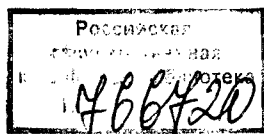


ББК 39.55-06-1я-73
О-75
УДК 621.45.002(075.8)

Федеральная целевая программа книгоиздания России



Авторы: А. М. Сулима, А. А. Носков, А. В. Подзей, Г. З. Серебренников.

Рецензенты: кафедра производства двигателей летательных аппаратов САЭКУ и проф. Л. А. Хворостухин

Основы технологии производства воздушно-реактивных двигателей. Учебник для студентов авиационных специальностей вузов/А. М. Сулима, А. А. Носков, А. В. Подзей и др. – М.: Машиностроение, 1993 – 312 с.: ил.

ISBN 5-217-01337-0

Изложены теоретические основы технологии машиностроения – базирование, точность обработки, поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей, технологические методы обеспечения параметров поверхностного слоя для заданных условий эксплуатации. Приведена методика проектирования технологических процессов (ТП) механической обработки и САПР ТП. Описаны методы лезвийной, абразивной и физико-химической обработки поверхностей деталей. Рассмотрены существующие и перспективные технологические процессы изготовления основных деталей авиационных газотурбинных двигателей.

О 2705140400-427 115-91
038(01)-93

ББК 39.55-06-1я-73

ISBN 5-217-01337-0

© А. М. Сулима, А. А. Носков,
А. В. Подзей и др., 1993

Основные условные обозначения

V – скорость резания, м/мин; м/с
 S_o, S_m – подача, мм/об, мм/мин
 t – глубина резания, мм
 Rz – высота неровностей профиля, мкм
 Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм
 W_z – высота волнистости поверхности, мкм
 h_n – толщина наклепанного (деформированного) слоя, мкм
 u_n – степень наклепа, %
 Δ, ω – погрешность обработки и поле рассеяния размеров
 σ – среднее квадратическое отклонение случайной погрешности
 L_{cp} – среднее арифметическое значение размеров (математическое ожидание)
 δ – допуск на размер, мм
 z_o – общий припуск на обработку, мм
 σ_B – временное сопротивление (предел прочности) при растяжении
 $\sigma_T, \sigma_{0.2}$ – предел текучести физический и условный
 E, G – модуль упругости и сдвига
 σ_{-1} – сопротивление усталости (предел выносливости при симметричном цикле нагружения)
 σ_{1000}^{700} – предел длительной прочности за 1000 ч и испытаний при 700°C
 ε – степень деформации
 δ, φ – относительное удлинение и сужение после разрыва
 ρ – плотность материала
 HB, HRC, HV, HM – твердость по Бринеллю, Роквеллу (шкала С), Виккерсу, микротвердость
 C_d – цеховая себестоимость изготовления одной детали, руб.

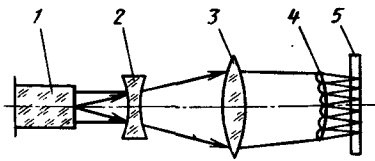


Рис. 14.4. Схема одновременной обработки ряда отверстий светолучевым методом

порядка $3 \cdot 10^{-3}$ Па, высоковольтного источника питания и системы управления. На этих установках обычно применяется импульсный режим обработки, позволяющий регулировать энергию нагрева и управлять скоростью съема металла. Длительность импульса изменяется от 10 до 800 мкс с частотой от 50 до 3000 Гц. В авиационном двигателестроении ЭЛО применяется для перфорирования охлаждаемых лопаток ГТД.

Светолучевой метод обработки основан на использовании излучения лазера (оптического квантового генератора), которое фокусируется на обрабатываемую поверхность детали в пятно требуемого диаметра. Интенсивность потока сфокусированного излучения в месте обработки достигает $10^6 \dots 10^8$ Вт/см². Этого достаточно для мгновенного расплавления и испарения практически любых материалов, обладающих различными физико-механическими свойствами. Обработка производится на воздухе с помощью оптического квантового генератора на твердом теле, в качестве которого служит крупный кристалл синтетического рубина, имеющий форму стержня. Рубиновый стержень является резонатором, в котором возникает и формируется луч, испускаемый лазером. Снаружи рубиновый стержень окружен спиралеобразной импульсной лампой-вспышкой, наполненной инертным газом (обычно ксеноном) и вспыхивающей при импульсном разряде через нее заряженного конденсатора.

Светолучевой метод обработки позволяет получать отверстия от 0,01 до 0,2 мм и глубиной до 20...40 мм. Производительность — 30...60 отверстий в минуту. Светолучевая обработка нашла применение в авиационном двигателестроении для перфорации охлаждаемых лопаток ГТД. Для повышения производительности обработки при перфорации лопаток светолучевым методом производится одновременная обработка ряда отверстий. С этой целью луч лазера разделяется с помощью системы линз на несколько параллельных лучей (рис. 14.4). Лазерный луч 1 с помощью системы линз 2 и 3 расширяется и попадает на растровый объектив 4, состоящий из большого числа линз малого диаметра, каждая из них фокусирует на обрабатываемую поверхность 5 соответствующей интенсивности луч, необходимый для обработки заданного отверстия.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие физико-химические методы обработки деталей нашли применение в авиационном двигателестроении?
2. Как осуществляется процесс ЭХО деталей?
3. Каковы технологические возможности ультразвуковой обработки деталей?
4. Как осуществляется электронно-лучевая и светолучевая обработка и какова область ее применения?

Раздел 3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Глава 15. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДИСКОВ

Диски компрессора и турбины, соединенные между собой и валом, образуют ротор. Конструктивная форма дисков зависит не только от вида соединения, но главным образом от условий работы дисков. Диски должны выдерживать большие центробежные нагрузки при неравномерном температурном поле от обода до ступицы. Эти эксплуатационные условия вынуждают применять высокопрочные и жаропрочные сплавы, труднообрабатываемые лезвийным инструментом. Для создания жесткого ротора необходима особая форма дисков, которая не всегда технологична.

15.1. Конструкция, технические условия и материалы

Конструкция и классификация дисков. Основными конструктивными элементами диска являются обод (венец) с пазами для крепления лопаток, полотно (диафрагма), фланцы для связи с соседними дисками и валом и ступица.

Диски различают: конструктивно (по способу соединения дисков в роторы) — монолитные и сборные; по способу изготовления — деформируемые, спекаемые (из гранул), литые, сварные, паяные.

У дисков сборной конструкции КИМ значительно выше, чем у дисков монолитной конструкции, и достигает 0,4. Соединение дисков компрессора в роторы осуществляют штифтами, призонными болтами, торцевыми шлицами и стяжной трубой, электронно-лучевой сваркой.

