истинный радиус круга в рассматриваемом сечении; β – угол нормали к профилю с осью вращения.

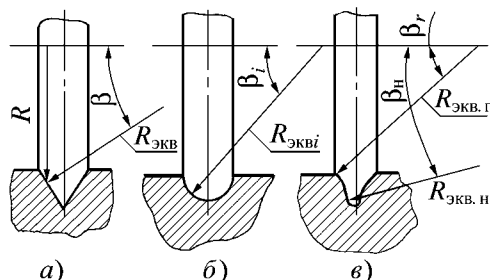


Рис. 11.12. Виды профильных поверхностей:

а – наклонная; *б* – радиусная; *в* – эвольвентная; $R_{\text{ЭКВ}}$ – радиус эквивалентного круга в нормальной к профилю плоскости, под воздействием которого формируется зона контакта; $R_{\text{ЭКВ.Г}}$ и $R_{\text{ЭКВ.Н}}$ – радиусы эквивалентных кругов соответственно головки и ножки зуба

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 выхаживающих 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 орга-

нической 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, которое поддается расчетной оценке по разработанной методике.

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 ВАКГ 12/6-60, ВАКГР 12/6-1500 и другие.

Электролитами при электроабразивном шлифовании чаще всего являются неагрессивные растворы калиевой и натриевой селитры (10...15 % KNO_3 или NaNO_3) с добавкой 0,5 % нитрита натрия в качестве антикоррозионного компонента. Применяются и более сложные составы.

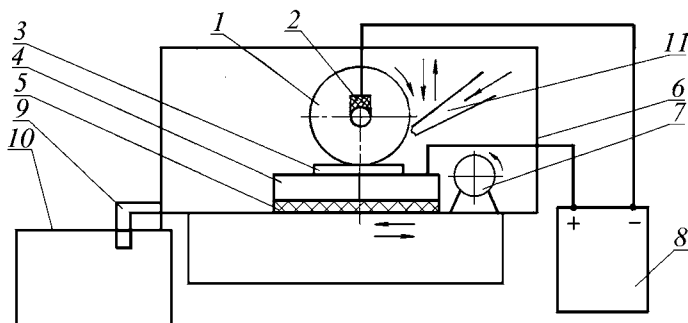


Рис. 11.13. Схема станка для плоского и профильного шлифования:

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 для электроабразивного шлифования:

- 1) рабочий стол должен иметь широкий диапазон подач от 10...200 мм/мин – при глубинном шлифовании до 1...5 м/мин – при чистовом шлифовании;
- 2) плита для закрепления детали и подшипники шпинделя электрически изолированы от массы станка;
- 3) к детали и токопроводящему кругу подводится технологический ток с помощью специальных токоподводов;
- 4) зона обработки должна быть оборудована отсосной вентиляцией и надежным ограждением от разбрызгивания электролита;
- 5) на столе станка устанавливается приспособление для правки круга вращающимся алмазным роликом или другим методом.

На рис. 11.13 показана схема станка для плоского электроабразивного шлифования.

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.

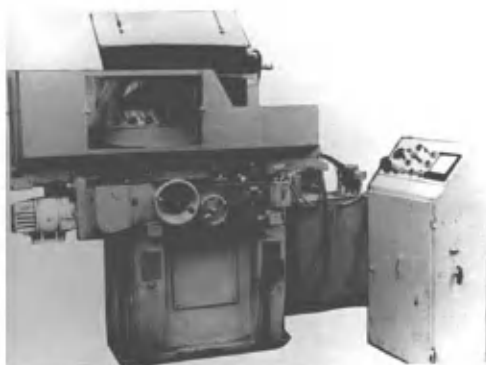


Рис. 11.14. Общий вид станка для электроабразивного шлифования плоских и профильных поверхностей (модернизация шлифования плоскошлифовального станка 3Г-71)

Станок должен работать как в режиме глубинного шлифования на медленных подачах стола, так и чистового на повышенных скоростях движения стола (маятниковое шлифование).

Подобное оборудование промышленность не выпускает. В НПО "Сатурн" разработана модернизация плоскошлифованных, круглошлифованных, внутришлифованных, токарно-лобовых и токарно-карусельных станков для условий электроабразивного шлифования различных поверхностей. На рис. 11.14 приведен общий вид модернизированного для электроабразивного шлифования плоских и профильных поверхностей плоскошлифовального станка модели 3Г-71.

К наиболее **эффективным случаям применения электроабразивного шлифования** можно отнести:

- 1) *обработку поверхностей без образования остаточных напряжений и наклепа;*
- 2) *профильную обработку тонкостенных деталей без образования заусениц (рис. 11.15, а);*
- 3) *чистовую обработку сотовых уплотнений авиационных двигателей без образования заусениц (рис. 11.15, б);*

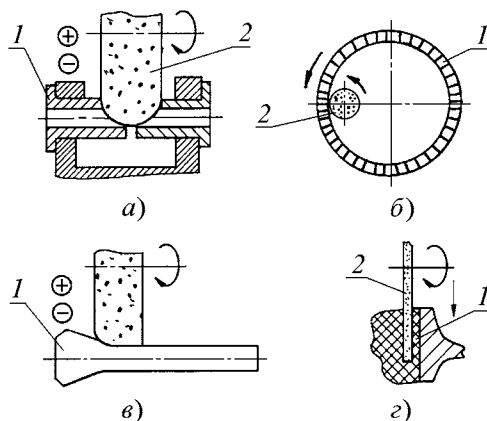


Рис. 11.15. Эффективные случаи применения электроабразивного шлифования:

1 – обрабатываемая деталь; 2 – токопроводящий абразивный (алмазный) круг

- 4) электроалмазную обработку поверхностей компрессорных лопаток из титановых сплавов (рис. 11.15, в);
- 5) электроалмазную резку различных материалов (рис. 11.15, г);
- 6) высококачественную заточку лезвийного инструмента;
- 7) 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.

К основным **недостаткам процесса** можно отнести:

- 1) усложнение конструктивных элементов систем и узлов станка, необходимость изготовления их, а также оснастки, в антикоррозионном исполнении;
- 2) сложность систем очистки электролитов от шлама, а также поддержания его оптимального состава;
- 3) 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.

11.3. 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 вольт-амперная характеристика электрического разряда может быть представлена следующим образом (рис. 11.16).

На участке $a'-б$ с увеличением напряжения пропорционально увеличивается величина тока. На участке $б-в$ в протекании тока

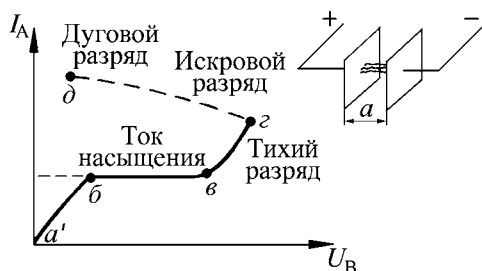


Рис. 11.16. Вольт-амперная характеристика искрового разряда

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 10 000 °С 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 *а*.

Электроэрозионная обработка подразделяется на электроконтактную, анодно-механическую, электроимпульсную, электроискровую, высокочастотную, электроэрозионную.

Методы перечислены от самых грубых до высокоточных чистовых производительностью от 1 000 000 до 0,1 мм³ и $Ra = 0,32 \dots 0,16$ мкм. Они отличаются способами генерации импульсов. При электроконтактной и анодно-механической обработке генерация импульсов осуществляется за счет возникновения кратковременных контактов между инструментом и деталью.

11.3.1. Механизм образования эрозионной лунки

Разряды в межэлектродном промежутке могут быть 2-х разновидностей.

1. *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.

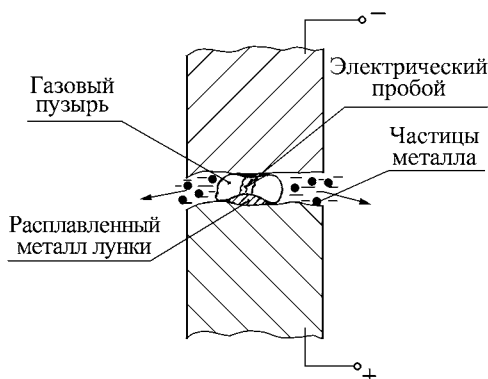


Рис. 11.17. Схема единичного разряда

2. 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 рис. 11.17 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 рис. 11.18 показаны реальные эрозионные лунки от единичного разряда.

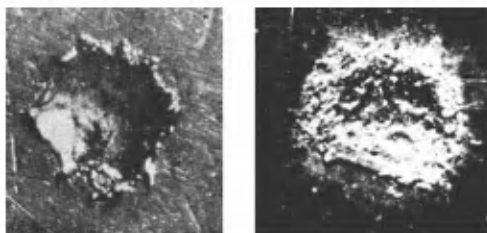


Рис. 11.18. Электроэрозионные лунки от мощного единичного разряда (×20)

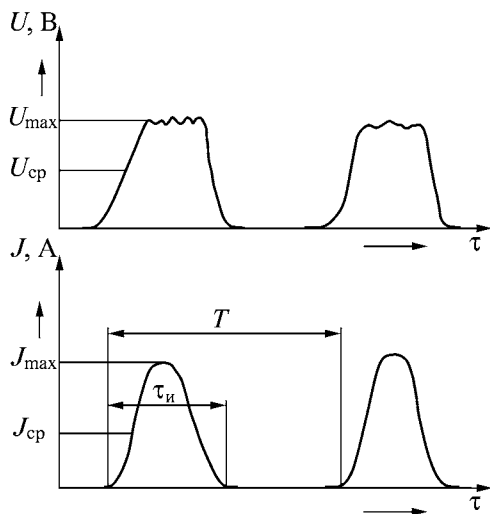


Рис. 11.19. Импульсы напряжения и тока при электроэрозионной обработке

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:

$$W_n = \frac{I_{cp} U_{cp}}{f},$$

где I_{cp} – средняя величина тока; U_{cp} – средняя величина напряжения; f – частота импульсов.

Скважность $q = T/\tau_n$, где T – период следования импульсов, τ_n – продолжительность непосредственного протекания тока в импульсе.

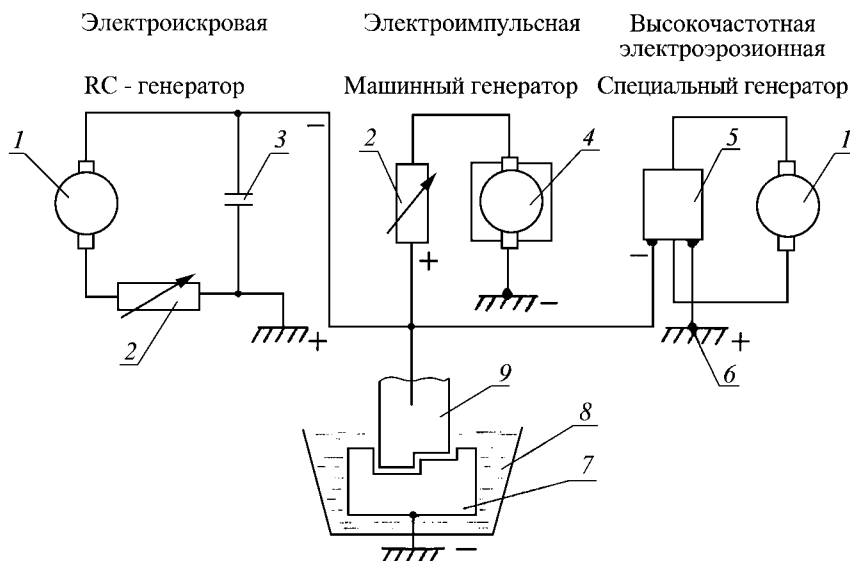


Рис. 11.20. Схемы методов электроэрозионной обработки:

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; – полярность обрабатываемой детали

Протекание импульсов напряжения и вызываемых импульсов рабочего тока в рабочем зазоре при ЭО приведено на рис. 11.19.

Для RC-генератора (рис. 11.20) энергия импульсных разрядов при постоянном напряжении ($U = 100$ В) легко регулируется емкостью конденсатора 3, 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 $I_{\max} = 40 \dots 60$ А, $\tau_{\text{и}} = 4$ мкс. При этом глубина единичной лунки (см. рис. 11.17) равна 0,015 мм, диаметр лунки равен 0,1 мм, объем

11.2. 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

лунки – $0,00008 \text{ мм}^3$. При емкости конденсатора 2000 мкФ – $I_{\max} = 1400...1800 \text{ А}$, $\tau_{\text{и}} = 240 \text{ мкс}$, глубина лунки – $0,05 \text{ мм}$, диаметр – $2,0 \text{ мм}$, объем лунки – $0,1 \text{ мм}^3$.

Обрабатываемость различных материалов можно оценить критерием Л.С. Палатника:

$$P = C \gamma \lambda T_{\text{пл}}^2,$$

где C – теплоемкость; γ – плотность; λ – теплопроводимость; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления (все величины относятся к обрабатываемому материалу).

Относительная обрабатываемость материалов приведена в табл. 11.2.

Методы электроэрозионной обработки отличаются применяемыми генераторами импульсов и полярностью электродов (см. рис. 11.20).

РС-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.

11.3. Основные параметры применяемых методов электроэрозионной обработки

Параметры	Метод электроэрозионной обработки		
	Электроимпульсная	Электроискровая	Высокочастотная электроэрозионная
$\tau_{из}$, мкс	$10^2 \dots 10^3$	$10 \dots 10^2$	$10^{-1} \dots 10$
U_{max} , В	20...100	150...350	10...250
f , кГц	0,1...8	8...500	22...1760
$W_{из}$, Дж	50...5	$10 \dots 5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2} \dots 10^{-5}$

Параметры применяемых методов электроэрозионной обработки приведены в табл. 11.3.

По своей сути электроэрозионная обработка связана с повторяющимися электроэрозионными разрядами (импульсами), имеющими на определенном зазоре a определенную *мощность* (количество энергии), зависящую от пробойного напряжения $U_{пр}$ и частоту f . Зазор a задается таким, чтобы необходимое пробойное напряжение источника питания было меньше напряжения источника питания $U_{ист}$.

На рис. 11.21 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; τ_i – время от начала зарядки, с; R – величина токоограничивающего сопротивления, Ом; C – емкость конденсатора, мкФ.

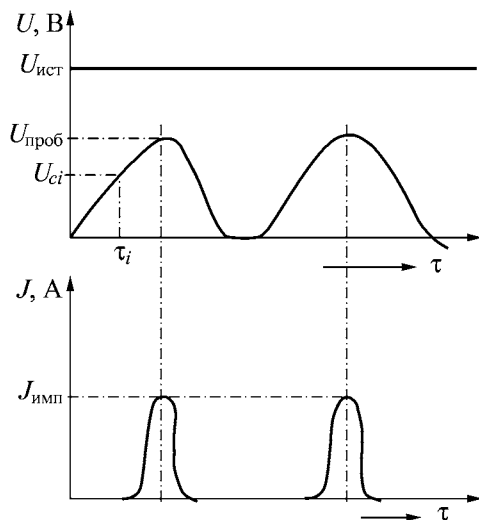


Рис. 11.21. Динамика заряда конденсатора RC-генератора и возникновения пробойного единичного импульса

Энергия, запасенная конденсатором и затраченная на единичный импульс, равна:

$$W_{\text{конд}} = W_{\text{имп}} = \frac{CU_{\text{кр}}^2}{2}, \text{ Дж.}$$

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 частота следования импульсов $f_{\text{и}}$ определяется по формуле:

$$f_{\text{и}} = \frac{1}{RC \ln \frac{U_{\text{ист}}}{U_{\text{ист}} - U_{\text{поб}}}}, \text{ Гц.}$$

11.3.2. Регулирование межэлектродного промежутка

Величина межэлектродного промежутка a как параметр регулирования не используется, так как измерение 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 (см. рис. 11.19).

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.

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

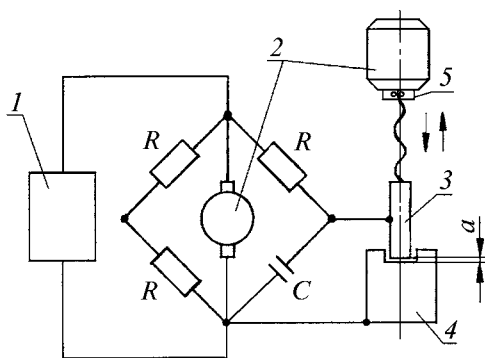


Рис. 11.22. Мостовая схема поддержания установленного параметра межэлектродного промежутка a :

1 – источник; 2 – двигатель электропривода; 3 – электрод;
4 – обрабатываемая деталь; 5 – шаровинтовая пара

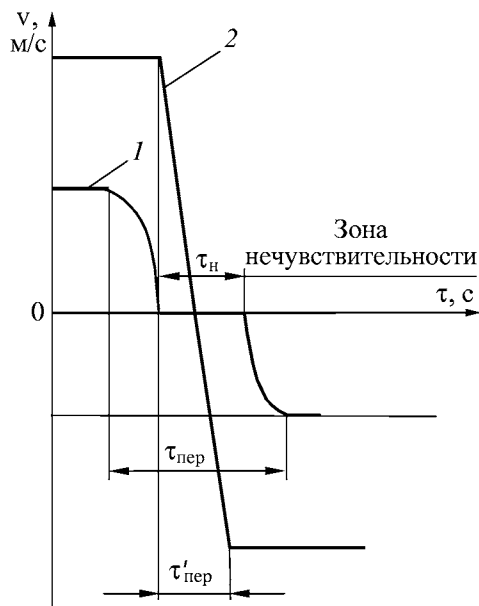


Рис. 11.23. Сравнительная динамика движения реверса электродов при электроэрозионной обработке с разными приводами:

1 – традиционный с шариковой парой; 2 – привод с линейными двигателями

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 короткозамкнутым 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 ока-

зывает исполнительный орган – двигатель электрода. Применяемые традиционные приводы с шариковой парой 5 (рис. 11.22), даже при их идеальном исполнении обладают низкой динамикой, инерционностью и наличием мертвых ходов при реверсе, образуя зону *нечувствительности* (рис. 11.23).

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 переделочных звеньев, – разделены 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 (см. рис. 11.23). *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.

11.3.3. Прецизионная обработка непрофилированным электродом-проволокой

Электроэрозионная обработка деталей сложной формы тонкой медной, латунной и вольфрамовой проволокой (рис. 11.24) в последние десятилетия интенсивно развивалась и в настоящее время широко применяется из-за ряда преимуществ:

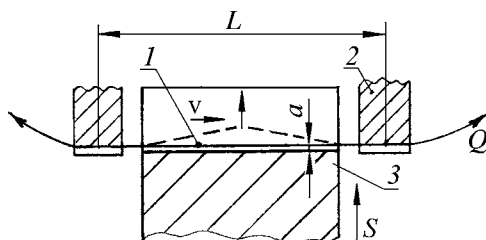


Рис. 11.24. Схема обработки непрофилированной подвижной проволокой:

1 – электрод-проволока; 2 – направляющая; 3 – обрабатываемая деталь; L – расстояние между направляющими; S – рабочая подача при вырезании; Q – натяжение проволоки; v – скорость движения проволоки

- 1) высокой точности;
- 2) оптимального качества поверхностного слоя;
- 3) возможности обработки деталей любой сложности из любого труднообрабатываемого материала.

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. 11.25).

Амплитуда колебаний A вольфрамовой (ВА-3) проволоки $\varnothing 0,015$ мм составляет $0,002 \dots 0,004$ мм, $\varnothing 0,03 - 0,004 \dots 0,009$ 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.