При штифтовом соединении диски между собой соединяются напрессовкой по своим посадочным (центрирующим) поясам с последующим креплением штифтами. Диски данной конструкции технологичны: простота их конфигурации (без сложных закрытых карманов, полостей, лабиринтов) и невысокая трудоемкость изготовления.

Диски, соединяемые короткими и длинными призонными болтами, имеют точно расположенные отверстия ($\pm 0,05$ мм) с жесткими допусками. Отверстия обрабатывают по специальному кондуктору или на расточном станке, что сопряжено с определенными трудностями. Проще обработка отверстий в дисках в сборе с сопрягаемыми деталями (проставками).

Диски компрессора и турбины, соединяемые в ротор с помощью торцевых шлиц и стяжных болтов, технологичны; их обработка не вызывает трудностей.

В сварном роторе диски, предварительно сцентрированные по точно обработанным технологическим посадочным буртам, соединяются между собой электронно-лучевой сваркой. Технологические бурты после сварки срезаются точением. Метод соединения прогрессивный, технологичный.

Монолитный ротор компрессора изготавливается из одной монолитной поковки точением. Он применяется в основном на малоразмерных двигателях (в вертолетостроении). Трудоемкость изготовления такого ротора очень велика из-за плохого доступа к местам обработки при малых внутренних диаметрах и при относительно большой длине ротора. Конструкция ротора не технологична.

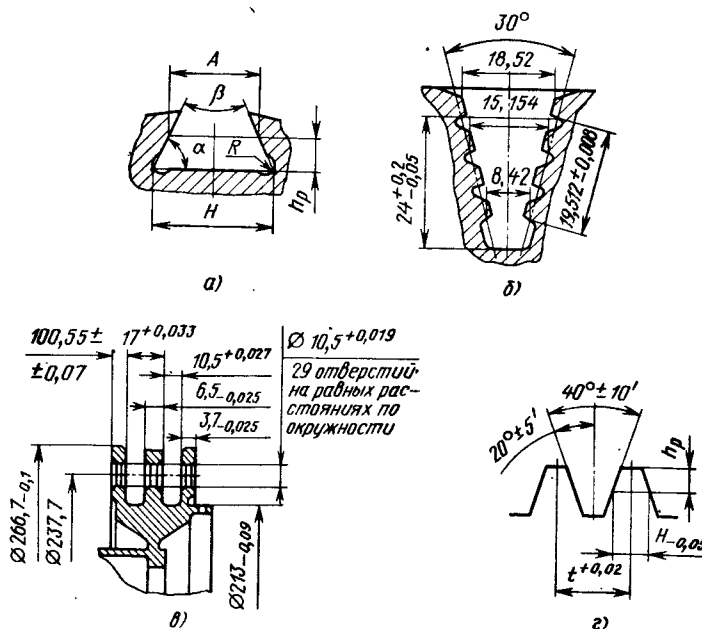


Рис. 15.1. Формы пазов в дисках для соединения с лопатками и торцевые шлицы для соединения дисков в ротор:

а — типа ласточкина хвоста; б — елочного профиля; в — с шарнирным креплением; г — торцевые шлицы

Пазы дисков для соединения с лопатками. Диски в зависимости от способа соединения их с лопатками бывают монолитные (за одно целое с лопатками, например в ТНА, турбостартерах) и составные неразъемные (сварные, паяные) и разъемные с креплением лопаток в пазах диска (одновенечные, двухвенечные и многовенечные).

Пазы типа ласточкина хвоста (рис. 15.1, а) используются для крепления лопаток в дисках компрессора. Конструкция паза наиболее технологична; паз обрабатывается протягиванием.

Пазы елочного профиля (рис. 15.1, б) используются в основном для крепления лопаток в дисках турбины, реже — в дисках компрессора. Форма паза технологична: паз обрабатывается протягиванием.

В сравнительно мало нагруженных роторах компрессора (с малой частотой вращения) используются диски с **шарнирным креплением** (рис. 15.1, в). По трудоемкости и сложности изготовления этот вид крепления технологичен. Проточка паза под проушину лопатки и обработка отверстий под штифты в диске не вызывают затруднений.

Кольцевой паз типа ласточкина хвоста представляет собой точно выполненную кольцевую проточку в ободе диска. Кольцевой паз менее технологичен, чем паз формы ласточкина хвоста прямого типа. Трудности его изготовления связаны с выдерживанием точных углов при точении, малой стойкостью и жесткостью резцов, невозможностью точного контроля

профиля паза при изготовлении и обеспечения высоких требований по точности и волнистости поверхностей. При проектировании дисков с малыми сечениями паза следует избегать применения кольцевых пазов.

Технические условия на изготовление дисков. Точность обработки отдельных поверхностей дисков и их взаимное расположение характеризуются следующими величинами:

посадочные поверхности и
лабиринтные канавки 6...10-й квалитеты
отверстия под штифты 8...10-й квалитеты
наружные диаметры 8...11-й квалитеты
остальные поверхности 11...12-й квалитеты
биение наружных поверхностей
относительно посадочных.... 0,02...0,1 мм.

Шероховатость посадочных поверхностей и пазов $Ra = 1,25...0,32$ мкм, остальные поверхности $Ra = 2,5...0,63$ мкм.

Пазы для крепления лопаток обычно обрабатываются со следующей точностью:

Елочные пазы (см. рис. 15.1, б):
Допуск на шаг зубцов..... 0,02 мм
Допуск на ширину елочного паза ... 0,02...0,05 мм
Смещение опорных поверхностей
елочного профиля одной стороны
относительно другой 0,02...0,03 мм
Погрешность углов елочного профиля
и трапеции паза $\pm(5...15')$
Непараллельность опорных поверхностей
замка относительно оси диска
на длине замка 0,05 мм
Погрешность шага пазов
(по окружности) 0,15...0,3 мм

Пазы типа ласточкина хвоста (рис. 15.1, а):
Посадочный размер (ширина паза А) 8...9-й квалитеты

Погрешность угла замка $\pm 5'$
Шаг пазов по окружности 0,15...0,3 мм

Торцевые шлицы (рис. 15.1, г) обрабатываются с точностью:

Погрешность окружного шага зубцов 0,32...0,05 мм
Допуск на толщину зубца 8...11-й квалитеты

Погрешность угла зубцов $\alpha_3 = (40...60^\circ) \pm 10'$

Диски балансируют статически и в собранном роторе — динамически.

Допуск на массу диска составляет 5 % массы расчетного диска.