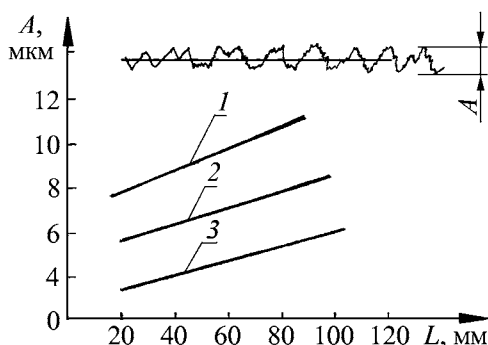


Рис. 11.25. Амплитуда колебания проволоки в зависимости от различных условий обработки и материала проволоки:

1 – Cu; $\varnothing$ 0,1 мм, $Q = 80$ г, $v = 12$ мм/с; 2 – Cu; $\varnothing$ 0,1 мм, $Q = 120$ г, $v = 12,5$ мм/с; 3 – W (BA-3); $\varnothing$ 0,03 мм, $Q = 60$ г, $v = 7$ мм/с

В настоящее время может применяться проволока с $\varnothing$ 0,005...0,010 мм. Разрывная сила для $\varnothing$ 0,005 мм – 45 Н, $\varnothing$ 0,1 – 235 Н. 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 подачи 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.



Рис. 11.26. Общий вид участка обработки деталей на электроэрозионных станках

На рис. 11.26 приведен общий вид участка обработки деталей на электроэрозионных станках, где может осуществляться:

- 1) выполнение обработки тонкостенных поверхностей деталей без деформирования стенок (сотовые уплотнения);
- 2) обеспечение возможности выполнения обработки фасонных поверхностей на деталях турбины из высокопрочных материалов;
- 3) возможность прошивки отверстий в пяти координатах за одну установку детали;
- 4) выполнение фасонной вырезки сложнопрофильных деталей;
- 5) обеспечение разрезки кольцевых деталей вместо фрезерования.

В настоящее время могут выполняться следующие технологические процессы:

- 1) обработка диаметральных торцевых и уплотнительных канавок в блоках лопаток СА;
- 2) прошивка отверстий и пазов;
- 3) вырезка фасонных поверхностей (проволокой);
- 4) разрезка кольцевых деталей на секторы толщиной реза 0,3 мм;
- 5) обработка сотовых уплотнений в кольцевых деталях.

На рис. 11.27–11.40 приведены общие виды станков для электроэрозионной обработки и примеры обрабатываемых на них деталей.



Рис. 11.27. Общий вид высокоскоростного сверлильного электроэрозионного станка с ЧПУ (с глобусным столом) ES024

Технические характеристики

Размеры стола (длина × ширина × высота), мм	800 × 959 × 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 (ось следящего устройства), мм	250
Диаметр глобусного стола, мм	180
Максимальный диаметр электрода, мм	0,05...2,0
Максимальное число оборотов, об/мин	2000



Рис. 11.28. Примеры обрабатываемых деталей и поверхностей



Рис. 11.29. Общий вид электроэрозионного станка для проволочной резки FA 10VM

Технические характеристики

Максимальные размеры обрабатываемой детали (длина $\times$ ширина $\times$ высота), мм	800 $\times$ 600 $\times$ 250
Максимальный вес обрабатываемой детали, кг	500
Размеры стола (длина $\times$ ширина $\times$ высота), мм	590 $\times$ 514
Величина хода по осям ($X \times Y$)	350 $\times$ 250
Величина хода по осям UV	$\pm 32 \times \pm 32$
Максимальный угол обрабатываемого конуса	$\pm 15^\circ/100$ мм
Диаметр проволоки, мм	От 0,2 до 0,36

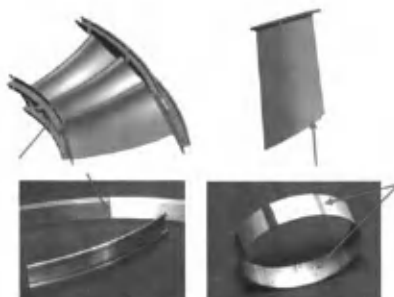


Рис. 11.30. Примеры обрабатываемых деталей и поверхностей



Рис. 11.31. Общий вид электроэрозионного станка для проволочной резки FA 30VM

Технические характеристики

Максимальные размеры обрабатываемой детали (длина $\times$ ширина $\times$ высота), мм	1030 $\times$ 1000 $\times$ 345
Максимальный вес обрабатываемой детали, кг	3000
Размеры стола (длина $\times$ ширина $\times$ высота), мм	750 $\times$ 500
Величина хода по осям ($X \times Y$)	350 $\times$ 250
Величина хода по осям $U V$	$\pm 75 \times \pm 75$
Максимальный угол обрабатываемого конуса	$\pm 15^\circ / 260\text{мм}$
Диаметр проволоки, мм	От 0,2 до 0,36

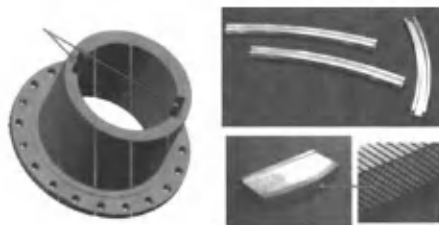


Рис. 11.32. Примеры обрабатываемых деталей и поверхностей



Рис. 11.33. Общий вид электроэрозионного прошивочного станка с ЧПУ EA 12E

Технические характеристики

Максимальные размеры обрабатываемой детали (длина × ширина × высота), мм	800×550×250
Максимальный вес обрабатываемой детали, кг	700
Размеры стола, мм	700×500
Диапазон перемещения стола вправо-влево, мм	400
Диапазон перемещения стола вперед-назад, мм	300
Перемещение по оси Z, мм	300

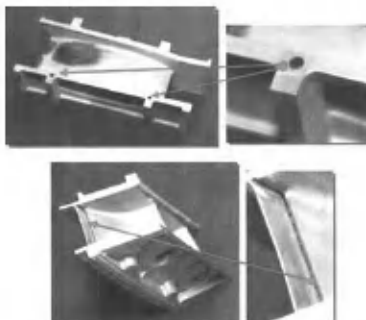


Рис. 11.34. Примеры обрабатываемых деталей и поверхностей



Рис. 11.35. Общий вид электроэрозионного прошивочного станка с ЧПУ EA 22ME

Технические характеристики

Максимальные размеры обрабатываемой детали (длина × ширина × высота), мм	950×680× × 300
Максимальный вес обрабатываемой детали, кг	1000
Размеры стола, мм	8500×600
Диапазон перемещения стола вправо-влево, мм	500
Диапазон перемещения стола вперед-назад, мм	400
Перемещение по оси Z, мм	350

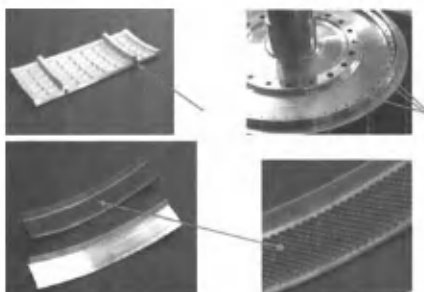


Рис. 11.36. Примеры обрабатываемых деталей и поверхностей



**Рис. 11.37. Общий вид
электроэрозионного прошивочного станка
с ЧПУ (с глобусным столом) ЕА 50**

Технические характеристики

Максимальные размеры обрабатываемой детали (длина × ширина × высота), мм	2400×1500× ×1150
Максимальный вес обрабатываемой детали, кг	5000
Размеры стола, мм	2000×1350
Диапазон перемещения стола вправо-влево, мм	1500 (2500)
Диапазон перемещения стола вперед-назад, мм	600
Перемещение по оси Z, мм	600
Диаметр глобусного стола, мм	1000
Максимальные вес обрабатываемой детали на глобусном столе, кг	500



Рис. 11.38. Примеры обрабатываемых деталей и поверхностей



Рис. 11.39. Общий вид электроэрозионного прошивочного станка с ЧПУ ЕА 40

Технические характеристики

Максимальные размеры обрабатываемой детали (длина × ширина × высота), мм	1500×1000× ×400
Максимальный вес обрабатываемой детали, кг	3000
Размеры стола, мм	400×950
Диапазон перемещения стола вправо-влево, мм	1000
Диапазон перемещения стола вперед-назад, мм	600
Перемещение по оси Z, мм	450

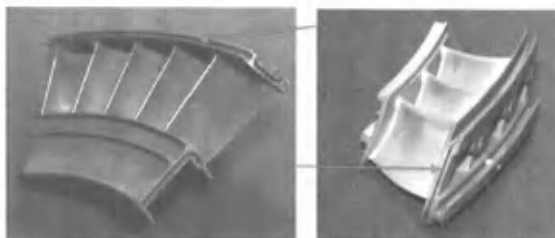


Рис. 11.40. Примеры обрабатываемых деталей и поверхностей

11.4. 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/см².

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 основой их 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 (меднении, никелировании, серебрении и т.п.) процессах, в соединениях (металлизации, пайке, сварке).

В *авиадвигателестроении* 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 ($A = 3 \dots 10$ мкм) инструмента или заготовки.

Схема ультразвуковой обработки приведена на рис. 11.41.

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 постоянного тока 9. Абразивная суспензия с помощью насоса 11 прокачивается из емкости 12 через патрубок 10 в ванну 1.

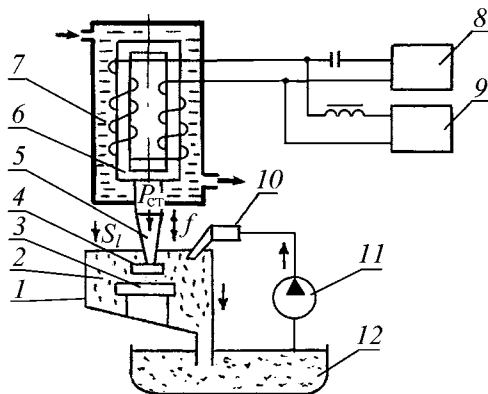


Рис. 11.41. Схема ультразвуковой обработки

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 $P_{\text{ст}} = 30 \dots 200 \text{ Н}$.

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 6...9-му качествам, шероховатость $Ra = 0,025 \dots 1,6 \text{ мкм}$.

11.5. ЛУЧЕВЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Лучевые методы обработки основаны на снятии обрабатываемого материала под воздействием сфокусированных лучей, имеющих высокую плотность энергии до $10^6 \dots 10^9 \text{ Вт/см}^2$. 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*.

В авиационной технологии применяется лазерная обработка отверстий, раскрой и резка листовых материалов из титановых сплавов, нержавеющей сталей, композиционных и других материалов.

Перспективными направлениями применения лазерной технологии являются:

1) *комбинированные методы лазерно-ультразвуковой и лазерно-механической обработки*;

2) *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;

3) *лазерная дефектоскопия ответственных деталей ГТД*, например, лопатки ротора турбины и компрессора, деталей турбостартера, трубопроводов взамен трудоемкого люминесцентного метода контроля.

11.6. 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 рис. 11.42.

Процесс электроэрозионной – 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.

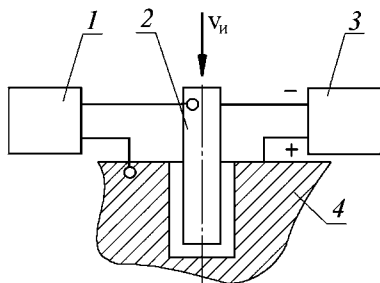


Рис. 11.42. Схема электроэрозионно-химической обработки:
1 – генератор импульсов; 2 – электрод-инструмент; 3 – генератор постоянного напряжения; 4 – обрабатываемая заготовка

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.

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 ГТД.

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

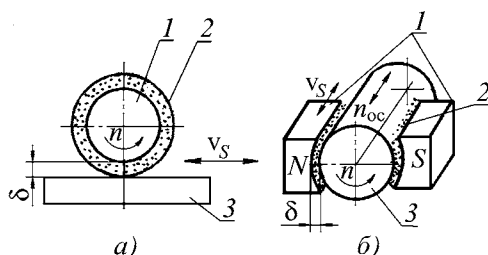


Рис. 11.43. Схема магнитно-абразивной обработки:

1 – магнитный индуктор; 2 – магнитный порошок; 3 – обрабатываемая заготовка

из магнитно-абразивного порошка позволяет производить обработку поверхностей сложной формы без фасонных полюсов при простой кинематике процесса (рис. 11.43, а). Обработка может осуществляться с размещением магнитного порошка на поверхности магнитного индуктора и в рабочем зазоре (рис. 11.43, б).

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 параметр шероховатости 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.

11.7. 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 рис. 11.44.

Лезвийно-упрочняющая обработка осуществляется точением и алмазным выглаживанием, фрезерованием и обкатыванием плоских поверхностей и т.д.

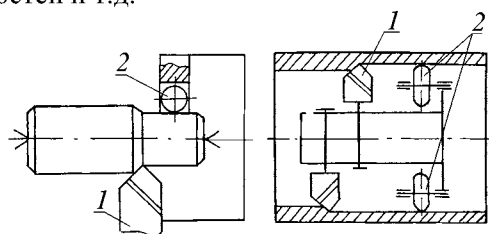


Рис. 11.44. Схемы лезвийно-упрочняющей обработки:

1 – режущий инструмент; 2 – упрочняющий инструмент

Глава 12

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСРЕДСТВОМ ВЫБОРА МЕТОДА ОБРАБОТКИ

12.1. ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ИХ СВЯЗЬ С МЕТОДАМИ ОБРАБОТКИ

Ответственные детали авиационных двигателей работают в условиях высокого нагружения при повышенной температуре. При этом должны быть обеспечены противоречащие друг другу свойства – высокая надежность при длительном ресурсе и минимальный вес, что эквивалентно во многих случаях минимальному коэффициенту запаса. Кроме того, эксплуатация деталей при высоких температурах в условиях разнообразного нагружения вызывает трансформацию напряженного состояния поверхностного слоя, заложенного при обработке.

Для поверхностей деталей, работающих в конкретных условиях, должно быть обеспечено **оптимальное качество поверхностного слоя**, которое с учетом изменений под действием высоких температур при длительной эксплуатации не приведет к разупрочнению и обеспечит надежную работу данной поверхности. Под оптимальным качеством, в данном случае, подразумевают обеспечение нужных параметров неровностей поверхности, величины и знака остаточных напряжений, глубины и степени наклепа, состояния микроструктуры.

Исследованиями установлено, что для разных материалов, работающих при определенных температурах достаточно длительное время, есть температурно-ресурсные барьеры, разделяющие полезность, бесполезность и даже вредность упрочнения поверхностного слоя. Например, для широко применяемого литейного жаропрочного сплава типа ЖС6У-ВИ оптимальными параметрами наклепа являются глубина 10...15 мкм и степень 3...5 % при температуре 900 °С. При увеличении температуры до 1000 °С и выше

любая степень наклепа становится вредной, приводящей к разупрочнению поверхностного слоя.

Взаимосвязи между остаточными напряжениями и работоспособностью материала при высоких температурах не прослеживается, так как в условиях циклического нагружения остаточные напряжения быстро релаксируются. Если же условия эксплуатации по температуре и ресурсу не приводят к релаксации остаточных напряжений, то они оказывают влияние на работоспособность деталей в зависимости от знака. *Остаточные сжимающие напряжения* повышают прочностные свойства и являются полезными, растягивающие остаточные напряжения всегда вредны и резко снижают прочностные свойства материала. Но большинство применяемых методов механической обработки не дают возможности получить поверхности без наклепа и нежелательных растягивающих напряжений.

В связи с этим, в арсенале технологов-изготовителей авиационной техники должны быть в наличии детально разработанные методы обработки, обеспечивающие необходимое качество поверхностного слоя. Практическое применение этих методов должно быть продиктовано жизненной необходимостью, например, при невозможности изготовить детали с нужными свойствами другими традиционно применяемыми методами.

Из всех методов размерной обработки только *электрохимическая обработка* дает возможность получить *поверхность без остаточных напряжений и наклепа*, что требуется для длительно работающих высокотемпературных поверхностей. Но этот метод обладает рядом недостатков, таких как пониженная точность, растравливание поверхности и т.д. Это не дает ему возможности претендовать на роль финишного метода.

Разработанный процесс **чистового электрохимического шлифования** абразивными токопроводящими кругами, называемый часто электроабразивным шлифованием, позволяет получить точность обработки, сопоставимую с точностью абразивного шлифования, и при этом обладает достоинствами метода электрохимической обработки, что в итоге позволяет получить ответственные поверхности с требуемой точностью без значительных те-

пловыделений и нежелательных изменений в поверхностном слое, связанных с силовыми воздействиями(наклеп, остаточные напряжения).

Чистовое электроабразивное шлифование является на сегодняшний день единственным процессом, в полной мере удовлетворяющим условиям получения поверхностного слоя с оптимальным качеством на деталях, длительно работающих при высоких температурах. Широкое промышленное применение процесса сдерживается существенными недостатками, присущими процессу электрохимической обработки (применение электролитов, коррозия оборудования и оснастки и т.д.) и специфическими, присущими методу электроабразивного шлифования. К ним, прежде всего, относится применение специальных токопроводящих кругов, усложненное оборудование и требование его более высококвалифицированного обслуживания.

Широко применяемый за последние десятилетия **процесс глубинного шлифования** является одним из немногих процессов, позволяющих одновременно повышать производительность обработки в авиационном двигателестроении и получать оптимальное качество поверхностного слоя. При обработке методом глубинного шлифования основных материалов, применяемых при производстве ГТД (жаропрочные и титановые сплавы, конструкционные высоколегированные стали), стабильно получают сжимающие остаточные напряжения и умеренную величину и степень наклепа. При этом полная автоматизация всего цикла обработки, включая правку круга, дает гарантию получения стабильного качества, обеспечиваемого автоматическим поддержанием оптимальных режимов обработки.

Существуют **современные методы обработки**, позволяющие целенаправленно воздействовать на поверхностный слой ответственных деталей. К ним относятся методы: *объемного виброконтактного упрочнения, алмазного выглаживания, турбоабразивной обработки*. Некоторые из них (виброконтактное упрочнение, турбоабразивная обработка) параллельно решают задачи скругления острых кромок и резкого снижения непроизводительного ручного труда.

В табл. 12.1 приводятся основные параметры качества поверхностного слоя, получаемые при различных методах обработки.

12.1. Параметры поверхностного слоя при различных методах обработки

Метод обработки	Параметры качества поверхностного слоя			
	Параметр шероховатости Ra , мкм	Остаточные напряжения, Н/мм ²	Глубина наклепа, мкм	Степень наклепа, %
Чистовое точение сталей и сплавов	1,25...2,5	–500...600	60...150	15...30
Шлифование абразивными кругами	0,63...1,25	–500...600	40...100	10...30
Шлифование лентой	0,32...1,25	–100...500	40...60	5...25
Полирование	0,16...0,32	–50...300	20...40	5...15
ЭХО, электрополирование	0,32...0,63	0	0	0
Электроабразивное шлифование	0,32...0,63	0...100	0...20	0...10
Глубинное шлифование	0,63...1,25	–200...500	50...130	10...30
Турбоабразивная обработка	0,16...0,32	–300...600	10...50	5...10
Алмазное выглаживание	0,04...0,1	–300...1000	100...220	50...100
Объемная виброконтактная обработка	0,08...0,32	–150...400	100...150	10...30

12.2. КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Качество поверхностного слоя после ЭХО определяется спецификой метода, гарантирующего отсутствие наклепа, остаточных напряжений и деформации кристаллической решетки, что благоприятно для высокотемпературных, длительно работающих поверхностей.