Материалы дисков. Диски турбин работают при высоких температурах ($650...750^\circ\text{C}$) под напряжением, поэтому их изготавливают из жаропрочных сплавов ХН73МТБЮВД, ЭП741НП, ХН62БМКТЮИД, ЭП743, ЭК79ИД, ВЖ122.

Диски осевых компрессоров работают при более низких температурах, особенно первые ступени, и с меньшей нагрузкой. Их изготавливают из алюминиевых сплавов типа АК4-1, АК6-1 (редко), сталей 13Х12Н2В2МФА-

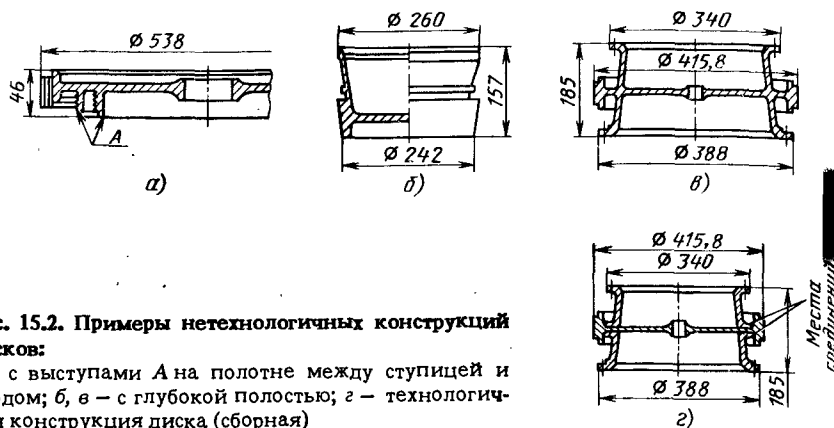


Рис. 15.2. Примеры нетехнологичных конструкций дисков:

а — с выступами А на полотно между ступицей и ободом; б, в — с глубокой полостью; г — технологичная конструкция диска (сборная)

III, ВНС-22, 15Х12Н2ВМФАБ, 15Х16К5Н2ВМФАБ (при температурах нагрева до 600°C), титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ8М, ВТ18У, ВТ25У, ВТ33 (при температурах нагрева до 450°C) и жаропрочных сплавов ЭП718ИД (при температуре нагрева 700°C).

Технологичность конструкции дисков. Диски компрессора при небольшой массе имеют большую площадь поверхности, что в сочетании с тонкими стенками обуславливает нетехнологичность конструкции. Изготовление подобных дисков характеризуется низким КИМ и значительной трудоемкостью механической обработки.

Диски турбины массивнее дисков компрессора и технологичнее. Отношение массы к площади ее поверхности у дисков турбины значительно больше. При конструировании этих дисков следует стремиться к простой геометрической форме без большой разницы между размерами отдельных элементов сечений; избегать ребер и выступов, расположенных между ступицей и ободом (рис. 15.2, а); изготовление таких дисков связано с повышенным расходом металла и большим объемом последующей механической обработки; предусматривать плавные переходы от сечения к сечению, глубокие полости (рис. 15.2, б) не рекомендуются, так как они усложняют производство заготовок и их механическую обработку.

Диски больших габаритных размеров с глубокими (рис. 15.2, в) полостями целесообразно рассчитывать на несколько элементарных деталей (рис. 15.2, г): элементарный диск без глубоких полостей и два кольца.

Для изготовления дисков с минимальной механической обработкой необходимо назначать рациональные соотношения между основными конструктивными элементами — диаметром диска и толщиной полотна, высотой обода или ступицы и толщиной их стенок, радиусами переходов и закруглений, руководствуясь ОСТ 1.41188—72.

Для уменьшения номенклатуры применяемого режущего и измерительного инструмента в пределах одного ротора компрессора или турбины необходимо стремиться при проектировании дисков к минимальному числу типоразмеров пазов, канавок, радиусов сопряжений поверхностей и других конструктивных элементов.

15.2. Построение технологических процессов изготовления дисков

Заготовки дисков турбин и компрессоров штампуют в закрытых штампах на ковочных молотах и мощных прессах. Форму заготовки стремятся приблизить к форме готовых дисков. Припуск на механическую обработку около 5...6 мм на сторону. Однако в ряде случаев из-за сложной конфигурации детали, припуски значительно больше. КИМ составляет около 0,1. Заготовки дисков на авиационные двигателестроительные заводы поступают предварительно обработанными заводом-поставщиком. Их подвергают ультразвуковому контролю для выявления внутренних дефектов.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом переходят на изготовление дисков компрессора и турбины горячим изостатическим прессованием гранул в газостате (методом порошковой металлургии)*. Основные этапы технологического процесса — получение гранул (диаметром 5...500 мкм); очистка и сортировка гранул по размерам; горячее изостатическое прессование заготовки из гранул в газостате (температура нагрева 1200°C , давление $2 \cdot 10^3$ Па). Горячее изостатическое прессование повышает жаропрочность и пластичность материала заготовки.

Для дисков компрессора отрабатываются технология и оборудование с целью получения заготовок с регулируемой структурой методом изостатического прессования порошков с разными механическими свойствами**.

Перспективной является также изотермическая штамповка и раскатка заготовок дисков компрессора и турбины в условиях сверхпластичности. Сущность этого направления состоит в следующем. Рабочие валки создают гидростатическое давление на материал заготовки, находящийся в очаге деформации. Величина гидростатического давления превышает предел текучести материала, что подавляет порообразование, исключает появление трещин и других несплошностей. Соблюдение изотермических условий в этом процессе деформирования обеспечивает мелкозернистую равноосную структуру при незначительной ориентации зерен в направлении течения металла. Материал заготовок дисков имеет повышенные механические свойства с малым их разбросом.

В настоящее время разработаны технологические процессы сверхпластического раскатывания дисков из титановых и жаропрочных сплавов.

При изготовлении дисков традиционными методами КИМ составляет 0,08; при использовании предварительных заготовок из порошков КИМ — 0,2 и при применении горячего изостатического прессования КИМ — 0,3.

Заготовки турбинных дисков с лопатками получают литьем по выплавляемым моделям с точностью 10...13-го квалитетов и шероховатостью поверхности $Ra = 10...1,25$ мкм. Лопатки таких дисков механически не обрабатывают, а лишь зачищают отдельные места. Все остальные поверхности литых дисков обрабатывают так же, как и штампованные.

* А. Ф. Белов. Металл: улучшение качества — путь к экономии // Наука и жизнь, 1982, № 2, с. 2-9.