Более сложно при ЭХО формируется шероховатость поверхности, которая оказывает существенное влияние на ее работоспособность. Шероховатость зависит от материала и применяемого электролита, его температуры, плотности тока, скорости потока электролита, формы кривой подаваемого тока и т.д. Температура электролита на шероховатость влияет неоднозначно. Получение шероховатости $Ra = 0,32 \dots 0,63$ мкм на нержавеющей сталях возможно при пониженной температуре электролита до 4°C . При обработке титановых сплавов, напротив, для улучшения шероховатости электролит подогревают до $45 \dots 50^\circ\text{C}$.

Измельчение структуры обрабатываемого материала способствует понижению шероховатости. Поэтому целесообразно применять метод ЭХО для термообработанных поверхностей. После ЭХО на оптимальных режимах с получением равномерной шероховатости показатели эксплуатационных свойств поверхностного слоя возрастают. Поверхность после ЭХО имеет высокую стойкость против коррозии.

Необходимо учитывать особенности процесса ЭХО применительно к различным материалам. Так, наводороживание поверхностей титановых сплавов может снизить прочностные свойства. Если после ЭХО наблюдаются отдельные углубления (растравливание) при общей увеличенной шероховатости, то это резко снижает механическую прочность и стойкость материала к межкристаллической коррозии. Особенно процессу растравливания подвержены жаропрочные сплавы на основе никеля и, более всего, литейные типа ЖСК, ЖСУ-ВИ. При низкой плотности тока ($0,1 \dots 0,5$ А/мм²) на обработанных поверхностях обнаруживается растравливание по границам зерен на глубину $10 \dots 15$ мкм.

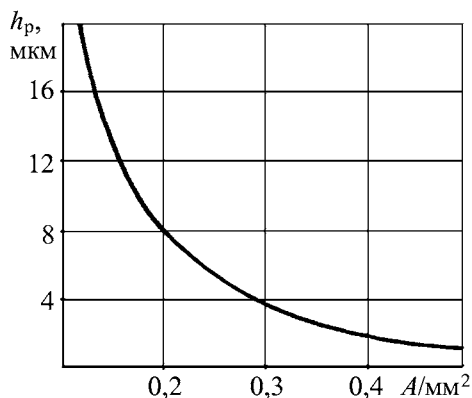


Рис. 12.1. Зависимость глубины растравливания при ЭХО жаропрочных литейных сплавов от плотности тока

На рис. 12.1 приведена зависимость между глубиной растравливания h_p литейных жаропрочных сплавов при ЭХО и плотностью тока. Для повышения качества обработки жаропрочных литейных сплавов необходимо:

- 1) производить обработку на повышенных плотностях тока;
- 2) снижать температуру электролита до 15...20 °С;
- 3) корректировать состав электролита, вводя специальные добавки.

Но даже с применением всех мероприятий, снижающих растравливание, метод ЭХО на ответственных поверхностях деталей из литейных жаропрочных сплавов не рекомендуется в качестве финишной обработки.

12.3. КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Механизм съема материала при этом методе обработки путем его теплового разрушения и выбрасывания расплавленной микропорции с образованием единичных микрократеров (лунок) вносит особенности в формирование всех параметров качества поверхно-



Рис 12.2. Микрофотография поверхностного слоя после электроэрозионной обработки ($\times 100$)

стного слоя. *Шероховатость поверхности* формируется из наложения друг на друга единичных лунок, которые в зависимости от энергии единичного импульса могут формировать поверхность в широком диапазоне шероховатости с достижением на чистовых режимах $Ra = 0,1 \dots 0,2$ мкм.

В результате оплавления и остывания материала в поверхностном слое материала образуются зоны, находящиеся в различных структурно-фазовых состояниях. В общем случае можно выделить: *зону отложения материала электрода, белую зону, образующуюся при застывании расплавленного металла, зону термического влияния, зону пластической деформации.* Между этими зонами нет четкой границы с взаимным проникновением одной в другую.

На рис. 12.2 показан микрошлиф поверхности из материала МС-32, обработанный данным методом. Отчетливо просматривается поверхностный белый слой глубиной 16...22 мкм. Зона термического влияния может значительно превышать по глубине белый слой и под действием, прежде всего, тепловых факторов иметь сформированное напряженное состояние. На рис. 12.3 показано влияние длительности единичного импульса и его энергии на глубину измененного слоя для жаропрочных сплавов на никелевой основе.

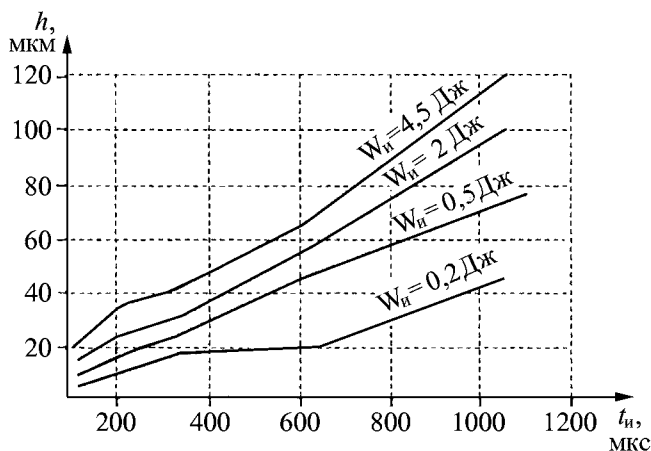


Рис 12.3. Влияние длительности и энергии импульса на глубину измененного слоя

Характер распределения остаточных напряжений в сплаве ЭИ-437, обработанный методом электроэрозионной обработки с длительностью импульса 1000 мкс и энергией 0,2 Дж (2) и 4 Дж (1) приведен на рис. 12.4.

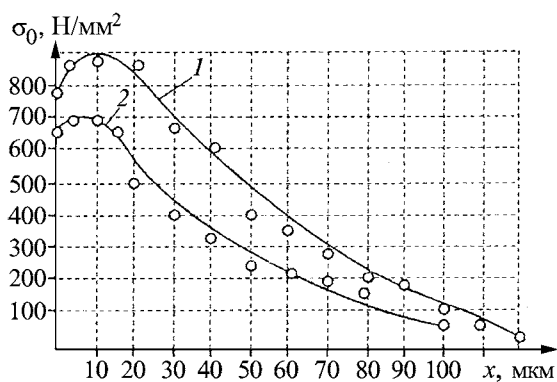


Рис 12.4. Влияние длительности и энергии импульса на глубину измененного слоя

Можно констатировать, что при электроэрозионной обработке возникают растягивающие остаточные напряжения и, в зависимости от энергии единичного импульса и времени его протекания, уровень напряжений может быть высоким и распространяться на значительную глубину в поверхностном слое.

Измененный слой характеризуется повышенной твердостью и хрупкостью, что является провоцирующим фактором для возникновения микротрещин. Поэтому, в общем случае, при применении электроэрозионной обработки в авиационном двигателестроении требуется гарантированное удаление поверхностного измененного слоя. Отраслевым стандартом ОСТ 100450–82 введены ограничения по применению метода обработки для изготовления высоконагружаемых деталей ГТД.

Применение высокочастотной электроэрозионной обработки на современных станках (особенно для проволочного вырезания) дает возможность гарантированно получать параметр шероховатости $Ra = 0,16...0,2$ мкм, свести к минимуму уровень растягивающих напряжений и глубину измененного слоя до нескольких микрометров. Это приближает *электроэрозионную обработку* к ряду финишных методов для обработки ряда поверхностей, но для деталей, работающих в режиме усталостной прочности, где зарождение первичных усталостных микротрещин начинается именно с поверхности, необходимо вводить операцию удаления даже минимального измененного слоя, например, виброполированием.

12.4. 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 ГТД 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 авиационном двигателестроении *методы упрочнения поверхностно-пластическим деформированием и отделочно-упрочняющие методы*.

1. *Вибрационные методы*, к которым относится виброшлифование, виброполирование, виброупрочнение с помощью рабочих тел, ускоряемых вибрационными силами. К этим методам можно отнести также ультразвуковое упрочнение.

2. *Струйно-ударные методы*, при которых рабочие тела в виде шаров, песка, чугуновой или стальной дроби ускоряются воздушной или жидкостной струей, а также кинетической энергией вращающегося барабана.

3. *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.).

4. *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 °С; из титановых сплавов – 450 °С; из конструкционных сталей – 300 °С; из алюминиевых сплавов – 160 °С; из магниевых сплавов – 200 °С.

12.4.1. 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. 12.5).

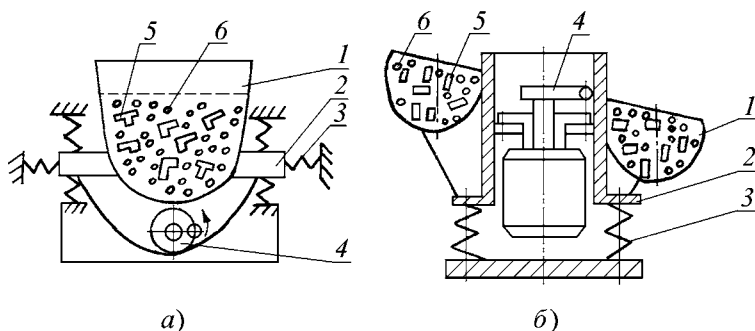


Рис. 12.5. Схемы установок для объемного виброупрочнения с рабочими камерами:

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, т.к. 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.

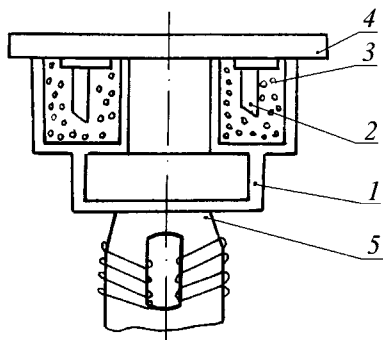


Рис. 12.6. Схема ультразвуковой установки для виброупрочнения:

1 – волновод; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – дробь;
4 – приспособление; 5 – магнитоотриктор

При ультразвуковом упрочнении в качестве рабочих тел используются твердые стальные шарики правильной формы, которым придается кинетическая энергия посредством волновода – концентратора от ультразвукового генератора. На рис. 12.6 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.

12.4.2. 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 наруж-

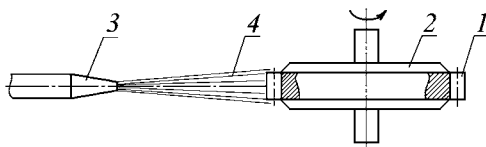


Рис. 12.7. Схема дробеструйного упрочнения зубчатого колеса:

1 – зубчатое колесо; 2 – защитное устройство; 3 – сопло;

4 – дробевоздушная смесь

ных 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 зубчатое колесо 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. 12.7). 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 от 54 до 80 м/с глубина упрочнения увеличивается от 0,1 до 0,15...0,20 мм. Особенно быстро идет увеличение глубины упрочнения в течение первых 1,5...5 мин.

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, параметр шероховатости обрабатываемой поверхности в пределах

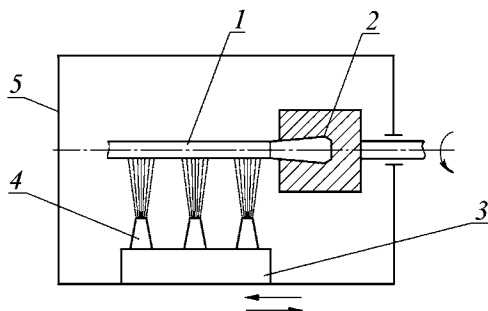


Рис. 12.8. Схема гидродробеструйной обработки:

1 – обрабатываемая заготовка; 2 – приспособление; 3 – подвижная каретка; 4 – сопло; 5 – рабочая камера

$Ra = 1...1,25$ мкм. 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. 12.8). 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.

12.4.3. 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 коэффи-

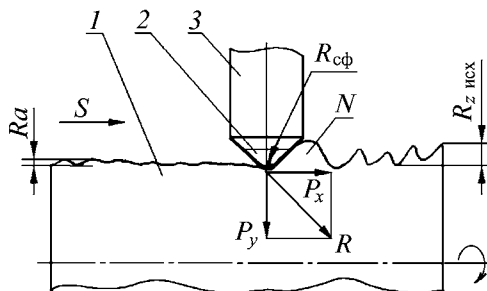


Рис. 12.9. Схема алмазного выглаживания:

1 – обрабатываемая заготовка; 2 – алмаз; 3 – оправка с регулируемым усилием; N – наплыв материала в процессе выглаживания

циенту 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.

Параметр шероховатости поверхности под алмазное выглаживание может быть в широких пределах: $Ra = 0,16...2,5$ мкм. Режимы выглаживания также достаточно широки. Скорость $v = 1...5$ м/с, подача $S = 0,02...0,1$ мм/об, радиальная сила $P_y = 200...350$ Н, число проходов $n = 1...2$. Применяется СОТС на основе масел.

На рис. 12.9 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 $Ra = 0,02...0,16$ мкм с большим заполнением профиля и увеличенной опорной поверхностью. После алмазного выглаживания поверхностные слои значительно упроч-

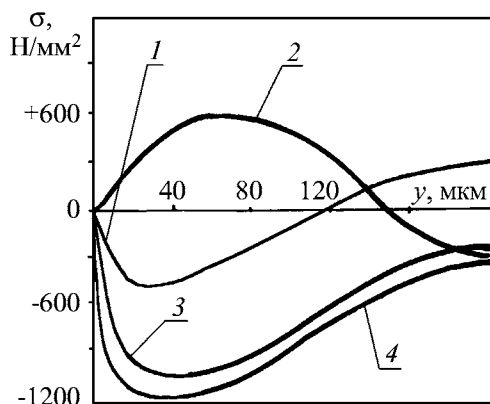


Рис. 12.10. Эпюры остаточных напряжений после алмазного выглаживания при различных предварительных методах обработки:
 1 – точение; 2 – шлифование; 3 – алмазное выглаживание после точения;
 4 – алмазное выглаживание после шлифования

няются и в них создаются сжимающие остаточные напряжения высокого стабильного уровня независимо от исходных остаточных напряжений.

На рис. 12.10 представлены эпюры остаточных напряжений шлифованных и проточенных образцов из стали 30ХГСА, подвергнутых алмазному выглаживанию. Предел усталостной прочности образцов после алмазного выглаживания увеличивается на 20 %, долговечность в десятки, а иногда в сотни раз.

12.4.4. 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 зёрнами и обрабатываемой поверхностью путем вращения деталей в кипящем абразивном слое.

Установка для турбоабразивной обработки (рис. 12.11) 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 кипя-

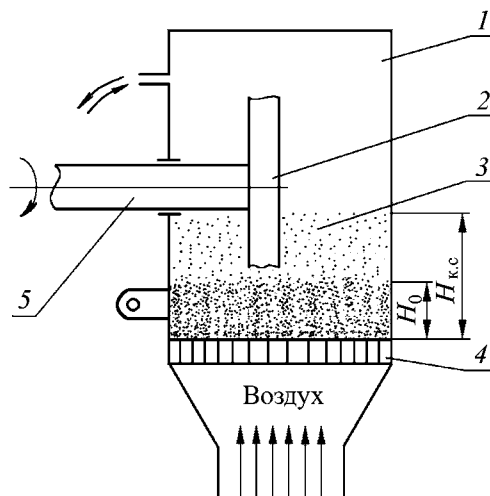


Рис. 12.11. Схема турбоабразивной обработки:

- 1 – рабочая камера; 2 – обрабатываемая заготовка; 3 – взвешенные абразивные зерна; 4 – пористая керамическая плита;
5 – вращающийся шпиндель

ший абразивный слой 3 высотой $H_{к.с.} = (1,4 \dots 1,6)H_0$. 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 $0,1 \dots 0,5$ м/с. Они способны производить съем слабой интенсивности в пределах $0,02 \dots 0,03$ мкм/мин. При вращении деталей со скоростью $20 \dots 25$ м/с съем с поверхности резко повышается и достигает $1 \dots 1,5$ мкм/мин, что повышает производительность турбоабразивной обработки.

С повышением зернистости применяемого абразива съем также повышается. Оптимальной является зернистость $40 \dots 63$. В процессе обработки поверхностей абразивное зерно измельчается, а также уменьшается острота его кромок, что снижает съем мате-

риала. 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, хромотитанистый электрокорунд 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 получен параметр шероховатости поверхности Ra от 0,2...0,3 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*.

Глава 13

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ОСВОЕННЫЕ В ОТЕЧЕСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ НА ОБОРУДОВАНИИ ЗАРУБЕЖНЫХ ФИРМ

13.1. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВАЛОВ ТУРБИНЫ И КОМПРЕССОРА

Механическая обработка валов обычно разделяется *на три этапа: черновую (обдирку), чистовую и окончательную обработку.*

На черновом этапе достигается выравнивание припусков под последующую чистовую обработку и удаляются поверхностные дефекты. Обработка ведется на мощных и жестких станках при максимально возможных режимах резания (рис. 13.1).

При чистовой обработке снимаются значительно меньшие припуски и режимы обработки здесь менее напряженные, во избежание деформаций как всего вала, так и его поверхностных слоев. Основная цель этого этапа – получить вал с малыми припусками на окончательную обработку, исправить погрешности после чернового этапа и коробления после термической обработки. Применяют многолезцовые токарные станки, а также станки с ЧПУ.

Черновое и чистовое растачивание ступенчатых отверстий выполняют на станках токарной группы, используя универсальные станки или станки с ЧПУ. Отдельные участки отверстия, имеющие высокую точность, после растачивания обрабатывают на внутришлифовальных станках.

При построении процессов обработки валов обычно придерживаются такой *последовательности, чтобы на последних этапах внутренние поверхности обрабатывались раньше наружных. Это обусловлено тем, что концентричность наружных внутренних по-*

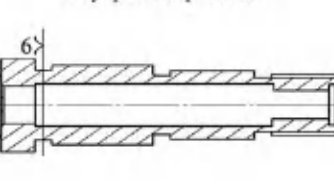
Схема обработки	Используемое оборудование
Черновая обработка  Наружное обтачивание  Внутренняя расточка 	Токарно-винторезные станки фирмы "MORI SEIKI", "OKUMA", "MAZAK", "INDEX" Токарно-винторезные и расточные станки с ЧПУ фирмы "BEHRINGER" мод. DUS-800, VA-800 

Рис. 13.1. Токарная обработка валов ГТД

верхностей проще обеспечить, если вначале обработать внутренние поверхности, а затем использовать их в качестве баз для обработки наружных.

Подрезку торцев и зацентровку валов в зависимости от их размеров и масштабов производства выполняют на токарных или фрезерно-центровальных станках. Крупные заготовки при небольших масштабах производства подторцовывают на фрезерных станках, а затем зацентривают вручную по разметке или кондуктору электродрелью или на радиально-сверлильных станках. При всех способах выполнения операции необходимо обеспечить равномерное распределение припуска.

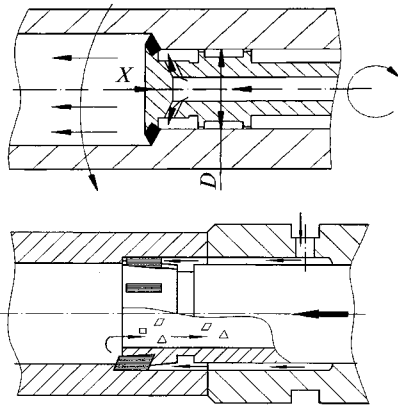
Схема обработки	Используемое оборудование
 При обработке валов с замкнутыми расширяющимися полостями используются борштанги с выдвижными резцами (координата Y), управляемыми ЧПУ рабочей головки.	 Специальный расточной станок фирмы "TORNITACCHI" мод. FT70, позволяет обрабатывать валы с отверстием бутылочного типа.

Рис. 13.2. Типовая технология фирмы "TORNITACCHI" для обработки глубоких отверстий

Обработка центрального отверстия коротких валов чаще всего осуществляется на станках токарной группы. На этих станках представляется возможным, кроме отверстия, обработать также наружные поверхности свободного конца. Особую сложность в обработке представляют валы с большим отношением длины к диаметру отверстия. Для обработки отверстий длинных валов используют сверла для глубокого сверления или расточные головки (рис. 13.2), а также электрохимическую обработку трубчатым электродом.

Схема обработки	Используемое оборудование
Шлифование шеек вала Шлифование резьб	Круглошлифовальный станок с ЧПУ, например фирмы "STUDER" мод. S-45

Рис. 13.3. Отделочные виды обработки валов ГТД

Обработку сверлами производят на горизонтально-сверлильных станках. Перед обработкой длинными сверлами для уменьшения их увода переднюю часть отверстия растачивают для направления сверла. Электрохимическая обработка отверстий осуществляется на специальных станках.

На окончательном этапе обработки получают заданные точность и шероховатость поверхностей. Наибольшее применение на этом этапе находят высокоточные токарные станки с ЧПУ и шлифовальные станки, а также различные методы отделки (полирование, хонингование, суперфиниширование) и упрочнения (обкатка роликами, обдувка дробью) поверхностей. На этом же этапе обычно обрабатывают *резьбы, мелкие шлицы и другие элементы*, которые могут быть повреждены, если их обработать раньше.

Шлифование шеек валов обычно применяется для получения высокой точности размеров и формы. *Шейки валов* шлифуют на круглошлифовальных станках методом продольной или поперечной подачи (рис. 13.3), а также на бесцентрово-шлифовальных станках. Шлифование с поперечной подачей (врезное шлифование) отличается высокой производительностью, особенно при обработке набором кругов, когда одновременно шлифуют несколько шеек вала. Одновременное шлифование шейки и торца уступа производят на торцешлифовальных станках с наклоном круга, например, 3Т16Е.

На этих станках можно точно выдержать линейный размер от базового торца, применяя установку на передний плавающий центр. *Шейки и торцы уступов* можно также обработать на круглошлифовальном станке, применяя круг с поднутрением на торце. Для повышения производительности труда на шлифовальных операциях предусматривают устройства для контроля размеров в процессе обработки и выключения подачи при достижении заданного размера.

Примерный план обработки цементируемых валов:

1. Термообработка заготовки (нормализация).

Черновой этап

2. Подрезка торцов и зацентровка.
3. Обтачивание наружных поверхностей.
4. Сверление и растачивание осевого отверстия, протачивание центровых фасок, отрезка образца для механических испытаний (для валов первой группы контроля).
5. Шлифование цементируемых внутренних и наружных поверхностей.

6. Меднение нецементируемых поверхностей.

7. Цементация, закалка, отпуск.

Чистовой этап

8. Восстановление баз, растачивание нецементированных внутренних поверхностей.
9. Обтачивание нецементированных наружных поверхностей.
10. Фрезерование канавок, лысок, шлицев и т.п., сверление радиальных отверстий.

Окончательный этап

11. Шлифование цементированных участков отверстия и наружных шеек.
12. Шлифование шлицев, нарезание резьб, полирование поверхностей.
13. Отделка рабочих поверхностей.
14. Окончательный контроль.

13.2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИСКОВ КОМПРЕССОРОВ И ТУРБИН

Обработка дисков из заготовок с большими припусками (пруток, поковка) начинается с обдирки заготовки кругом на токарно-карусельных или токарно-лобовых станках, как правило, отечественного производства. Диски небольших размеров обрабатывают на токарных и токарно-револьверных станках. Первичными базами при этом служат цилиндрическая поверхность обода и торец (рис. 13.4).

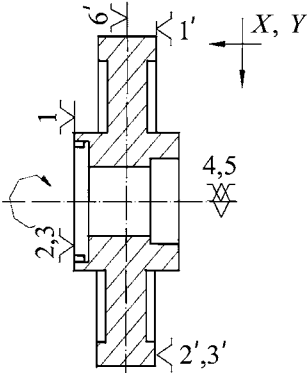
Схема обработки	Описание процесса
	Обработка диска компрессора ГТД осуществляется за две установки: 1-я установка – базы 1–6 2-я установка – базы 1'–6'

Рис. 13.4. Предварительная обработка дисков ГТД

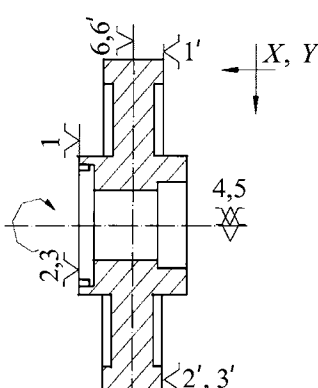
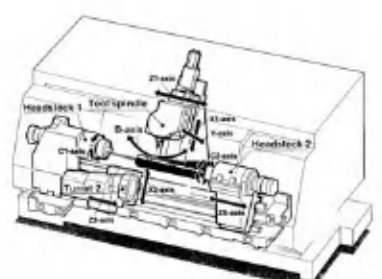
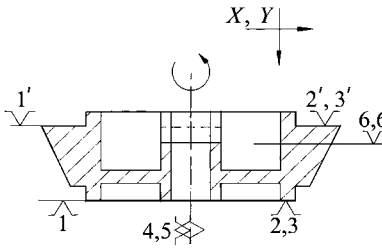
Схема обработки	Схема и общий вид оборудования
 Схема 1 – на станке с горизонтальным расположением шпинделя	 
 Схема 2 – точение диска на специальном токарно-карусельном станке с ЧПУ фирмы "Бертье" мод. TFM-160	

Рис. 13.5. Чистовое точение дисков ГТД

Далее диски поступают на предварительное точение (штамповки пропускают процесс обдирки), которое осуществляется на станках DF-1000 фирмы "HEID", "MAX MULLER". При поочередной смене установочных баз 1, 2, 3 на 1', 2', 3', что необходимо производить при обработке дисков с тонким полотном ступицы, используются станки с противощпинделями фирмы "MAZAK" – серия INTEGRIX; "OKUMA" – серия MACTURN, "MORI SEIKI" – серия NT, MT (рис. 13.5).

Получистовая и чистовая токарная обработка дисков выполняется на тех же станках, но в качестве баз стараются использовать торец и наружную или внутреннюю поверхность выступающего посадочного пояса с тем, чтобы за один установ обработать торец, наружную поверхность обода и часть второго торца. Это диктуется необходимостью более равномерного расположения массы диска относительно его оси и уменьшения статической неуравновешенности. С этой же целью операции получистовой и чистовой обработки стремятся максимально совместить, используя для этого многопроходную обработку на станках с ЧПУ. Если между черновой и получистовой обработкой нет термообработки, то целесообразно их совместить, используя для этого токарные центры с противощпинделями. *Эффект*: снижение трудоемкости на 30...40 %, сокращение количества используемого оборудования в 2...2,5 раза.

Чистовая обработка фасонных торцов диска выполняется на токарных станках с ЧПУ с каждой стороны отдельно. При переустановке диск тщательно выверяется по наружной поверхности обода и торцу. Для повышения режимов резания и снижения шероховатости обрабатываемой поверхности при обработке нежестких дисков применяют дополнительные подводимые опоры.

Пазы под лопатки в дисках турбин и компрессоров протягивают на горизонтально-протяжных и вертикально-протяжных станках. Горизонтально-протяжные станки отечественного производства модели 7Б57 со специальным делительным столом используют для условий серийного и крупносерийного производств. В условиях единичного и мелкосерийного производств, как правило являющихся приоритетными в изготовлении дисков ГТД, ис-

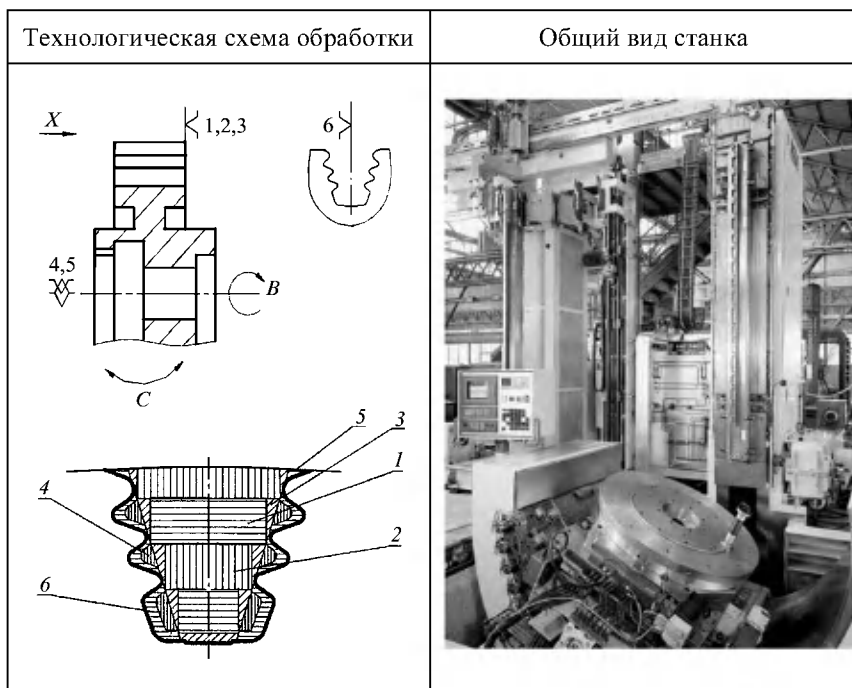


Рис. 13.6. Технология протягивания пазов в дисках ГТД:

1...6 – припуски, последовательно снимаемые протяжками

пользуются вертикально-протяжные станки фирмы "HOFFMANN" (рис. 13.6). Станок имеет глобусный стол, что позволяет производить обработку широкой номенклатуры дисков разных конструктивных форм и форм пазов. Использование такого станка позволяет сократить количество металлорежущего оборудования, сократить сроки технологической подготовки производства, что в целом приводит к снижению себестоимости дисков на 20 %.

Для предупреждения брака при изготовлении дисков из-за погрешностей протягивания применяется проверка точности каждого комплекта протяжек по форме и размерам пазов, протягиваемых этим комплектом в специальных образцах перед запуском его в

производство и перед переточкой. С этой же целью смена протяжек осуществляется принудительно до наступления недопустимого износа.

Пазы протягивают с использованием делительных приспособлений, устанавливаемых на станке прямо или под углом в зависимости от направления пазов. За установочные базы при протягивании пазов обычно принимают центрирующие пояски, а в дисках с торцовыми шлицами – центральные отверстия. При отсутствии отверстия диски закрепляют крючками за торец фланца. Если фланца нет, то диск закрепляют 4...6 струбцинами за обод. При повороте диска и приближении к протяжке места, перекрытого струбциной, последняя переставляется на другое место. Так, по очереди снимая и переставляя струбцины, протягивают все пазы диска, не смещая его относительно установочного элемента приспособления.

Протяжки для дисков из жаропрочных сплавов и сталей и из титановых сплавов делают преимущественно из быстрорежущих сталей Р18 и Р9К5. Скорости резания при протягивании дисков из жаропрочных сплавов (типа ЭИ437Б) – 1,8 м/мин. Стойкость комплекта елочных протяжек для дисков турбины до отправки их в заточку составляет в среднем 50...70 пазов.

Для уменьшения затрат на изготовление протяжек в индивидуальном и мелкосерийном производстве выгодно вводить *предварительное фрезерование пазов*. Эта операция может выполняться на горизонтально-фрезерном станке с помощью делительного приспособления. Применение фрезерования позволяет заменить фрезой протяжки, предназначенные для снятия первых двух-трех участков припуска, за счет этого сокращается количество технологической оснастки и инструмента, а также сроков технологической подготовки производства (рис. 13.7).

Торцовые шлицы на дисках компрессора могут обрабатываться фрезерованием, круглым протягиванием или строганием. Делительные приспособления, используемые на этой операции, должны обеспечить точность шага в пределах 0,015...0,02 мм.

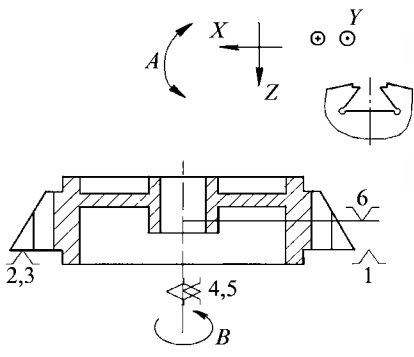
Технологическая схема обработки	Общий вид станка
Фрезерование пазов на горизонтальном обрабатывающем центре фирмы "STARRAG" мод. ZT-1000, фирмы "MITSUBISI" мод. HT 60Z/80Z  Количество управляемых координат определяется формой паза. Для обработки криволинейного паза с изменяющейся глубиной необходимо 5 осей.	

Рис. 13.7. Фрезерование пазов на горизонтальном обрабатывающем центре

При изготовлении пазов больших типоразмеров перед протягиванием осуществляется ЭХО дисков. Схема ЭХО и вид электрода представлены на рисунке 13.8.

Это достигается использованием в механизме деления приспособлений беззачорных конических или призматических фиксаторов. Фрезеруют шлицы дисковой фрезой с треугольным профилем зуба на горизонтально-фрезерном станке.

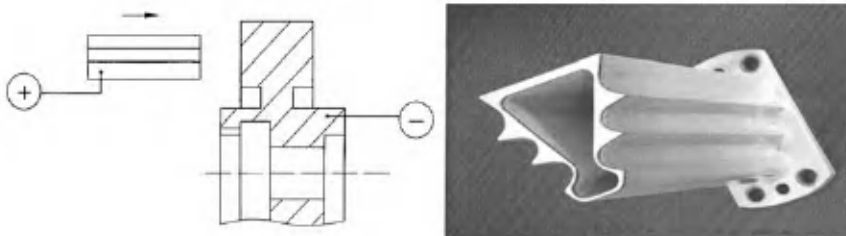


Рис. 13.8. ЭХО пазов дисков ГТД типа "елка"

Примерный план обработки дисков турбин и компрессоров воздушно-реактивных двигателей может выглядеть следующим образом.

1. Обдирка заготовки кругом с оставлением припуска 3...4 мм на сторону и подрезка одного торца с низкой шероховатостью под ультразвуковой контроль.
2. Ультразвуковой контроль.
3. Термообработка – закалка, отпуск или старение.
4. Первая предварительная обточка диска кругом.
5. Вторая предварительная обточка диска кругом.
6. Чистовая обточка диска кругом.
7. Полирование торцов с двух сторон и внутренних поверхностей под травление.
8. Травление для определения поверхностных дефектов. Промывка.
9. Сверление и развертывание фиксирующих отверстий в основаниях елочных пазов (только в дисках турбин).
10. Фрезерование паза на торце диска для фиксации при протягивании (только для дисков компрессора).
11. Протягивание и контроль елочных пазов на образце и в ложном диске (только в дисках турбин).
12. Протягивание и контроль пазов типа "елки" или "ласточкина хвоста".
13. Слесарная обработка пазов.
14. Шабрение базового торца с прилеганием по краске > 80 % площади (только в дисках компрессора).

15. Чистовая проточка базовых поясков и торцов с двух сторон по очереди (только в дисках с торцовыми шлицами).

16. Фрезерование выемок на фланце и торце ступицы диска турбины.

17. Сверление отверстий в пазах под фиксирующие штифты для установки лопаток.

18. Фрезерование в дисках компрессора торцовых шлицев.

19. Срезание одного торцового шлица (только в дисках компрессора).

20. Полирование внутренних поверхностей и торцов.

21. Окончательный контроль.

13.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БАЗОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛОПАТОК

Как было отмечено в разделе 9.4, наиболее важным элементом техпроцесса изготовления лопаток является **изготовление базовых поверхностей** под механическую обработку и распределение припусков на полке, корыте и замковой части. Для обработки на заготовках лопаток всего комплекта поверхностей, образующих технологические базы, за один уставов необходим станок, позволяющий использовать в процессе обработки как минимум три инструмента (торцевая фреза, центровочное сверло, зенкер или коническая фреза), а также обеспечивающий возможность программируемого перемещения детали вдоль трех координатных осей и поворота вокруг одной оси.

Использование технологии фирмы "HERMLE" или фирмы "Micron" в отечественном производстве позволило получить существенные положительные результаты в этой области как с точки зрения качества изготовления лопаток ГТД, так и с точки зрения экономического эффекта (рис. 13.9).

В основе данной технологии заложена *концентрация технологических операций на одном многоцелевом станке*. Такой подход позволяет исключить ряд технологических операций и переходов, связанных с распределением припуска между спинкой и корытом лопатки, множество перестановок лопатки из одного положения в другое, ручной настройки различного оборудования, а также применение

целого ряда специальных приспособлений. В такой технологии все эти функции выполняет само оборудование. Это позволяет снизить трудоемкость заготовительных операций до 30 % и уменьшить количество используемого оборудования и оснастки в 2...3 раза, при этом отмечается гарантированное распределение равномерного припуска по перу и замку лопаток, существенное снижение бракованных деталей.

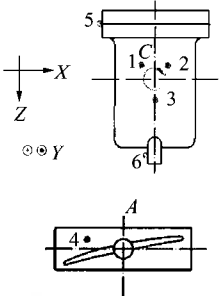
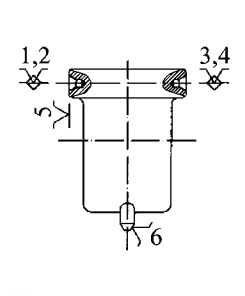
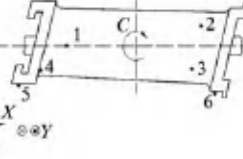
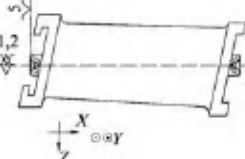
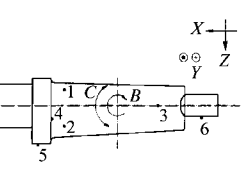
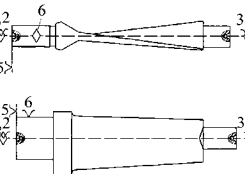
Описание технологии	Схема обработки заготовки лопатки	Схема полученных технологических баз под последующие операции
Технология изготовления баз рабочих лопаток компрессора на 4-координатном МОЦ типа HERMLE C500U		
Технология изготовления баз статорных лопаток компрессора на 4-координатном МОЦ типа HERMLE C500U		
Технология изготовления баз лопаток компрессора на 5-координатном МОЦ типа Micron 710, HERMLE C 600U, C800U		

Рис. 13.9. Технология изготовления базовых поверхностей лопаток

Обработка выполняется следующим образом. Вначале за три технологических перехода фрезеруются торцы хвостовика и технологической бобышки, затем фреза заменяется на центровочное сверло и за два перехода обрабатываются центровые отверстия на торцах хвостовика. После этого центровочное сверло заменяется зенкером или конической фрезой и за один переход выполняется обработка конической поверхности на технологической бобышке зенкером или фрезерованием обкатом.