** НИЦ им. Льюиса (США).

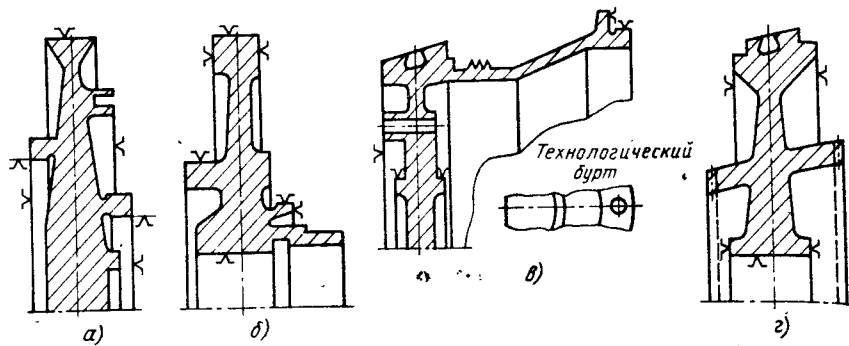


Рис. 15.3. Технологические базы для обработки дисков:
а, б — диски турбины; в, г — диски компрессора

Технологические базы для обработки дисков. Технологическими базами при механической обработке дисков являются центрирующие (посадочные) пояски или отверстие в диске и торцы.

Технологические базы в дисках турбины — центрирующие пояски или отверстия, торцы фланцев и в ряде случаев технологический бурт с отверстием с одной стороны полотна (рис. 15.3, а).

Технологические базы в дисках компрессоров с центрирующими поясками (барабанного типа) — центрирующие пояски и торцы диска (рис. 15.3, в), а в дисках с торцевыми шлицами — отверстие и торцы диска (рис. 15.3, г).

Малая жесткость дисков компрессоров требует частой правки технологических баз, например, в ряде конструкций дисков торцы обрабатывают до трех раз.

Основные этапы технологического процесса изготовления дисков

Диски турбины

1. Штамповка, изготовленная горячим изостатическим прессованием гранул, предварительно грубо проточена кругом заводом-поставщиком.
2. Точение контура диска перед ультразвуковым контролем.
3. Ультразвуковой контроль внутренних дефектов материала заготовки.
4. Черновое точение контура диска, раздельно правую и левую стороны. Токарный станок с ЧПУ 1П732РФ3.
5. Стабилизирующий отжиг (температура нагрева $870 \pm 10^\circ\text{C}$; выдержка 5 ч).
6. Чистовое точение контура диска, раздельно правую и левую стороны. Токарный станок с ЧПУ АТ320МС, MDW-20S фирмы „Макс Мюллер“ (ФРГ).
7. Окончательная обработка хвостовика диска; токарный станок с ЧПУ АТ320МС.
8. Промежуточный контроль.

9. Протягивание торцевых шлиц. Горизонтально-протяжный станок 7Б56.

10. Сверление и зенкерование различных отверстий. Радиально-сверлильный станок 2Н55.

11. Фрезерование облегов на фланцах диска. Вертикально-фрезерный станок МА-655.

12. Нарезка резьбы в хвостовике диска. Резьбофрезерный станок.

13. Протягивание елочных пазов. Горизонтально-протяжный станок 7Б57.

14. Шлифование торцевых шлиц.

15. Полирование наружного контура диска.

16. Точение лабиринтных канавок. Токарный станок.

17. Окончательный контроль, в том числе и люминесцентный ЛЮМ-1.

18. Стабилизирующий отжиг в аргоне или в вакууме (температура нагрева $870 \pm 10^\circ\text{C}$, выдержка 5 ч).

19. Деформационное упрочнение микрошариками торцевых шлиц, сопряжений. Установки типа УДМ-3, ВУД-500М, ВУД-1000ДМ.

Диски компрессора

Технологические процессы изготовления дисков компрессора и турбины во многом подобны, но имеется и некоторое их различие.

1. Заготовка — штамповка, полученная методом порошковой металлургии.
2. Точение контура диска перед ультразвуковым контролем.
3. Ультразвуковой контроль внутренних дефектов материала диска.
4. Черновое точение контура диска, раздельно правую и левую стороны; токарный станок с ЧПУ АТПР-800.
5. Полирование наружного контура диска перед травлением.
6. Травление и рентгеновский контроль внешних и внутренних дефектов материала диска.
7. Стабилизирующий отпуск.
8. Чистовое точение контура диска, раздельно правую и левую стороны. Токарные станки с ЧПУ АТ320МС, DF-1000 фирмы „Хайд“ (Австрия); MDW-20S фирмы „Макс Мюллер“.
9. Окончательное точение контура диска, раздельно правую и левую стороны. Токарные станки с ЧПУ АТ320МС, DF-1000, MDW-20S.
10. Протягивание пазов типа ласточкина хвоста или точение кольцевого паза для установки лопаток. Горизонтально-протяжный станок 7Б57, токарный станок.
11. Сверление и зенкерование различных отверстий. Радиально-сверлильный станок 2Н55.
12. Подрезка торцев с обеих сторон (восстановление технологических баз).
13. Полирование наружных поверхностей контура дисков.
14. Окончательный контроль, в том числе и ЛЮМ-1.

15.3. Выполнение основных операций обработки дисков

Характерными операциями для дисков являются: точение наружного контура (диафрагмы, фланцев) и центрирующих (посадочных) поясков;

обработка пазов для лопаток и торцевых шлиц; сверление и зенкерование отверстий и фрезерование облегчений.

Обработка технологических баз и наружного контура дисков. Конфигурации диафрагмы и фланцев диска отличаются большим разнообразием. Черновая и чистовая обработка поверхностей наружного контура дисков производится на токарных станках с ЧПУ, раздельно или одновременно с двух сторон.

Раздельное точение правой и левой сторон дисков средних размеров (диаметром до 400 мм) осуществляется на станках с ЧПУ типа АТ320МС, 1П752, 1П756, MDW-10 фирмы „Макс Мюллер“. Диски диаметром больше 400 мм обрабатывают на станках типа АТПР-800, ТД-1000, MDW-20S, РТ751 фирмы „Хайд“.

Одновременно с двух сторон можно обрабатывать диски компрессоров на многооперационных станках с ЧПУ типа DRMN-750 (диски диаметром до 750 мм) и DRN-1250 (диаметром до 1250 мм) фирмы „Хелигенштадт“ (ФРГ).

Точение стенок относительно большой толщины (до 5...6 мм) не вызывает затруднений. Стенки (полотно) малых толщин, менее 2,5...3 мм, очень сложны в обработке из-за недостаточной их жесткости: они прогибаются, деформируются, что приводит к разностенности, снижению точности взаимного расположения поверхностей, ослаблению размеров и другим дефектам.