13.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПЕРА ЛОПАТОК

Обработка лопаток на станках с ЧПУ неразрывно связана с появлением в последние годы высокоточных трех- и пятикоординатных обрабатывающих центров и высококачественного твердосплавного инструмента. Такие станки обеспечивают обработку как поверхностей проточной части лопаток, так и основных поверхностей хвостовиков за один установ детали.

В зависимости от серийности производства в качестве исходных заготовок могут быть использованы как объемные профилированные штамповки, так и полосы прямоугольного сечения.

Черновой этап обработки заготовок с большим припуском может выполняться на трехкоординатных станках за два установа или позиционирования детали. С целью повышения производительности на черновом этапе используют фрезы большого диаметра. Такой инструмент может быть использован и для чистовой обработки пера за исключением участков сопряжения пера с хвостовиком и бандажными полками. Для обработки этих участков приходится использовать конические или цилиндрические фрезы со сферической торцевой частью, радиус которой равен радиусу сопряжения пера с другими элементами проточной части. При этом между участками поверхности пера, обработанными разным инструментом, неизбежно остаются уступы, которые в дальнейшем приходится сглаживать ручной полировкой.

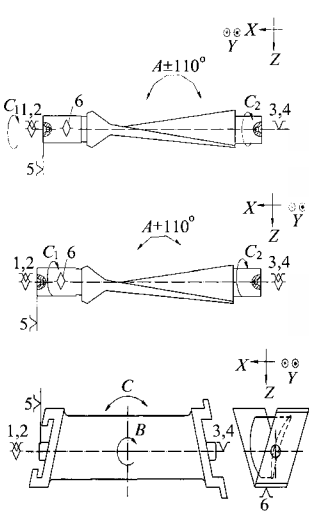
Описание технологии	Технологическая схема обработки	Рабочая зона станка
Технология изготовления пера рабочих лопаток компрессора на 5- и 6-координатном МОЦ типа Starrag NX-151		

Рис. 13.10. Технологии изготовления поверхностей пера лопаток

Другим серьезным недостатком обработки лопаток за два установка или две позиции является то, что вследствие деформаций лопатки, вызванных перераспределением остаточных напряжений, возникают дополнительные погрешности относительного расположения профилей корыта и спинки, что также приводит к необходимости их последующей доработки.

Более эффективной с точки зрения обеспечения точности и качества обработанных поверхностей является обработка всех элементов проточной части лопатки за один установ одним инструментом на пятикоординатных обрабатывающих центрах. В этом случае становится возможной одновременная обработка корыта, спинки и кромок лопатки путем обката сферическим торцом фрезы. С целью обеспе-

чения максимальной жесткости детали обработку начинают с периферийной части лопатки. Такая обработка обеспечивает максимально возможную для станка точность относительного положения корыта и спинки. Конечно, и в этом случае неизбежны деформации детали от перераспределения внутренних напряжений, но они, практически, не сказываются на точности профиля сечений пера, а приводят только к погрешностям расположения сечений относительно продольной оси лопатки, ограниченным специальными допусками.

Наиболее успешное признание в этой области получили фирмы "Starrag" (Starragheckert), "Micron", "HERMLE" (рис. 13.10, 13.11).

Целью данных технологий является концентрация технологических операций на одном станке (уменьшение количества установов и повышение за счет этого точности обработки), равномерное распределение припусков под последующую финишную обработку, уменьшение величины окончательных припусков. Обработка по данной технологии производится на 5-координатном МОЦ типа "Starrag" HX-151, "Micron" 710, "HERMLE" C600U, C800U. Наличие пяти одновременно управляемых координат является обязательным условием выбора оборудования, так как в процессе обработки для стабилизации условий резания необходимо обеспечивать постоянные значения угла наклона оси фрезы к нормали обрабатываемой поверхности в каждой ее точке. *Эффект от внедрения такой технологии* следующий: снижение трудоемкости операций до 30...50 % и уменьшение количества используемого оборудования и оснастки в 2,5...3 раза.

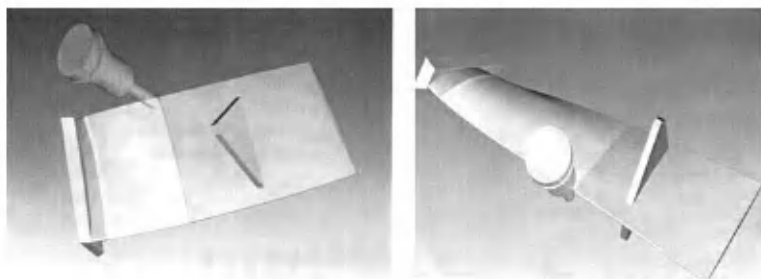


Рис. 13.11. Типовая технология обработки пера компрессорной лопатки, разработанная фирмой "Starrag"

13.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАМКОВОЙ ЧАСТИ ЛОПАТОК

В настоящее время существует множество технологических приемов и соответствующих технологий, позволяющих с теми или иными преимуществами обрабатывать замки лопаток.

В условиях многономенклатурного малосерийного производства применение для обработки хвостовиков лопаток протягивания или глубинного шлифования оказывается неэффективным вследствие необходимости изготовления дорогостоящей и трудоемкой технологической оснастки. Решение задачи обработки хвостовиков лопаток типа "ласточкин хвост" в условиях многономенклатурного малосерийного производства можно получить за счет использования четырехкоординатных станков с ЧПУ, обеспечивающих относительное прямолинейное перемещение инструмента и детали по трем координатам и поворот детали вокруг продольной оси хвостовика.

На рисунке 13.12 представлены *три прогрессивные технологии*, позволяющие обрабатывать замок лопатки *со следующими преимуществами*:

- 1) обрабатывать все поверхности замковой части за одну установку;
- 2) уменьшать количество используемого оборудования в 2,5...3 раза;
- 3) снижать трудоемкость обработки на 30 %.

Первая технология, применяемая фирмой "SNECMA", заключается в том, что лопатка устанавливается в специальную установку по центровым отверстиям для заливки в специальные брикеты (центровые отверстия используются в том числе и для обработки пера). Такое базирование позволяет обеспечить более точное и жесткое центрирование лопатки и распределение припуска по замковой части. Для заливки используются легкоплавкие материалы, имеющие достаточную твердость для закрепления лопатки по базовым поверхностям центральной (брикетной) части лопаток, которые при этом легко удаляются после завершения обработки.

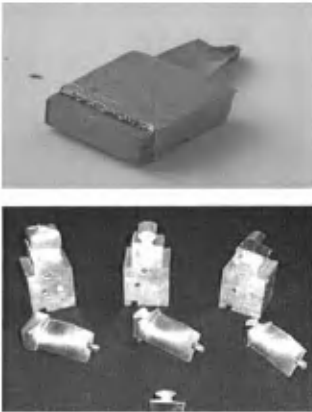
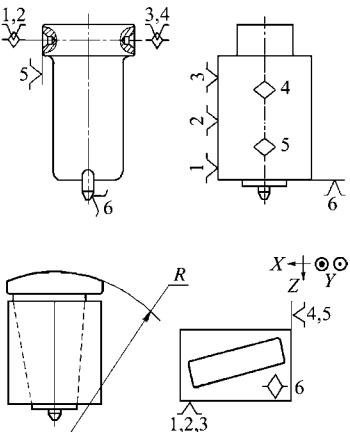
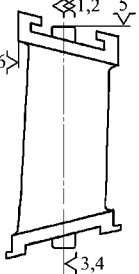
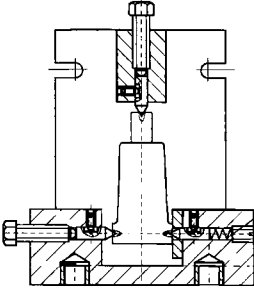
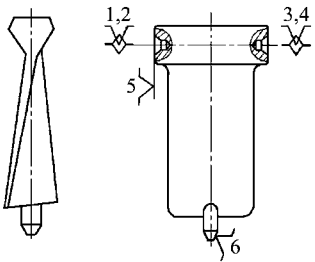
Описание технологии	Технологические схемы обработки
1. Обработка замка лопаток в брикетах 	
2. Обработка замка лопатки в приспособлении, имитирующем кольцо статора компрессора →	
3. Обработка замков лопаток в центрах (приспособление должно иметь возможность поворота детали вокруг своей оси) 	

Рис. 13.12. Типовые технологии изготовления поверхностей замковой части лопаток

Вторая технология, используемая как на зарубежных, так и отечественных предприятиях заключается в обработке боковых поверхностей замков статорных лопаток в специальных приспособлениях – технологических колесах, имитирующих готовые сборочные единицы. Полный комплект лопаток устанавливается в такое колесо и производится обработка наиболее ответственных поверхностей замков лопаток, служащих конструкторскими базами в изделии. Такое базирование исключает погрешности, связанные с несовпадением конструкторских и технологических баз, а также существенно повышает производительность обработки.

Третья технология, также широко осваиваемая на современных предприятиях, заключается в обработке замков лопаток на горизонтально-протяжных станках или вертикально-фрезерных многоцелевых станках фирм "HERMLE" (серия C), "Starrag" (серия SX), "MAXO" и некоторых других. В качестве баз используются наиболее удачные с точки зрения точности и наиболее неудачные с точки зрения жесткости фиксации поверхности – центровые отверстия. Для дополнительного силового замыкания заготовок иногда приходится использовать дополнительные поджимы, упоры и т.п.

13.6. ТЕХНОЛОГИЯ БЕЗРАЗМЕРНОЙ ПОЛИРОВКИ ПЕРА ЛОПАТОК

Электрохимической обработкой или обработкой на станках с ЧПУ удастся сформировать геометрические параметры проточной части лопатки, но в большинстве случаев для этих методов оказывается недостижимым обеспечение необходимых параметров шероховатости поверхностей и состояния поверхностного слоя. Для решения этих задач широкое распространение получили методы объемной абразивной обработки.

Физическая сущность процесса объемной абразивной обработки заключается в том, что вся поверхность детали одновременно подвергается воздействию не связанными между собой частицами рабочей среды, которая представляет собой абразивные гранулы различной формы, массы, параметров абразивного зерна и

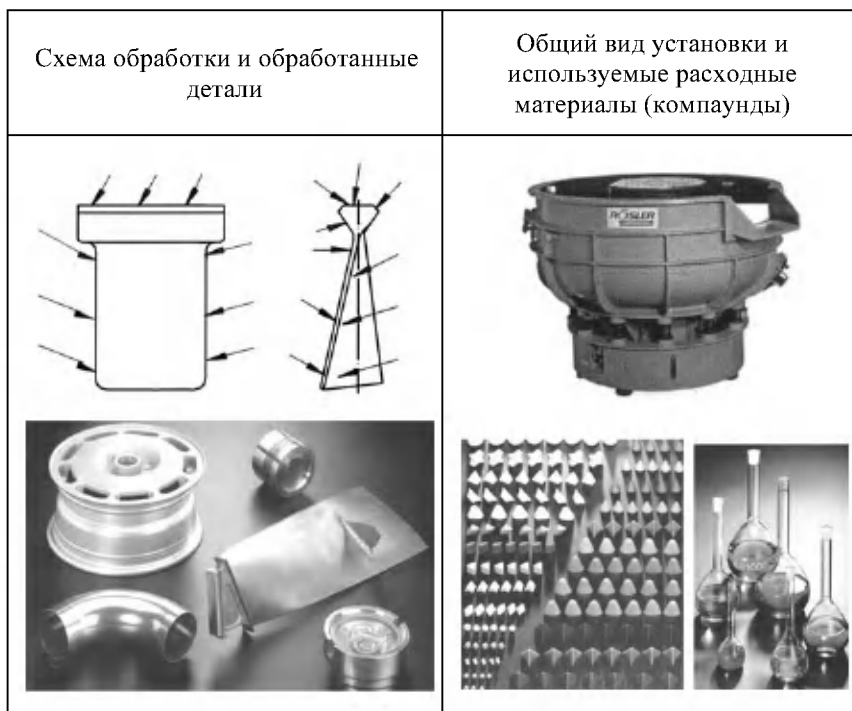


Рис. 13.13. Обработка пера лопаток в установках фирмы "ROSLER"

связки, а также жидкости в виде водных растворов химических соединений, обладающих необходимыми свойствами (моющими, травящими, блескообразующими и т.п.).

Наибольших успехов при безразмерной полировке пера лопаток достигла фирма "ROSLER" (рис. 13.13), оборудование и технология которой распространены по всему миру, в том числе и в России. Обработка по данной технологии позволяет не только полировать поверхность пера лопатки практически до зеркальной чистоты, но и упрочнять поверхностный слой за счет воздействия упрочняющих элементов (шариков).

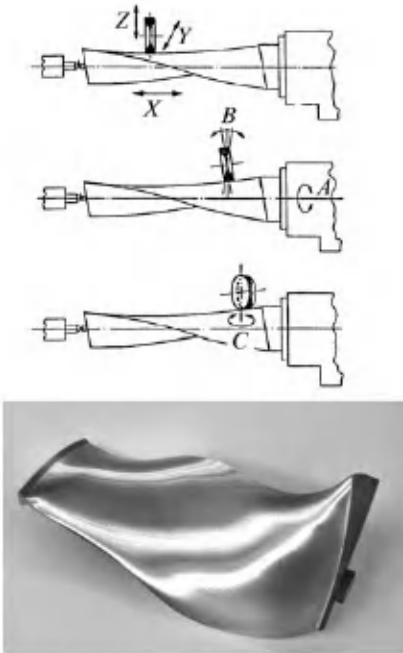
Схема обработки и обработанные детали	Общий вид установки, рабочая зона
	

Рис. 13.14. Обработка пера лопаток абразивной лентой

Рабочая среда и обрабатываемые детали помещаются в резервуар, которому с помощью вибратора сообщаются механические колебания. При этом рабочей среде и деталям сообщается энергия, достаточная для снятия с детали мельчайших частиц металла и (или) пластической деформации поверхности детали. Соотношение между съемом металла и деформирующим воздействием зависит от вида и материала частиц рабочей среды, параметров колебаний. В зависимости от сочетания этих параметров получают:

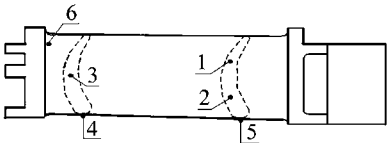
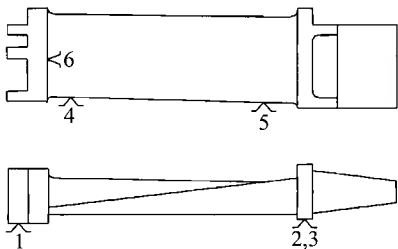
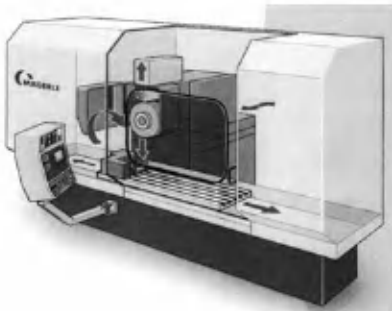
Схемы базирования лопатки в технологическом процессе	Используемое оборудование и рабочая зона станка
 Схема 1 – обработка технологических баз замковой части под обработку профиля при базировании по перу  Схема 2 – обработка технологических баз замковой части под обработку профиля при базировании по перу и элементам замковой части	Для шлифования базовых поверхностей на полках хвостовика и бандажной полки используются отечественные плоскошлифовальные станки типа 3Е721, 3Д722 или зарубежные, например фирмы "MAGERLE" 

Рис. 13.15. Традиционная технология обработки лопаток турбины в серийном производстве

1) *объемное виброшлифование*, характеризующееся заметным съемом металла особенно с острых кромок (удаление травленного слоя с поверхности детали после дефектоскопического травления, скругление кромок пера) и средним значением глубины упрочненного слоя;

2) объемное виброполирование, отличающееся незначительным съемом металла, снижением шероховатости поверхности ($Ra = 0,16 \dots 0,32$ мкм) и малой толщиной упрочненного слоя.

Из разновидностей механического шлифования и полирования наибольшее распространение получает обработка абразивной лентой (рис. 13.14). Обработка осуществляется узкими абразивными лентами на специальных станках с ЧПУ типа METABO MTS 1000-6 NC продольными строчками.

Шлифование абразивной лентой имеет ряд преимуществ по сравнению со шлифованием абразивным кругом (рис. 13.15):

1) эластичная абразивная лента обеспечивает равномерное снятие припуска по всей шлифуемой фасонной поверхности детали;

2) скорость ленты не зависит от износа, в то время как при износе абразивного круга его диаметр уменьшается;

3) рабочая поверхность ленты может быть в несколько раз больше рабочей поверхности круга, что дает возможность повысить производительность за счет улучшения условий охлаждения;

4) шлифование абразивными лентами обычно сопровождается возникновением в поверхностном слое детали сжимающих остаточных напряжений.

Недостатком способа является невозможность обработки кромок пера, а также участков сопряжения пера с замком.

13.7. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ И СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ

В настоящее время базовые плоскости на технологической бобышке или антивибрационной полке и замковой части рабочей лопатки турбины обрабатывают, главным образом, **глубинным шлифованием** (см. раздел 9.3).

В процессе развития технологии обработки турбинных лопаток был осуществлен переход от технологических баз в виде замков лопаток (см. рис. 13.15) на технологические базы в виде центров или центровых отверстий (рис. 13.16).

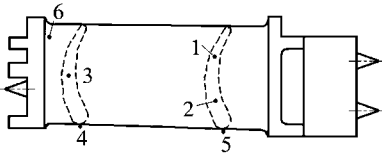
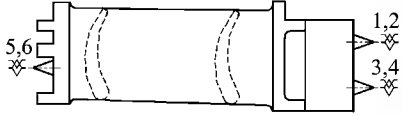
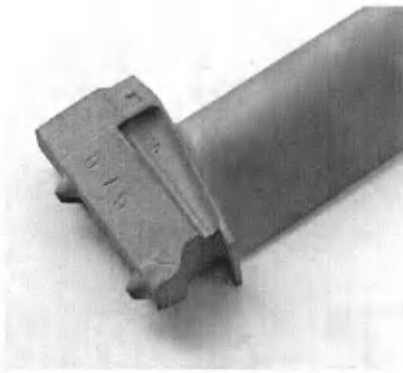
Схемы базирования	Технологические базы в виде центров
 Схема базирования лопатки по перу для обработки технологических центров  Схема базирования лопатки в центрах для обработки пера и элементов замковой части	

Рис. 13.16. Перспективная технология обработки лопаток турбины

Данная технология позволила существенно повысить точность обработки пера лопаток, однако она имеет некоторые *ограничения по использованию* производительных режимов обработки в связи с малой жесткостью системы.

Для устранения этой проблемы был снова осуществлен переход от баз в виде центров (центровых отверстий) к базам в виде плоскостей, однако при этом плоскости технологических баз находятся не на замковой части лопаток, а на брикетах, в которые заключены лопатки (рис. 13.17).

Такая технология была разработана фирмой "MAGERLE" и освоена отечественным производством. Для заливки лопаток в

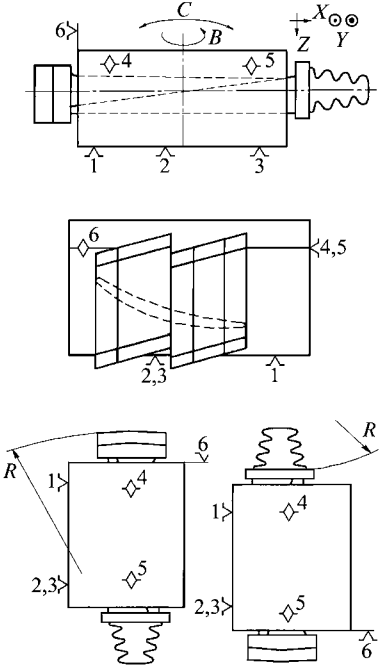
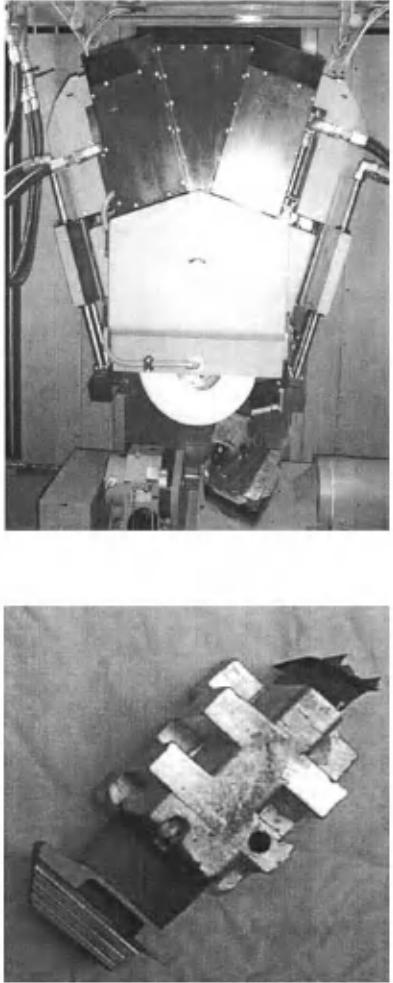
Технологическая схема обработки	Рабочая зона станка и вид обрабатываемой детали
 The technical drawing illustrates the processing technology for turbine blades. It consists of three main views: Top View: A side view of the blade showing coordinate axes X, Y, and Z. A curved arrow indicates rotation C around axis B. Numbered points 1, 2, 3, 4, 5, and 6 are marked along the blade's length. Middle View: A perspective view of the blade showing its internal structure and the numbered points 1 through 6. Bottom View: Two cross-sectional views of the blade, each showing internal features and rotation R around a vertical axis.	 The right column contains two photographs: Top Photograph: A view of the machine's working area, showing the complex mechanical structure and the illuminated processing zone. Bottom Photograph: A close-up view of the processed turbine blade, showing its intricate internal structure and the numbered points 1 through 6.

Рис. 13.17. Технология обработки турбинных лопаток в брикетах фирмы "MAGERLE"

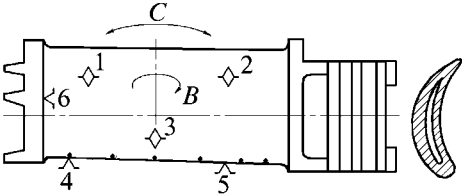
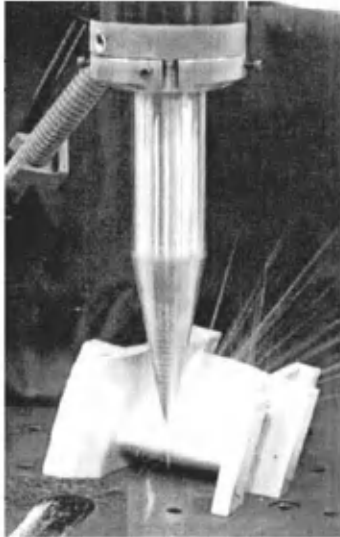
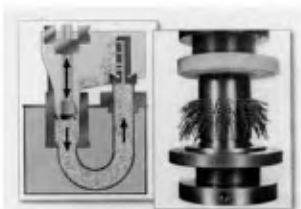
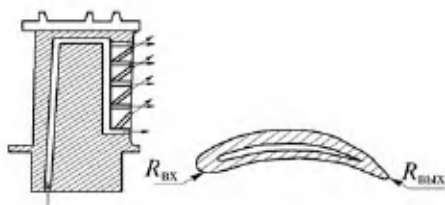
Схема обработки	Вид и описание установки
Прожиг отверстий со стороны входной кромки 	5-координатный твердотельный лазер мощностью 200 Вт фирмы "ЛАМБУРДИНИ" 

Рис. 13.18. Технологии прожига внутренних каналов, отверстий охлаждаемых турбинных лопаток

брикеты из легкоплавкого материала используется специальная установка, а для обработки замков лопаток – специальные шлифовальные машинно-обрабатывающие центры фирмы "MAGERLE" мод. MFG-130 (глобусный стол, 5 одновременно управляемых координат, три правящих ролика).

Можно использовать и отечественные станки, в частности, модернизированные фирмой "СТАКОВЕНД" станки мод. ЛШ-220, оснащенные глобусным столом и высокоскоростным шпинделем для работы эльборовыми кругами.

Хонингование внутренних полостей охлаждаемых лопаток, полирование входной и выходной кромки



Установка для прокатки внутренних полостей лопаток фирмы "EXTRUDE-HONE" дает эффект: снижение трудоемкости при прошивке отверстий по сравнению с эрозией в 3 раза, исключение концентраторов напряжений во внутренних полостях лопаток



Рис. 13.19. Технология окончательной обработки внутренних каналов, отверстий охлаждаемых турбинных лопаток

Данная технология позволяет повысить точность обработки и при этом сократить технологический цикл изготовления лопаток в 4...5 раз.

В качестве основного метода обработки профиля пера при изготовлении лопаток из заготовок с припуском по перу используется *размерная электрохимическая обработка*. При изготовлении однозамковых лопаток относительно небольших габаритов метод позволяет сформировать все элементы проточной части лопатки за

одну операцию. В тех случаях, когда обеспечить заданную чертежом точность обработки не удастся, размерная электрохимическая обработка применяется в качестве предварительной под последующее шлифование или полирование.

Шлифование пера лопаток турбины, слесарно-полировальные операции, связанные с доработкой кромок и участков сопряжения пера с замком, а также отделочные операции выполняются так же, как и соответствующие операции, выполняемые при изготовлении пера лопаток компрессора.

В качестве специальных методов обработки турбинных лопаток представляет интерес *прожиг отверстий со стороны входной кромки пера* (рис. 13.18), *прокачка внутренних полостей и отверстий методом экструдонингования охлаждаемых лопаток* (рис. 13.19). В совокупности данные методы позволяют обрабатывать отверстия охлаждаемых турбинных лопаток с высокой степенью точности, высокой шероховатостью, исключением концентраторов напряжений во внутренних полостях и снижением трудоемкости обработки в 2...2,5 раза.

13.8. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОНОКОЛЕС (КРЫЛЬЧАТОК)

Стремление к повышению удельных характеристик и повышению компактности газотурбинных энергетических установок привело к появлению в компрессорах конструкций *монолитных колес с широкохордными лопатками* (блисков) и *центробежных крыльчаток* (рис. 13.20). Создание таких конструкций стало возможным и благодаря успехам в области технологии обработки межлопастных каналов, в частности, созданию многокоординатных станков с ЧПУ и высококачественного твердосплавного инструмента.

Заготовки открытых и полузакрытых крыльчаток для серийного производства обычно штампуют в закрытых штампах или отливают по выплавляемым моделям. Форму штампованной заготовки стремятся приблизить к форме готовой детали. Поэтому, если возможно, делают углубления между лопастями и в центре, где будет центральное отверстие.

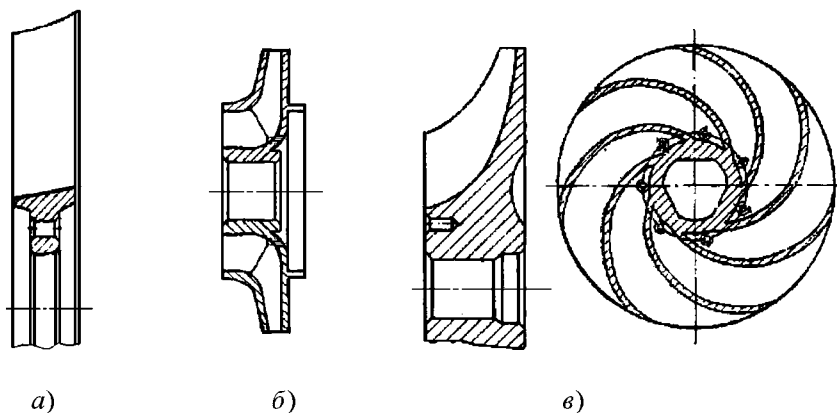


Рис. 13.20. Крыльчатки:

а – открытая; *б* – полузакрытая; *в* – закрытая

Механическая обработка крыльчаток делится на три этапа: черновой, чистовой и окончательный. На черновом этапе обрабатываются все поверхности крыльчатки, убираются штамповочные уклоны и напуски. Обработка ведется с большими подачами и глубинами резания. Особую сложность при обработке штампованных заготовок открытых и полузакрытых крыльчаток представляет прорезка межлопастных каналов. На чистовом этапе крыльчатки также обрабатываются по всем поверхностям. Точность и шероховатость поверхностей на этом этапе соответствуют требованиям чертежа, за исключением поверхностей лопастей и полков между ними. Окончательный этап обработки содержит операции по размерной доводке и полировке лопастей и полков между ними, а также притирке торцов, если к ним примыкают заборники. Припуск на полирование лопастей и полков обычно составляет 0,05...0,15 мм на сторону.

Примерный план обработки крыльчаток можно представить следующим образом.

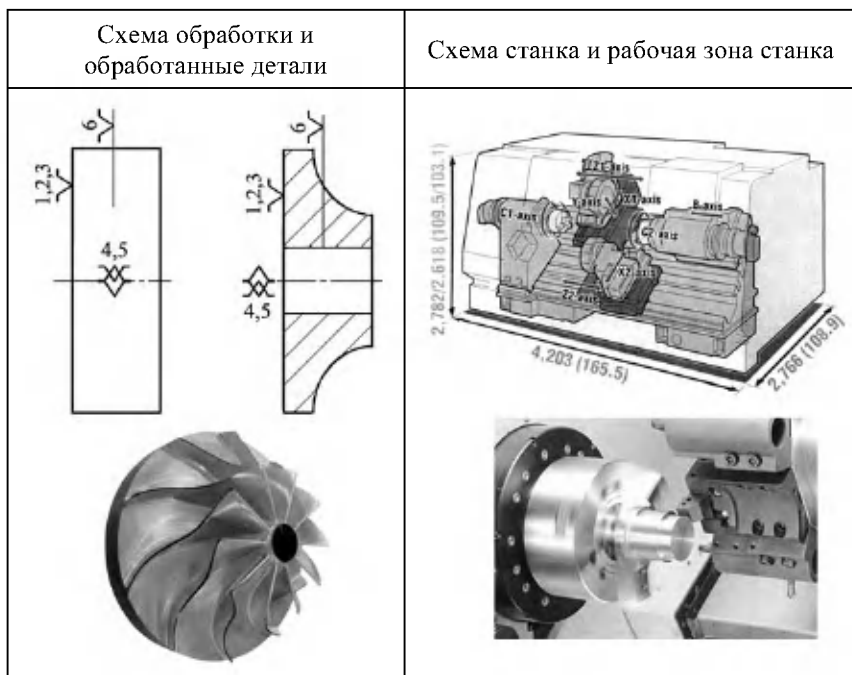


Рис. 13.21. Токарная обработка крыльчаток на многоцелевых станках

1. Обтачивание одного торца, сверление и растачивание центрального отверстия.
2. Обтачивание второго торца и наружной поверхности.
3. Сверление отверстий в ступице и развертывание одного из них для фиксации углового положения при последующих установках.
4. Прорезка впадин между лопастями.
5. Обработка спинки и корыта лопастей (фрезерование, электроэрозионная или электрохимическая обработка).
6. Обтачивание наружных и торцовых поверхностей (окончательное).
7. Зачистка и полирование лопастей и полок между лопастями.

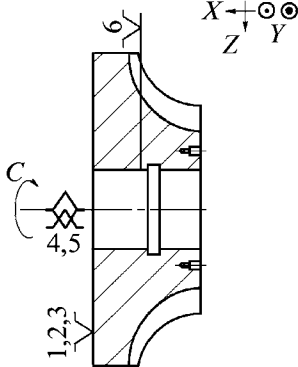
Схема обработки	Используемое оборудование
	Токарные станки с ЧПУ типа MDW-20S. В случае наличия крепежных отверстий – токарно-фрезерный центр фирмы "MAZAK" и типа INTEGRIX G-200/300/400 или INTEGRIX 1060. При больших габаритах и весе преимущество за станками с вертикальной осью вращения заготовки. Аналогичные станки выпускают фирмы: "INDEX", "DMG", "OKUMA", "MORI SEIKI" и др.

Рис. 13.22. Окончательная обработка посадочных (присоединительных) поверхностей

8. Сверление и зенкерование крепежных отверстий в ступице.
9. Статическая балансировка.
10. Окончательный контроль.

Обработка цилиндрических поверхностей, торцов и торцовых поверхностей лопастей крыльчаток выполняется на токарных, токарно-револьверных или токарно-карусельных станках, оснащенных системой ЧПУ, в частности, AT320, SPR-63, MDW-20S. Модель станка определяется типоразмером (диаметром) обрабатываемой детали (рис. 13.21, 13.22).

У открытых и полузакрытых крыльчаток на первой операции обычно обрабатываются отверстие и один торец. Заготовки в этом случае устанавливаются по наружной поверхности и второму торцу в трехлачковом самоцентрирующем патроне. На второй операции деталь устанавливают на обработанные торец и отверстие и обрабатывают наружный диаметр и необработанный торец.

Закрытые литые крыльчатки на первой операции устанавливают по поверхностям каналов. Крыльчатка устанавливается на три опоры входной частью каналов и поджимается ими к трем опорам, вводимым в выходные части каналов.

Наибольшую сложность при обработке крыльчаток представляет *обработка лопастей*, производимая обычно в *три этапа* – *черновой*, *чистовой* и *отделочный*.

Черновой этап обработки открытых и полузакрытых крыльчаток заключается в предварительной прорезке межлопастных каналов. У открытых крыльчаток это может быть выполнено сначала трубчатым зенкером или дисковой фрезой на фрезерном станке. Затем концевой фрезой на станке с ЧПУ за один–два прохода формируется профиль лопасти и оставляется припуск на полирование.

На современном уровне развития технологии обработку лопастей моноколес осуществляют фрезерованием на 5-координатных машинообрабатывающих центрах. Среди таких станков наибольшее распространение нашли станки Micron-710, "HERMLE" C600U, C800U, C1200U (вертикальное расположение шпинделя), "STARRAG" ZT-1000 / ZT-800 (горизонтальное расположение шпинделя) и др. (рис. 13.23). Модель станка определяется типоразмером (диаметром) обрабатываемой детали и ее массой. Применение таких станков обеспечивает не только необходимую для формирования поверхности лопасти траекторию перемещения инструмента, но и сохранение постоянной скорости резания.

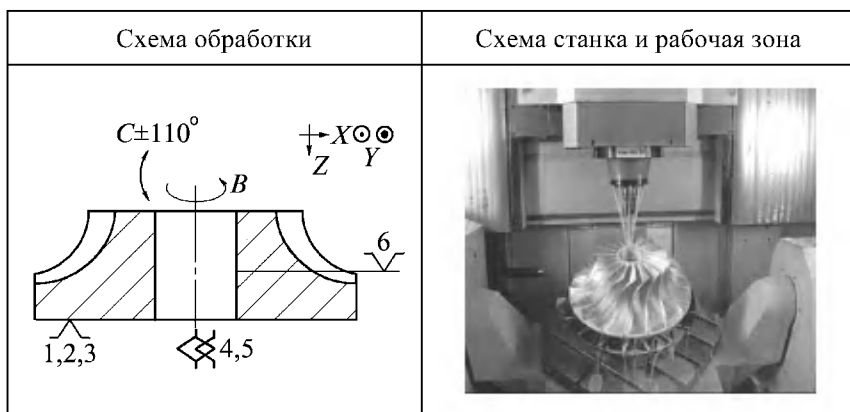


Рис. 13.23. Фрезерная обработка крыльчаток на многоцелевых станках

Межлопастные каналы полужакрытых крыльчаток сначала прорезают дисковыми фрезами, а затем также концевой фрезой на станке с ЧПУ формируется профиль лопасти с оставлением припуска под полирование. В зависимости от размеров крыльчатки, формы лопастей и программы выпуска *полирование может быть машинным, машинно-ручным и ручным.*

Машинное полирование осуществляется на специальных полировальных станках, машинно-ручное – на полировальных бабках или бесконечной абразивной лентой, движущейся с большой скоростью. Сложнопрофильные лопасти крыльчаток полируют войлочными или фетровыми кругами с помощью бормашинок или фортун.

13.9. ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Заготовки зубчатых колес получают ковкой в штампах под молотом, на горизонтально-ковочных машинах и на прессах. Исходным материалом для заготовок является круглый прутковый материал. Вид заготовки и метод ее получения определяется формой, размерами и программой выпуска детали. Наиболее производительным методом изготовления заготовок зубчатых колес является *высадка на горизонтально-ковочной* машине из нагретого конца длинного прутка. Наибольшая эффективность достигается тогда, когда отформованные заготовки отделяются от прутка не обрубкой, а высадкой сквозного отверстия. Для этого необходимо, чтобы наименьший диаметр отверстия в заготовке был равен или больше наружного диаметра прутка первичной заготовки.

Для снижения затрат на механическую обработку и увеличения прочности зуба иногда заготовки штампуют или получают горячим накатыванием с формообразованием зубьев.

Горячее накатывание зубьев на стальных заготовках производится накатниками при совместном вращении. Заготовки поступают в механический цех нормализованными со снятой окалиной. Припуски на обработку обычно укладываются в 3...6 мм на диаметр, но в заготовках из азотируемых сталей для гарантированного

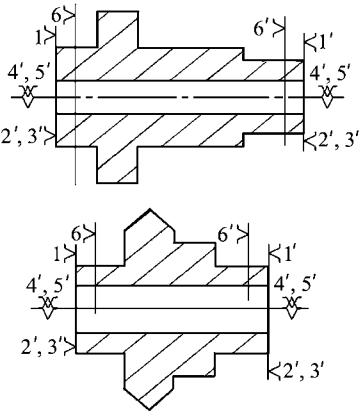
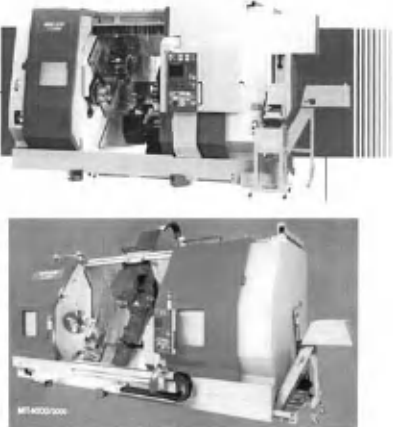
Схема обработки	Используемое оборудование
	 Обрабатывающий центр фирмы "MORI SEIKI"

Рис. 13.24. Черновая обработка зубчатых колес

снятия обезуглероженного поверхностного слоя, снижающего качество азотирования, припуски увеличивают на 2...3 мм.

Механическая обработка зубчатых колес делится на три этапа: черновой, чистовой и отделочный. Черновой этап включает обдирочные операции, на которых снимается до 60...70 % припуска на обработку. На этом этапе выравниваются припуски на дальнейшую обработку и удаляются поверхностные дефекты. Обработкой до нарезания зубьев колесам придают заданную чертежом форму, уделяя особое внимание точности расположения поверхностей.