Существует много способов для уменьшения или устранения этих деформаций, но они малоэффективны. Одним из прогрессивных способов обработки тонкостенных диафрагм является их точение на станках с ЧПУ одновременно с двух сторон.

Обработка неглубоких канавок (глубиной до 5...6 мм) и шириной 4...5 мм канавочными резцами не вызывает затруднений. Точение глубоких и узких канавок и лабиринтов, как торцевых, так и радиальных, и особенно внутренних, — сложное и трудоемкое. Из-за малой ширины канавок резцы для обработки лабиринтов имеют малые сечения и жесткость. Они обрабатываются на малых скоростях, подачах и глубинах. Обработка их не технологична. При проектировании необходимо это учитывать и переходить к более технологичным конструкциям.

Обработка пазов под лопатки и торцевых шлиц. Обработка пазов под лопатки — одна из наиболее трудоемких и важных операций.

Елочные пазы обрабатывают только протягиванием, обычно комплектом из 5...7 протяжек на горизонтально-протяжных станках. Последовательность снятия припуска у елочного паза показана на рис. 15.4, а. Трапецевидный паз обрабатывается тремя-четырьмя протяжками.

Пазы в дисках компрессоров типа ласточкина хвоста протягивают на горизонтально-протяжных станках. Последовательность образования этого паза показана на рис. 15.4, б. Диск закрепляется в делительном приспособлении, устанавливаемом на станке прямо или под углом в зависимости от направления паза.

Кольцевые пазы обрабатывают точением (рис. 15.4, в), иногда в узле ротора (из трех и более дисков, сваренных электронным лучом), набором резцов в специальных державках.

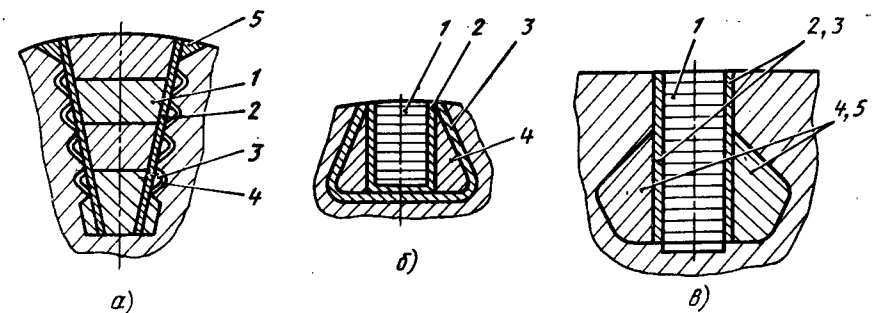


Рис. 15.4. Схемы обработки пазов в дисках:

а — елочного профиля; б — типа ласточкина хвоста; в — кольцевого; 1...5 — переходы

Торцевые шлицы можно обработать фрезерованием, круговым протягиванием на специальных станках, строганием или шлифованием фасонным абразивным кругом на специальных станках.

Высокая точность окружных шагов торцевых шлиц (0,02...0,05 мм) основная трудность в их обработке, так как точность деления в обычных делительных устройствах (с фиксацией клином, штырем) составляет 0,1...0,3 мм. В связи с этим были созданы специальные делительные устройства (прецизионные), обеспечивающие точность деления до 0,02 мм. Характерные особенности этих делительных приспособлений — делительный диск большого диаметра, фиксация деления осуществляется беззазорным прижатием призматического фиксатора к круглым штырям, запрессованным в делительный диск („белые колеса“).

Торцевые шлицы фрезеруют фасонной дисковой фрезой в поворотном делительном приспособлении на горизонтально-фрезерном станке. За один двойной продольный ход стола станка обрабатывается один паз на всю глубину. Метод фрезерования из-за большого времени на врезание и возвратный ход стола непроизводителен.

Круговое протягивание круговой протяжкой (рис. 15.5) на шлицепротяжном полуавтомате типа ПШН является более производительным методом. На горизонтальном шпинделе станка установлена круглая протяжка, а на делительном столе — обрабатываемый диск. Круглая протяжка состоит из дискового корпуса, оснащенного режущими зубчатыми секторами. Существующие протяжки имеют 15 режущих секторов

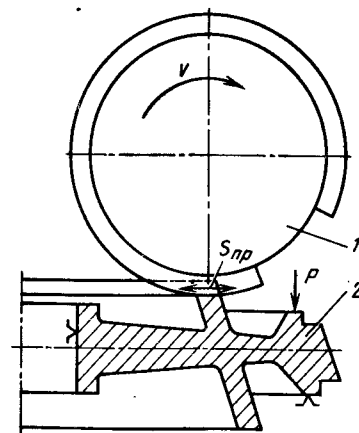


Рис. 15.5. Схема кругового протягивания торцевых шлиц в дисках компрессора на шлицепротяжном полуавтомате типа ПШН

и два калибрующих по 11 зубьев в каждом секторе. Часть обода протяжки оставляется свободной, без секторов. На станке протяжка непрерывно вращается вокруг своей оси, а круглый стол станка с обрабатываемым диском периодически совершает небольшие возвратно-поступательные движения подачи в направлении оси обрабатываемого паза (продольная подача $S_{пр}$). Поворот стола с диском на следующий паз происходит автоматически, без остановки вращения протяжки, в момент, когда имеющийся на протяжке свободный участок займет положение над обрабатываемой поверхностью диска.

Торцевые шлицы на дисках нарезают также *строганием*, причем наиболее производительным является многолезвийное непрерывное строгание на многолезцовом полуавтомате типа ПШХ-1 с движением резцов по конхойде.

Сверление отверстий. Отверстия во фланцах, диафрагме и на ступице сверлятся по накладным кондукторам на обычных вертикальных или радиально-сверлильных станках. При сверлении на одношпиндельных вертикально-сверлильных станках кондуктор делается поворотным, а на радиально-сверлильных — неподвижным. Радиальные отверстия под штифты для крепления лопаток в пазах или для соединения дисков сверлят на вертикально-сверлильных станках в кондукторах с делительным устройством.

15.4. Повышение ресурса и надежности работы дисков технологическими методами

Основными направлениями повышения ресурса и надежности работы дисков компрессора и турбины являются деформационное упрочнение и ионно-лучевая обработка наружных поверхностей.

Деформационное упрочнение дисков. Деформационное упрочнение в основном используется для повышения усталостной прочности материала дисков в местах конструктивных концентраторов напряжений (канавки, пазы, острые кромки, радиуса сопряжений и др.), работающих при умеренных температурах нагрева в условиях эксплуатации. В настоящее время разработан ряд методов упрочнения дисков турбин и компрессоров: виброупрочнение, струйно-гидравлический, ультразвуковой и упрочнение микрошариками.

Виброупрочнение дисков осуществляется на установках типа ВУД-500М и ВУД-1000ДМ, на которых обрабатываются диски диаметром до 350 и 1200 мм соответственно (рис. 15.6, а). При упрочнении тонких дисков возможна их повodka. Более производительным является струйно-гидравлический (гидродробеструйный) метод (рис. 15.6, б). Диски диаметром до 800 мм упрочняются шариками из стали ШХ15 диаметром 1...1,3 мм на установке ГДП-3. Многосопловые струйно-гидравлические установки позволяют упрочнять диски также металлическими и стеклянными микрошариками.

Разработан также ультразвуковой способ упрочнения дисков диаметром до 300 мм. Большая равномерность обработки шариками всех поверхностей уменьшает деформации диска, шероховатость составляет $Ra = 0,63...0,32$ мкм.

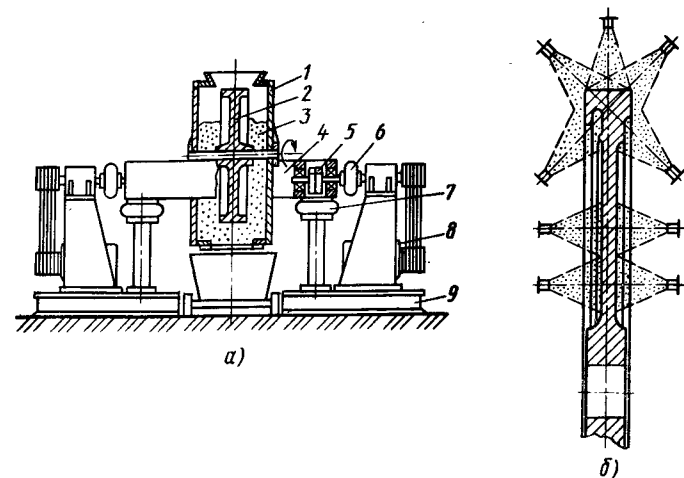


Рис. 15.6. Схемы деформационного упрочнения дисков турбины и компрессора: а — виброупрочнение на установке ВУД-1000ДМ; б — струйно-гидравлическое упрочнение; 1 — контейнер; 2 — обрабатываемый диск; 3 — рабочая среда; 4 — подвижная рама; 5 — вибратор; 6, 7 — упругие элементы; 8 — электродвигатель; 9 — основание

Деформационное упрочнение дисков стальными или стеклянными микрошариками диаметром 160...200 мкм выполняется на дробеметной установке типа УДМ-3 (рис. 15.7). Принцип ее работы подобен работе установки УДМ-2 (см. подразд. 5.1). Отличительной особенностью данной установки является то, что внутрь камеры введены дополнительный вал и стол для установки обрабатываемого диска. Стол обеспечивает возможность ориентации обрабатываемых поверхностей диска (полотна, пазов) относительно потока микрошариков из дробемета. Важным преимуществом упрочнения микрошариками является возможность пластической

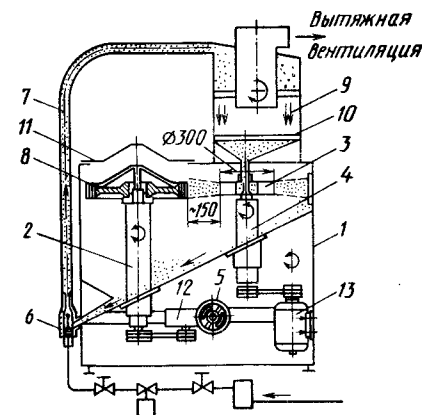


Рис. 15.7. Схема дробеметной установки УДМ-3:

1 — камера; 2 — шпиндель поворота детали; 3 — дробемет; 4 — шпиндель дробемета; 5 — электродвигатель вращения диска; 6 — транспортирующее сопло; 7 — канал транспортировки микрошариков; 8 — обрабатываемый диск; 9 — циклон; 10 — сетка; 11 — крышка камеры; 12 — редуктор; 13 — электродвигатель вращения дробемета

деформации поверхностей малоразмерных конструктивных концентраторов напряжения — острых кромок, малых радиусов переходов и др.

Ионно-лучевая обработка (см. подразд. 5.6) наружных поверхностей дисков является весьма перспективным направлением для повышения их усталостной прочности и сопротивления коррозии. Разработка технологии, оборудования и их внедрение существенно увеличит ресурс и надежность работы дисков — высоконагруженных деталей двигателя.

15.5. Технический контроль дисков

Технический контроль дисков предусматривает проверку внешних и внутренних дефектов материала диска, соответствие шероховатости обработанных поверхностей, заданной по техническим условиям чертежа, контроль геометрических размеров, формы и взаимного расположения поверхностей диска.

Внешние дефекты материала диска проверяются визуально после травления и с помощью ЛЮМ-1 (см. подразд. 16.9). Внутренние дефекты материала диска проверяются ультразвуковым методом. Он основан на подаче в металл заготовки ультразвуковых колебаний с частотой примерно 20 кГц. Для этого контроля применяются двухголовочные импульсные дефектоскопы типа УД-10УА, ДУК-66, ДУК-66П, УД-11ПУ, УД-12ПУ, УЗДУ-1. В них одна искательная головка посылает ультразвуковые колебания в глубь металла, а другая принимает сигналы этих колебаний, отраженных от дефектного места (трещин, пузырей, рыхлот и других), находящихся на пути ультразвуковых колебаний. Наличие дефекта в металле заготовки определяется сканированием (передвижением) искательных головок по поверхности заготовки.

Шероховатость обработанных поверхностей обычно проверяется сравнением с эталонами и непосредственным измерением с помощью профилометров.

Все поверхности дисков по размерам, форме и взаимному расположению контролируются механическими, оптико-механическими и пневматическими измерительными средствами. Особое внимание при контроле дисков обращается на точность пазов под лопатки, торцевых шлиц и посадочных поверхностей.

Елочные пазы проверяются на проекторе, инструментальном микроскопе, индикаторными приборами, калибрами по роликам и на пневморотаметре.