В зависимости от программы выпуска, формы и размеров колес их обрабатывают до нарезания зубьев на токарных, токарно-

револьверных, токарных многорезцовых станках, а также на многошпиндельных полуавтоматах и автоматах. В серийном производстве мелкие и средние зубчатые колеса чаще обрабатывают на токарно-револьверных станках, а также на токарных станках с ЧПУ. Установочные базы зубчатых колес, отверстия или наружные цилиндрические поверхности хвостовиков обрабатывают под зуборезные операции шлифованием с высокой точностью. Иногда небольшие отверстия обрабатывают протяжками или развертками. Для достижения более точной установки колеса на зуборезной операции опорный торец и цилиндрическую базовую поверхность часто обрабатывают за один установ.

На рис. 13.24 представлена двухсторонняя обработка зубчатых колес на одном станке с противושпинделями, например, фирмы "INDEX" мод. G200/300; фирмы "TRAUB" мод. TNC 16/32, фирмы "MAZAK" мод. MACTURN RIX G200/300, фирмы "OKUMA" мод. MACTURN 250/350, фирмы "MORI SEIKI" модели ZT. Обработка первой стороны: базы 1, 2, 3, 4, 5, 6; обработка второй стороны: базы 1', 2', 3', 4', 5', 6'. Отличительной чертой данных станков является наличие фрезерной головки, позволяющей работать приводным инструментом. Использование данного оборудования позволяет снизить трудоемкость за счет объединения токарных и фрезерных операций на 30...50 %.

На *чистовом этапе* снимается около 30 % припуска и детали придается окончательная форма, при этом, как правило, используются те же самые станки, что и на черновой обработке. Модель станка определяется типоразмером детали. В чистовой этап входят и операции зубонарезания (рис. 13.25).

Отделочный этап включает операции, обеспечивающие заданную точность и шероховатость рабочих поверхностей. На рис. 13.26 представлены две схемы шлифования зубчатых колес, разработанные фирмой "ERLICON" для станка модели Oral-80 и фирмой "КЛИНГЕЛЬБЕРГ" для станка модели G-20. Данное оборудование позволяет изготавливать шестерни 4-й степени точности.

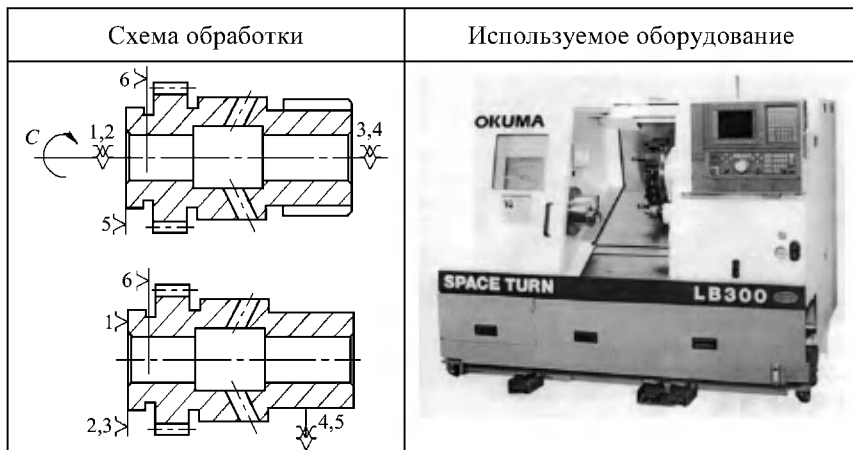


Рис. 13.25. Чистовая обработка зубчатых колес

Последовательность операций внутри каждого этапа определяется выбором технологических баз. В качестве таковых принимают наружные и внутренние цилиндрические поверхности и торцы. В некоторых случаях колеса устанавливают по профилю зуба на шарики, ролики или зубчатые сектора. Так поступают для обработки посадочных цилиндрических поверхностей для исправления их положения относительно зубчатого венца после термообработки, особенно в случае использования их в качестве технологических баз для окончательной обработки зуба.

При шлифовании зубьев методом обката абразивный круг или два круга воспроизводят один зуб рейки, по которому обкатывается впадина колеса. Особенность станков, работающих одним кругом, заключается в том, что вначале шлифуют одну сторону всех зубьев, а затем, после переналадки станка, – другую сторону. Из-за сложности переналадки для шлифования другой стороны зуба целесообразно на эту операцию наладить второй такой же станок. На станках, работающих без продольной подачи круга, основание впадины зуба, обработанное образующей шлифовального круга, получается вогнутым. Однако при большом диаметре круга

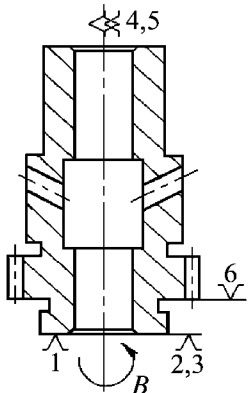
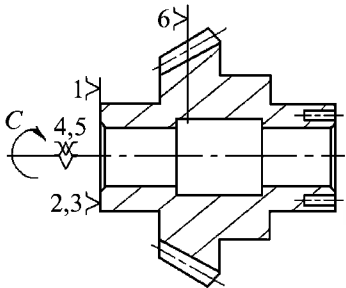
Схема обработки	Используемое оборудование
 Схема обработки фирмы "ERLICON"	 Зубошлифовальный станок с ЧПУ фирмы "ERLICON" мод. Opal-80
 Схема обработки фирмы "КЛИНГЕЛЬБЕРГ"	

**Рис. 13.26. Отделочные операции обработки
зубчатых колес**

и малой ширине зубчатого венца указанная вогнутость практического значения не имеет и в дальнейшем не исправляется.

Примерный план обработки цементируемых зубчатых колес:

- 1) термообработка заготовки – нормализация;
- 2) черновой этап: подрезка торца и растачивание отверстия, подрезка другого торца и обтачивание верха;
- 3) чистовой этап: протачивание торца и растачивание отверстия, растачивание или шлифование отверстия и опорного торца за один установ, шлифование другого торца, обтачивание верха, ступицы и обода с внутренней стороны, обработка облегчающих отверстий и выемок, нарезание зубьев и их зачистка;
- 4) меднение нецементируемых поверхностей;
- 5) цементация, закалка и отпуск;
- 6) окончательный этап: шлифование отверстия или поверхности хвостовика, протачивание поверхностей под шлицы и резьбы, нарезание шлицев и резьб, шлифование зубьев, слесарная зачистка;
- 7) окончательный контроль (иногда перед окончательным контролем вводят низкий отпуск с целью снятия остаточных напряжений, возникших при механической обработке).

13.10. ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ КАМЕР СГОРАНИЯ (ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК, РАСПЫЛИТЕЛЕЙ, ЗАВИХРИТЕЛЕЙ)

Топливные форсунки, применяемые в жидкостных и турбореактивных двигателях, по принципу действия разделяются на струйные, центробежные и комбинированные. Конструкция их весьма разнообразна и зависит от вида топлива и конструктивных особенностей двигателя (рис. 13.27). Для несамовоспламеняющихся компонентов топлива обычно применяются центробежные форсунки, для самовоспламеняющегося топлива – струйные форсунки с отверстиям, выполненными под углом, в которых распыление компонентов топлива происходит в виде соударяющихся струй.

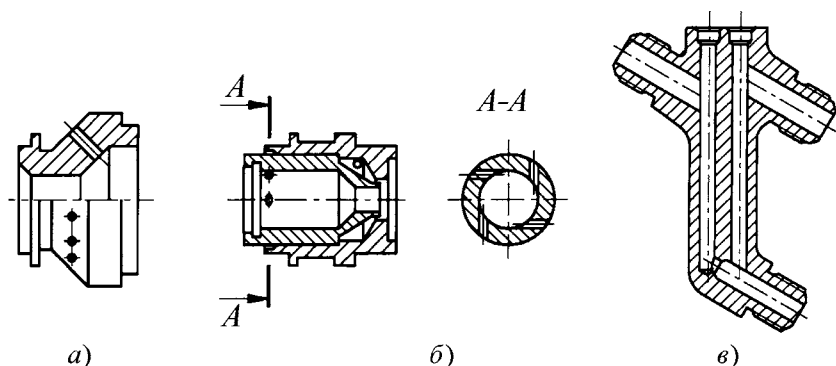


Рис. 13.27. Детали камер сгорания:

а – струйный распылитель; *б* – центробежный распылитель;
в – корпус форсунки

По техническим условиям форсунки должны обеспечивать необходимую для полного сгорания топлива дисперсность и однородность распыла, заданную форму и дальность факела распыла и требуемую норму расхода топлива, проходящего через форсунку при определенном давлении. В собранном виде форсунки должны быть взаимозаменяемы. Для выполнения этих требований детали форсунок изготавливают с высокой степенью точности. Каждая форсунка в отдельности проверяется на пропускную способность и равномерность распыла топлива по поперечному сечению конуса, на угол и качество распыла топлива.

В условиях серийного производства высокая точность изготовления деталей распылителя обеспечивается доводочными операциями, при этом наибольшую сложность представляет доводка форсунок до заданной нормы расхода топлива. Эта трудоемкая операция сопровождается не менее трудоемкими многократными испытаниями и переборкой форсунок.

Построение рационального процесса изготовления форсунок во многом зависит от уровня механизации и автоматизации доводочных операций. При этом точность предшествующей обработки

деталей форсунок оказывает существенное влияние на трудоемкость и качество доводочных операций.

Корпус форсунки является промежуточным звеном, связывающим штуцер трубопровода подачи топлива с распылителем. Он имеет сложную конструктивную форму с двумя параллельными каналами для подачи горючего и работает под высоким давлением. Корпуса форсунок испытываются на герметичность. Детали распылителей форсунок изготавливаются преимущественно из прутка марок ХВГ, Х18Н9Т, Х12, ШХ15. Для изготовления корпусов форсунок применяют стали 20, 38Х и др. с последующим покрытием жаропрочными эмалями, а также жаропрочные сплавы ЖСЗ, ЭИ417 и др.

Детали форсунок, за исключением корпусов рабочих форсунок, по своей форме и размерам преимущественно относятся к классу **автоматно-револьверных деталей**. Большинство этих деталей изготавливаются из пруткового материала на токарных автоматах и револьверных станках повышенной точности. *Характерной особенностью технологии изготовления форсунок* является процесс обработки точных отверстий малого диаметра. От точности изготовления этих отверстий, особенно в многоструйных форсунках с отверстиями под углом, зависят их качественные параметры – заданный расход и однородность полей концентрации топлива в камере сгорания. Помимо высокой точности диаметров тангенциальных отверстий, необходимо, чтобы выход этих отверстий располагался строго по касательной к образующей поверхности центрального отверстия.

Корпусы **форсунок цельной конструкции** изготавливают из штампованных или литых заготовок. Изготовление корпуса форсунки начинают с обработки конструкторских баз, т.е. поверхностей, по которым форсунка устанавливается в двигателе. Обработку выполняют на токарных станках, устанавливая деталь по обрабатываемым поверхностям в патроне со специальными кулачками или в специальном приспособлении. Вся дальнейшая обработка осуществляется при установке форсунки по конструкторским базам.

Сверление и зенкерование отверстий во фланце корпуса выполняют на сверлильном станке по кондуктору. Сверление глубоких отверстий в корпусе форсунки является наиболее трудоемкой операцией и может выполняться либо по кондуктору на сверлильном станке, либо на револьверном станке в специальном приспособлении. На револьверном станке обеспечивается меньший уход сверла и легче обеспечивается требуемая параллельность отверстий.

Обработка штупцеров корпуса форсунки состоит из большого количества переходов: обтачивания наружной поверхности, сверления и зенкерования отверстия и нарезания резьбы. Эти операции выполняются обычно на револьверных станках в специальных приспособлениях. Для обработки каждого штупцера обычно приходится изготавливать свое приспособление. Точность размеров отверстия в штупцере обеспечивается зенкерованием и развертыванием. Резьбы нарезаются резьбонарезной головкой и калибруются плашкой.

Наружные и внутренние поверхности деталей дозирующего пакета форсунок обрабатывают на прецизионных токарных и токарно-револьверных станках, обеспечивающих при правильной настройке высокий класс точности, оставляя припуск на шлифование 0,2...0,3 мм. После термической обработки наружные центрирующие и торцовые поверхности шлифуют, оставляя припуск на притирку (доводку) торцов порядка 0,02 мм на сторону. Наружную поверхность деталей шлифуют на круглошлифовальном станке одновременно у нескольких штук деталей. Детали устанавливают на специальную оправку и фиксируют по одному из отверстий. Торцы деталей шлифуются на специальной магнитной плите плоскошлифовального станка, в которой предусмотрены посадочные отверстия для установки деталей по наружной цилиндрической поверхности, что обеспечивает перпендикулярность образующей к торцу.

Проходные отверстия в деталях дозирующего пакета (тангенциальные и с параллельными осями) обрабатываются на сверлильном станке или прошиваются электроэрозионной обработкой по кондуктору. При сверлении тангенциальных и косых отверстий

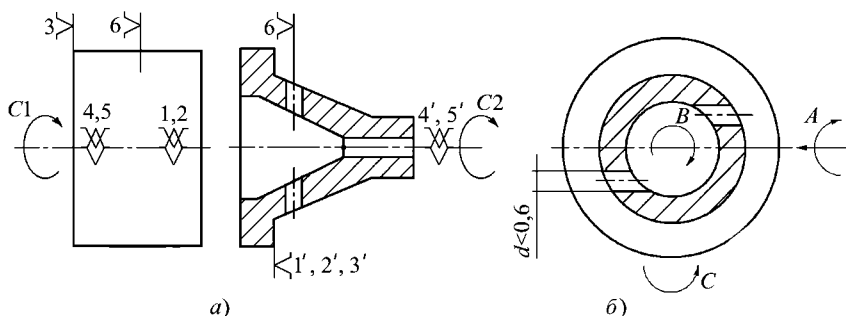


Рис. 13.28. Обработка топливных форсунок ГТД:

а – черновое и чистовое точение; *б* – электроэрозионная обработка

кондукторная втулка своим скошенным торцом должна плотно прилегать к поверхности обрабатываемой детали, обеспечивая тем самым необходимое направление сверла и предохраняя от поломки. Сверление отверстий производится до термообработки. Применение электроэрозионной обработки не требует плотного прилегания торца кондукторной втулки к поверхности детали и позволяет обрабатывать отверстия как до, так и после термообработки. Плоскости торцов деталей доводятся после термообработки притиркой на чугунном притире.

На рис. 13.28 представлено точение форсунки из прутка с перехватом в противопиндель и обработкой с противоположной стороны, которое осуществляется на токарном центре фирмы "TRAUB" мод. TNK-36 или фирмы "MAZAK" MULTIPLEX 6100/6200. Для обработки отверстий с невысоким требованием к точности применяется станок фирмы "SODIK". Для обработки прецизионных отверстий – станки фирмы "AGIA". Станок оснащен глобусным столом (координаты *С* и *В*) для прожига отверстий под углом и расположенных по диаметру детали. Кроме того, инструмент имеет возможность планетарного движения вокруг оси отверстия. Обязательна внутренняя прокачка рабочей жидкости через электрод.

13.11. ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ КОРПУСОВ (КОРПУСА, КРЫШКИ, РЫЧАГИ)

Корпусные детали двигателей и агрегатов отличаются многообразием форм и применяемых материалов. При сложности формы к их изготовлению предъявляются высокие требования в отношении точности размеров, взаимного расположения поверхностей, герметичности и прочности. *По конструктивно-технологическим признакам корпусные детали можно условно разделить на следующие группы.*

В первую группу входят сложные изделия цилиндрической формы со значительными габаритными размерами по диаметру и длине. По конструкции они бывают цельные и разъемные, сварные, литые и комбинированные. Чаще всего они состоят из отдельных секций, которые соединяются между собой в разъемных корпусах болтами, а в неразъемных – сваркой. Сюда относятся малоответственные оболочки, изготавливаемые из тонкого листового материала методом вытяжки, гибки и сварки, корпусные тонкостенные отливки из алюминиевых и магниевых сплавов кольцевого типа, цельные или сборные, а также корпусные детали из нержавеющей, теплостойких и жаропрочных сплавов, изготавливаемые из поковок, профилированных кольцевых заготовок и листовых материалов.

Корпусные детали **второй группы** в различных конструкциях двигателей выполняются литыми или из штампованных заготовок, а также сварными. Их отличает высокая точность обработки отверстий под подшипники и посадочных поясков.

Корпусные детали **третьей группы** характеризуются наличием фасонных поверхностей аэродинамического профиля. В большинстве конструкций они выполняются в виде сварных изделий или отливаются.

Корпусные детали **четвертой группы** весьма разнообразны по конструктивным формам и размерам. Наряду с точными отверстиями (под вращающиеся детали), в корпусах имеется большое количество каналов и крепежных резьбовых отверстий. Корпусы коробчатого типа чаще всего выполняются разъемными, состоя-

щими из корпуса и крышки. Большинство из них литые из алюминиевых или магниевых сплавов. Детали этой группы, работающие при внутреннем давлении жидкости или газа, подвергаются гидро- или пневмоиспытаниям под давлением в полтора-два раза выше рабочего.

Пятая группа объединяет мелкие корпусные детали различных агрегатов. Большинство поверхностей деталей этой группы подвергается механической обработке с высокой степенью точности.

Широкое применение при обработке корпусных деталей находят станки с числовым программным управлением. Применение этих станков позволяет повысить производительность труда и снизить затраты на изготовление технологической оснастки. Операции, выполняемые на этих станках, носят концентрированный характер и состоят из большого количества трудоемких переходов.

Построение технологического процесса изготовления корпусных деталей определяется конструктивно-технологическими особенностями перечисленных выше групп деталей.

Первые три группы крупногабаритных деталей представляют собой главным образом тонкостенные тела вращения, склонные к различного рода деформациям (особенно в радиальном направлении) как от усилий резания, так и от температурных и остаточных напряжений. Основная проблема механической обработки таких деталей связана с трудностью получения точных геометрических форм и размеров, обеспечивающих правильную сборку и стыковку отдельных секций. Последняя особенно затрудняется при изготовлении сварных изделий, коробление которых происходит не только при сварке и механической обработке, но и при транспортировке и хранении. Обработку таких корпусов целесообразнее всего производить на станках токарной группы (карусельных, лобовых) с установкой на центральное отверстие или посадочный наружный пояс. Закрепление детали при установке обычно осуществляют прихватами по торцевым поверхностям фланца. Технологические процессы изготовления корпусных деталей такого типа близки по структуре и применяемым приемам к технологическим процессам изготовления кольцевых деталей.

Построение технологических процессов изготовления корпусных деталей четвертой и пятой групп отличается большим многообразием. В основу построения технологического процесса обработки деталей этого типа обычно закладывается идея типизации технологических процессов.

Рациональное построение процесса обработки корпусных деталей во многом зависит от правильности выбора первичных технологических баз. Вид исходной заготовки и метод ее получения имеют при этом решающее значение. В качестве первичных баз следует стремиться использовать поверхности, остающиеся необработанными у окончательно готовой детали. В этом случае удастся достичь наиболее точного взаимного расположения обработанных и необработанных поверхностей.

Широкое применение при обработке корпусных деталей находят станки с числовым программным управлением. Применение этих станков позволяет повысить производительность труда и снизить затраты на изготовление технологической оснастки. Операции, выполняемые на этих станках, носят концентрированный характер и состоят из большого количества трудоемких переходов.