Проверка всех точностных параметров в условиях серийного производства является очень трудоемкой, требующей многих измерительных средств. Поэтому некоторые параметры, как, например, углы профиля и радиусы закруглений в отдельных зубцах и между ними, проверяют на большом инструментальном микроскопе, а профиль паза — на проекторе с 50-кратным увеличением. Такому контролю подвергаются пазы, протянутые на образцах комплектом новых или вновь заточенных протяжек, а также и перед отправкой их в заточку. Однако такой контроль не выявляет отклонений размеров во всех пазах диска, поэтому ширину паза, шаг между зубцами, расположение одной стороны паза относительно

другой, шаг между пазами и некоторые другие размеры проверяют во всех пазах с помощью механических и пневматических приборов. Ширина паза проверяется двумя роликами и предельным калибром.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие конструктивно-технологические особенности характерны для дисков ГТД?
2. Каковы основные ТУ на изготовление дисков компрессоров и турбин?
3. Какие материалы и виды заготовок применяют для изготовления дисков?
4. Каковы основные этапы технологического процесса изготовления дисков турбины?
5. Как обрабатывают пазы под лопатки в дисках турбины и компрессора?
6. Какие технологические методы применяют для повышения ресурса и надежности работы дисков?

Глава 16. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛОПАТОК

Лопатки в газотурбинных двигателях являются наиболее нагруженными и массовыми деталями, определяющими надежность, ресурс, стоимость и трудоемкость изготовления двигателя.

Число лопаток в современных двигателях составляет 2...3,5 тыс. штук.

Ресурс работы лопаток в двигателе для военно-тактической авиации — 500...1000 ч, а для гражданской авиации (пассажирской, транспортной) — 10...20 тыс. часов.

Стоимость комплекта лопаток для двигателя составляет 20...35 % общей стоимости двигателя. Трудоемкость изготовления комплекта лопаток для двигателя достигает до 20...35% общей трудоемкости изготовления двигателя. Производство лопаток ГТД вызывает определенные технологические трудности из-за высоких требований к точности сложно-фасонной поверхности пера и геометрических размеров хвостовика, а также плохой обрабатываемости материалов, применяемых для их изготовления. Технология изготовления заготовок лопаток и их обработки требует применения дорогостоящего специализированного технологического оборудования, уникальной оснастки и контрольно-измерительных средств. Поэтому конструкция лопаток (требования к точности, шероховатости и физико-химического состояния поверхностного слоя) должна быть технологичной, обеспечивающей максимальное применение существующего технологического оборудования, возможность механизировать процессы механической обработки, резко сократить объем ручных полировально-доводочных операций. Устранение ручной обработки стабилизирует технологический процесс, а следовательно, и качество лопаток, позволяет повысить надежность и ресурс всего двигателя.

Лопатки ГТД различают: по их назначению — рабочие (лопатки ротора турбины и ротора компрессора, вращающиеся с дисками); сопловые и спрямляющие (неподвижные); конструктивно-монолитные (сплошные, не охлаждаемые); с каналами; пустотелые; вафельные паяные из двух половинок (охлаждаемые) лопатки турбины; по способу изготовления — деформируемые (кованные, прессованные, вальцованные); литые; свариваемые; спекаемые.

Основными конструктивными элементами лопаток компрессора и турбины являются перо и корневая часть (хвостовик или замок) лопатки. Перо лопатки имеет сложную пространственную форму с постоянными или переменными профилями поперечных сечений по длине. Сечения могут быть повернуты относительно друг друга, образуя закрутку пера. Выпуклую сторону пера принято называть спинкой, а вогнутую — корытом. Кромку пера со стороны входа газа называют входной (передней), а противоположную — выходной (задней).

Перо рабочих лопаток турбин имеет переменные сечения по длине и закрутку до 60° . Спинка и корыто пера в сечении обычно очерчены кривой переменного радиуса. Такой профиль пера лопатки задают координатами отдельных точек. Иногда поверхность корыта имеет цилиндрическую или коническую форму с плавным переходом в плоскость.

Перо сопловых лопаток турбин имеет сечения, постоянные или

изменяющиеся по длине лопатки, с углом закрутки до 10° . Такие лопатки делают без замка или с двумя замками.

Перо рабочих, спрямляющих и направляющих лопаток компрессора более сложной формы, чем у лопаток турбины: сечения и радиусы кривизны по длине пера переменные, а угол закрутки достигает 45° .

Разъемные соединения лопаток с дисками выполняются при помощи замков различной конструкции. Основные формы замков следующие: елочный, типа ласточкина хвоста (трапецидальный) и шарнирный (вилочный). Елочный замок чаще встречается у рабочих лопаток турбины, а типа ласточкина хвоста и шарнирный — у рабочих лопаток компрессоров. Лопатки, соединяемые с корпусами направляющих аппаратов посредством сварки, пайки, замков не имеют (беззамковые).

Для повышения жаростойкости перо рабочих, а иногда и сопловых лопаток алитируют, хромоалитируют, наносят жаростойкие защитные покрытия, подвергают ионному легированию. На перо рабочих лопаток компрессора для повышения сопротивления солевой коррозии и эрозии наносят защитные покрытия или подвергают ионному легированию.

Учитывая разные условия работы лопаток в двигателе и особенности их конструкции, рассмотрим технические условия, материалы и технологии изготовления отдельно для лопаток турбины и лопаток компрессора.

16.1. Конструкция, технические условия и материалы лопаток турбины

Лопатки турбины, как и компрессорные, являются массовыми деталями. Некоторые современные ГТД имеют до семи ступеней турбины с общим числом лопаток на моторокомплект более 500.

В зависимости от назначения лопатки турбины делятся на лопатки ротора турбины, или рабочие лопатки, и лопатки статора турбины (лопатки соплового аппарата).

Длина лопаток турбины находится в пределах от 40 до 400 мм. Основную массу составляют лопатки длиной 120...250 мм.

Основными конструктивными элементами рабочей лопатки являются перо и замковая часть, иногда на конце лопатки располагается бандажная полка. Профилирование рабочих лопаток выполняется в соответствии с теорией газовых турбин. Профили строятся для нескольких расчетных сечений, сопрягаемых между собой плавными переходами.

Классификация лопаток. Рабочие лопатки турбины различают охлаждаемые и неохлаждаемые (монолитные). Охлаждаемые лопатки бывают многоканальные, дефлекторные, перфорированные и с пористой оболочкой (рис. 16.1). Лопатки первых ступеней охлаждаемые. В настоящее время наиболее распространены бездефлекторные с перфорацией и без нее. Наименьшую эффективность охлаждения имеют лопатки с тремя каналами и петлевой схемой движения воздуха. Несколько лучшую эффективность охлаждения имеют лопатки с радиальными отверстиями ($\phi 1,25$ мм). Еще лучшей является литая лопатка со вставным дефлектором. Наилучший эффект получается в турбинных лопатках с пористым охлажде-

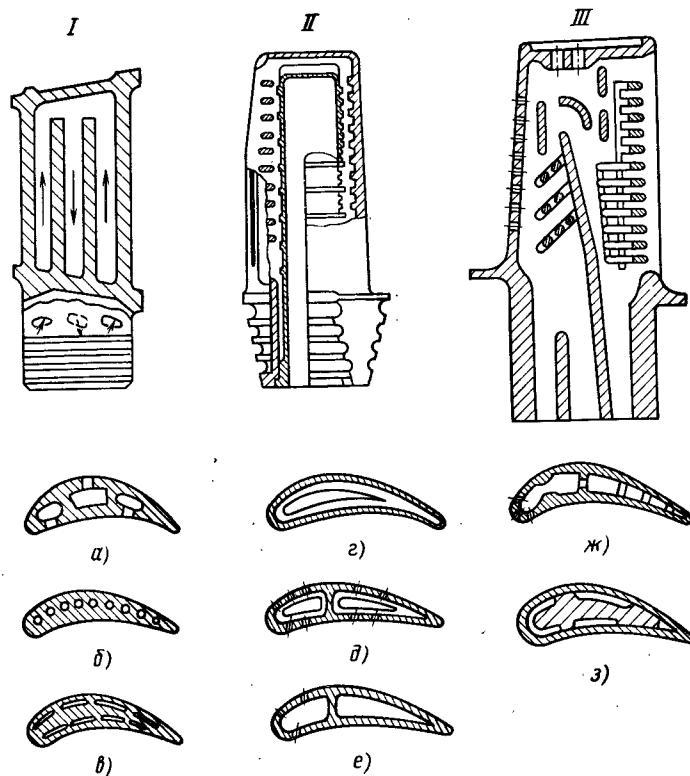


Рис. 16.1. Охлаждаемые рабочие лопатки турбины: I — многоканальные (а, б, е); II — дефлекторные (г, д); III — бездефлекторные с перфорацией (е, ж) и с пористой обложкой (з)

нием. Большинство лопаток имеет перфорационные отверстия, они располагаются прежде всего ближе к входной кромке в два или в три ряда, реже — по спинке и корыту. Отверстия диаметром 0,3...0,6 мм, их число — до 100 и более.

Сопловые лопатки обычно охлаждаемые с дефлектором и перфорацией пера лопатки.

Замки лопаток. Рабочие лопатки турбины имеют *елочный профиль замка* (хвостовика). Замки сопловых лопаток геометрически более простые, их полки прямоугольного или косоугольного контура с цапфой или без нее. Полки замков обычно с развитыми элементами для крепления в наружном и внутреннем кольцах соплового аппарата. Беззамковые лопатки теперь редко встречаются.

Технические условия на изготовление лопаток турбины характеризуются следующими требованиями к точности обработки.

Перо лопаток (рис. 16.2, а). Отклонение профиля спинки $\Delta П_c$ и корыта $\Delta П_k$ в расчетных сечениях от заданных допускаются от 0,10 до 0,30 мм.

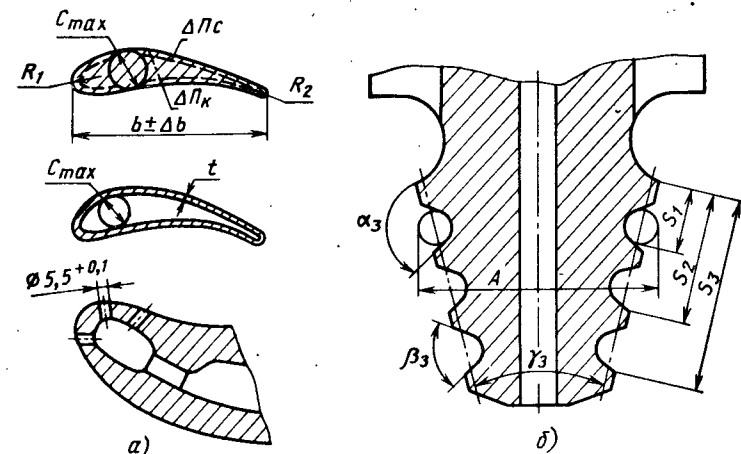


Рис. 16.2. Основные конструктивные элементы рабочей лопатки турбины, определяющие точность ее изготовления:

а — перо лопатки; б — елочный профиль хвостовика

Отклонения толщины профиля пера $\Delta c_{max} = \Delta П_c + \Delta П_k$; толщин стенок пера охлаждаемой лопатки $\pm 0,3$ мм.

Смещение выходной кромки от номинального положения в направлении оси x от $\pm 0,20$ до $\pm 0,30$. Смещение профиля пера в корневом сечении от номинального положения в направлении оси y от $\pm 0,05$ до $\pm 0,20$ мм.

Отклонения ширины хорды профиля пера Δb от $\pm 0,20$ до $\pm 0,30$ мм.

Шероховатость пера $Ra = 0,63 \dots 0,08$ мкм.

Перфорационные отверстия на пере лопатки $\phi 0,3 \dots 0,6$ мм имеют допуск 0,05 мм, шероховатость $Ra = 2,5 \dots 0,15$ мкм.

Елочный замок (рис. 16.2, б). Шаг зубцов имеет допуск 0,01...0,02 мм (5-й квалитет). Толщина хвостовика по средней линии зубцов 0,02...0,06 мм (6-й квалитет).

Допуски на углы замка: угол, определяющий подожжение опорной поверхности зубца, $\alpha_3 = 90 \dots 104^\circ \pm 10'$, угол паза $\beta_3 = 42 \dots 56^\circ \pm 30'$, угол клина хвостовика $\gamma_3 = 25 \dots 30^\circ \pm 30'$.

Взаимное смещение рабочих поверхностей зубцов одной гребенки хвостовика относительно другой в направлении плоскости симметрии хвостовика не более 0,02 мм. Шероховатость поверхности зубцов $Ra = 1,25 \dots 0,32$.

Число типоразмеров елочных замков около 100.

Материалы лопаток турбины. Лопатки газовой турбины являются наиболее нагруженными деталями ГТД, работают в условиях высоких температур нагрева, напряжений и агрессивной среды продуктов сгорания топлива. Газовый поток оказывает не только химическое, но и механическое воздействие на поверхностный слой лопаток турбины, вызывая коррозионное и эрозионное разрушение. Поэтому требования к материалам лопаток газовой турбины, а особенно к рабочим лопаткам, весьма высокие, с широким интервалом физико-химических свойств. Материалы лопаток

газовой