Целью предварительной обработки литых корпусов коробчатой формы с параллельными и пересекающимися осями отверстий является создание технологических баз для обработки. Для того, чтобы исключить дорогостоящую операцию разметки, в литой заготовке предусматривают специальные базовые поверхности, относительно которых в литье координируют все размеры заготовки. Как правило, эти поверхности являются первичными базами при механической обработке. Поэтому первичные базовые поверхности согласуются с технологией механической обработки и указываются на чертеже литой заготовки. При выборе базовых поверхностей учитывают сложность конструкции станочных приспособлений для выполнения первой операции механической обработки, возможность обеспечения требуемой точности взаимного расположения обрабатываемых поверхностей и равномерного распределения припусков на обработку. Для подготовки базовых поверхностей от литейных баз (разметки) используют вертикально-

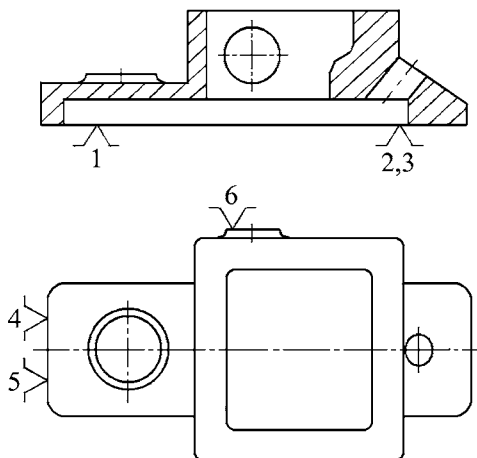


Рис. 13.29. Подготовка базовых поверхностей от литейных баз (разметка)

фрезерные станки, модель станка определяется размерами детали (схема базирования представлена на рис. 13.29).

Одной из существенных особенностей изготовления корпусных деталей коробчатой формы (корпус редуктора, насоса, коробки приводов и т. п.) является одновременная обработка не одной, а группы поверхностей, связанных между собой точными размерами взаимного расположения. В связи с этим необходимо стремиться к такому построению технологического процесса, при котором, по крайней мере, поверхности каждой группы обрабатывались бы за один установ. Для этих целей наиболее целесообразно применение многоинструментальных координатно-расточных станков с ЧПУ, например, фирмы "MITSUBISI XEВИ" модели HT 60Z и 80Z.

При обработке мелких и средних корпусных деталей в большинстве случаев оказывается целесообразным применять токарные и револьверные станки. Благодаря малым габаритам и весу переустановка таких деталей обычно не вызывает трудностей. При обработке таких корпусов легче совместить технологические и конструкторские базы, чем при обработке крупных деталей.

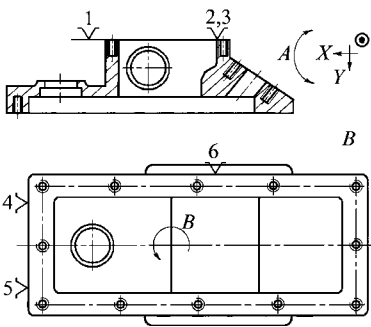
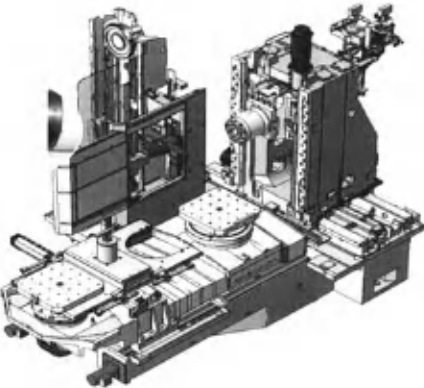
Схема обработки	Используемое оборудование
	 Фрезерный машинный обрабатывающий центр

Рис. 13.30. Чистовая и отделочная обработка корпусных деталей ГТД

При изготовлении корпусов коробчатой формы широкое применение находят приспособления-спутники, позволяющие за один установ детали обработать практически все наиболее точные поверхности детали.

Обработка **мелких корпусных деталей** типа корпуса клапана обычно осуществляется на токарно-револьверных станках с горизонтальной или вертикальной осями револьверных головок, а также на станках, оснащенных системами ЧПУ. Для установки детали обычно применяют приспособления, позволяющие совместить оси обрабатываемых цилиндрических поверхностей с осью вращения шпинделя станка.

Для чистовой обработки корпусных деталей всех типов используется фрезерный машинообрабатывающий центр со сменщиком палет (минимум двухпалатный) фирмы "МАНО" типа DMC50 U или "STARRAG" – HECKERT CW 400 с 5 управляемыми координатами (рис. 13.30).

13.12. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРНЫХ КОРПУСОВ СТАТОРА

В реактивных двигателях многие детали и сборочные единицы выполнены из листового материала. К их числу относятся: камеры сгорания, сопловые аппараты, лопатки, различные патрубки, баки, эжекторы, сопла и т.д. Особенность таких сборочных единиц заключается в том, что они представляют собой неразъемные конструкции. Отдельные детали, полученные в большинстве случаев штамповкой, соединяют между собой посредством сварки или пайки.

Технические условия на изделия из листового материала включают требования в отношении точности формы и размеров, качества поверхности и покрытий, качества сварных и паяных швов, а также герметичности.

Требования в отношении герметичности предъявляют только в тех случаях, когда конструкции работают в условиях высоких давлений или служат для вмещения жидкости. Как правило, их подвергают гидроиспытаниям под давлением на 50...100 % выше рабочего.

При выборе материала принимают во внимание рабочие нагрузки и температурные условия, в которых работают детали, а также назначение и срок службы двигателя.

Для авиационных двигателей, рассчитанных на длительную эксплуатацию, теплонапряженные детали изготавливают из жаропрочных сплавов и сталей типа ЭИ435, ЭИ696, 1Х18Н9Т и др. Детали тех же двигателей, но работающие в условиях невысоких температур, изготавливают из конструкционных сталей, алюминиевых, магниевых и титановых сплавов.

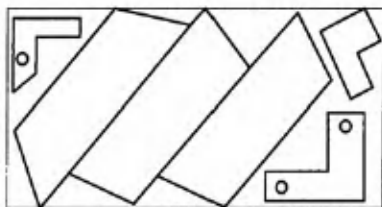


Рис. 13.31. Схема раскроя листа и установка лазерного раскроя фирмы "BYSTRONIC"

Листы нормальных размеров перед вырубкой или вырезкой плоских заготовок раскраивают и далее разрезают на лазерных установках. Листы иногда раскраивают на заготовки нескольких различных деталей одинаковой толщины, это позволяет наиболее выгодно использовать площадь листа.

Наиболее сложным является технологический процесс изготовления элементов конструкций типа оболочек, требующий применения *операций штамповки-вытяжки*. Примерный план изготовления таких деталей можно представить следующим образом:

- 1) разрезка материала (см. рис. 13.31);
- 2) подготовка материала к вырубке или вырезке плоских заготовок (смазка полос маслом);
- 3) вырубка или вырезка плоских заготовок;
- 4) подготовка плоских заготовок к вытяжке или гибке;
- 5) операции формообразования (вытяжка или гибка);
- 6) механическая обработка деталей перед сваркой или пайкой;
- 7) обработка отверстий, углублений и т.д.;
- 8) сборка деталей под сварку или пайку;
- 9) сварка или пайка;

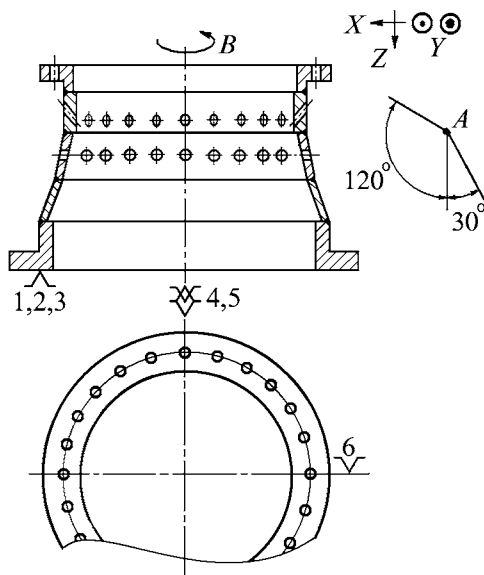


Рис. 13.32. Схема обработки сварных корпусов статора после сварки или пайки

10) механическая обработка после сварки или пайки (рис. 13.32);

11) покрытие или окрашивание поверхностей.

Соотношение между размерами и формой детали не всегда позволяют ограничиться одной операцией вытяжки или гибки. Чаще всего такие операции приходится проводить неоднократно, завершая их окончательным формованием (калибровкой), причем после каждой вытяжки или гибки, так же, как и после сварки, необходимо производить термообработку, чтобы снять внутренние напряжения, образовавшиеся при выполнении предыдущих операций.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Технология** обработки конструкционных материалов / П.Г. Петруха, А.И. Марков, П.Д. Беспяхотный и др.; Под ред. П.Г. Петрухи. М.: Высшая школа, 1991. 512 с.
2. **Металлорежущие** станки: Учебник для машиностроительных вузов / Под ред. В.Э. Пуша. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
3. **Проектирование** металлорежущих станков и станочных систем: Справочник-учебник / Под общ. ред. А.С. Проникова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение, 1994. 444 с.
4. **Технологические** основы обеспечения качества машин / К.С. Колесников, Г.Ф. Баландин, А.М. Дальский и др.; Под общ. ред. К.С. Колесникова. М.: Машиностроение, 1990. 256 с.
5. **Технология** производства двигателей летательных аппаратов / М.И. Евстигнеев, А.В. Подзей, А.М. Сулима.; Под общ. ред. А.В. Подзея. М.: Машиностроение, 1982. 260 с.
6. **Подураев В.Н.** Технология физико-химических методов обработки. М.: Машиностроение, 1985. 263 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	5
1.1. Основные понятия, определения и элементы процесса резания	5
1.2. Инструментальные материалы для изготовления режущих инструментов	14
1.2.1. Инструментальные стали	14
1.2.2. Твердые сплавы	16
1.2.3. Минералокерамика	18
1.2.4. Сверхтвердые материалы	18
1.3. Процесс стружкообразования при резании материалов	19
1.4. Силы резания	25
1.5. Нарост и его характеристики. Влияние нароста на процесс резания	29

1.6. Тепловые процессы при резании металлов . . .	31
1.7. Износ инструмента	37
1.8. Смазочно-охлаждающие технологические среды при резании материалов	39
1.9. Качество обработанной поверхности при резании	42
1.10. Обрабатываемость резанием материалов, применяемых в авиадвигателестроении	45
 Глава 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	 51
2.1. Классификация и основные технико-экономические характеристики станков	52
2.2. Кинематика и структура металлорежущих станков	62
2.3. Основные узлы и механизмы металлорежущих станков	73
2.4. Принципы управления металлорежущими станками	91
2.5. Конструкция и характеристика работы основных групп металлорежущих станков	99
2.5.1. Токарные станки	99
2.5.2. Фрезерные станки	118

2.5.3. Сверлильные и расточные станки	120
2.5.4. Шлифовальные станки	125
2.5.5. Зубообрабатывающие станки	133
2.5.6. Протяжные станки	137
 Глава 3. ОБРАБОТКА НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНО- СТЕЙ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ	 140
3.1. Обработка наружных поверхностей тел вращения точением	141
3.2. Фрезерование наружных поверхностей тел враще- ния	145
3.3. Протягивание наружных поверхностей тел вра- щения	146
3.4. Шлифование наружных поверхностей тел враще- ния	147
3.4.1. Обработка шлифовальными кругами	147
3.4.2. Ленточное шлифование	149
3.5. Отделочные методы обработки наружных по- верхностей тел вращения	150
3.6. Упрочняющие методы обработки наружных поверхностей тел вращения	154

Глава 4. ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ	156
4.1. Виды отверстий и методы их получения	156
4.2. Обработка отверстий сверлением, зенкерованием, развертыванием	157
4.2.1. Назначение и основные типы сверл, зенкоров и разверток	161
4.2.2. Обработка отверстий комбинированным инструментом	168
4.3. Растачивание отверстий	169
4.4. Протягивание отверстий	172
4.5. Обработка отверстий абразивным инструментом	177
4.5.1. Шлифование отверстий	177
4.5.2. Отделочные методы абразивной обработки	181
4.6. Обработка глубоких отверстий	187
4.7. Обработка отверстий в труднообрабатываемых материалах физико-химическими методами	195
 Глава 5. ОБРАБОТКА ПЛОСКИХ И ЛИНЕЙЧАТЫХ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	 198
5.1. Обработка плоских поверхностей строганием и долблением	198

5.2. Обработка плоских поверхностей фрезеровани- ем	204
5.3. Обработка плоских поверхностей протягива- нием	208
5.4. Обработка плоских поверхностей шлифованием	213
5.5. Обработка плоских поверхностей притиркой, полированием и шабрением	216
 Глава 6. ОБРАБОТКА ФАСОННЫХ ПОВЕРХНО- СТЕЙ	 220
6.1. Обработка конических поверхностей	221
6.2. Обработка сферических поверхностей	225
6.3. Обработка поверхностей вращения произволь- ного профиля	228
6.4. Обработка линейчатых фасонных поверхностей	231
6.5. Обработка сложных пространственных поверх- ностей	235
 Глава 7. ОБРАБОТКА РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНО- СТЕЙ	 251
7.1. Виды резьб	251
7.2. Нарезание резьбы резцами и гребенками	251

7.3. Вихревое нарезание резьбы	254
7.4. Нарезание резьбы метчиками и плашками	255
7.5. Фрезерование резьбы	258
7.6. Шлифование резьбы	259
7.7. Накатывание резьбы	260
 Глава 8. ОБРАБОТКА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ШЛИЦЕВ	 263
8.1. Основные виды зубчатых передач и их назначение	263
8.2. Особенности авиационных зубчатых передач ..	265
8.3. Методы обработки зубчатых колес	267
8.3.1. Общие вопросы технологии	267
8.3.2. Методы формообразования поверхностей зубьев зубчатых колес	268
8.4. Изготовление цилиндрических зубчатых колес	271
8.4.1. Методы предварительного формообразования цилиндрических зубчатых колес	272
8.4.2. Методы чистовой обработки цилиндрических зубчатых колес	279

8.4.3. Особенности обработки конических зубчатых колес	289
8.5. Обработка шлицевых соединений	296
8.6. Прогрессивные и специальные методы чистой обработки зубчатых колес	299
8.6.1. Профильное шлифование наружных и внутренних венцов методом копирования однослойным эльборовым инструментом	299
8.6.2. Глубинное шлифование эвольвентных зубчатых колес со специальной формой зуба	301
8.6.3. Зубохонингование зубчатыми хонами с внутренним зацеплением	306
8.6.4. Методы обработки профилей зубьев закрытых венцов двухвенцовых цилиндрических зубчатых колес	308
 Глава 9. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРЕССИВНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ	 312
9.1. Общие положения при разработке прогрессивных техпроцессов изготовления ответственных деталей ГТД	312

9.2. Глубинное шлифование	313
9.3. Изготовление турбинных лопаток ГТД	327
9.4. Изготовление компрессорных лопаток ГТД ..	338
9.5. Изготовление сопловых лопаток	347
9.6. Изготовление дисков турбин ГТД	351
9.7. Изготовление зубчатых колес	358
 Глава 10. ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ В ТЕХПРО- ЦЕССАХ НА ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ. МЕТО- ДЫ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ МАТЕРИАЛОВ, КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ЕГО ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ	 366
10.1. Виды дефектов. Причины их возникновения	366
10.2. Методы контроля дефектов материалов де- талей	370
10.3. Роль технологии изготовления в формирова- нии механических свойств и структуры материала	372
10.4. Специфические особенности появления по- вреждений деталей ГТД при высоких температу- рах	376
10.5. Влияние технологических условий обработ- ки на эксплуатационные свойства деталей авиа- ционных двигателей	379

10.6. Виды поэтапного контроля качества ГТД . . .	385
10.7. Методы контроля эксплуатационных свойств материалов	387
10.7.1. Методы контроля высокотемператур- ной прочности	387
10.7.2. Контроль усталостной прочности . . .	390
 Глава 11. ЭЛЕКТРОФИЗИКОХИМИЧЕСКИЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ	 394
11.1. Классификация физико-химических методов обработки	396
11.2. Электрохимические методы обработки	400
11.2.1. Сущность метода ЭХО, основные по- нятия и определения	400
11.2.2. Реализация процесса ЭХО	410
11.2.3. Электрохимическое шлифование . . .	416
11.3. Электроэрозионная обработка	427
11.3.1. Механизм образования эрозионной лунки	428
11.3.2. Регулирование межэлектродного про- межутка	435

11.3.3. Прецизионная обработка непрофилированным электродом-проволокой	437
11.4. Ультразвуковая обработка	448
11.5. Лучевые методы обработки	450
11.6. Комбинированные методы обработки	452
11.7. Совмещенные методы обработки	455
 Глава 12. УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОСРЕДСТВОМ ВЫБОРА МЕТОДА ОБРАБОТКИ	 456
 12.1. Параметры качества поверхностного слоя и их связь с методами обработки	 456
12.2. Качество поверхностного слоя после электрохимической обработки	460
12.3. Качество поверхностного слоя после электроэрозионной обработки	461
12.4. Технологические методы упрочнения поверхностей пластическим деформированием	464
12.4.1. Вибрационный метод обработки ППД	466
12.4.2. Струйно-ударные методы ППД	468

12.4.3. Алмазное выглаживание	470
12.4.4. Турбоабразивная обработка	472
 Глава 13. ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОС- НОВНЫХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ОС- ВОЕННЫЕ В ОТЕЧЕСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТ- ВЕ НА ОБОРУДОВАНИИ ЗАРУБЕЖНЫХ ФИРМ ..	 475
 13.1. Технология изготовления валов турбины и компрессора	 475
13.2. Технология изготовления дисков компрессо- ров и турбин	480
13.3. Технологические операции изготовления ба- зовых поверхностей лопаток	487
13.4. Технологические операции изготовления профиля пера лопаток	489
13.5. Технологические операции изготовления зам- ковой части лопаток	492
13.6. Технология безразмерной полировки пера ло- паток	494
13.7. Технология изготовления рабочих и сопловых лопаток турбины	498

13.8. Технология изготовления моноколес (крыльчаток)	503
13.9. Технология обработки зубчатых колес	508
13.10. Технология обработки деталей камер сгорания (топливных форсунок, распылителей, завихрителей)	513
13.11. Технология обработки корпусов (корпуса, крышки, рычаги)	518
13.12. Технология сварных корпусов статора	523
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	526

Учебное издание

**Безъязычный Вячеслав Феоктистович,
Кузменко Михаил Леонидович,
Крылов Владимир Николаевич и др.**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ**

Редактор *И.В. Синцова*
Художественный редактор *Т.Н. Галицына*
Технический редактор *Г.Ю. Корабельникова*
Корректор *М.Я. Барская*

Сдано в набор 15.08.2006 г. Подписано в печать 14.12.2006 г.
Формат 60×88 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 33,32. Уч.-изд. л. 33,58.
Тираж 1000 экз. Заказ

Ордена Трудового Красного Знамени
ОАО "Издательство "Машиностроение",
107076, Москва, Стромывнский пер., 4.
www.mashin.ru

Оригинал-макет изготовлен в ООО "Издательство Машиностроение-1"

Отпечатано в ГУП ППП "Типография "Наука" РАН,
121099, Москва, Шубинский пер., 6

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК
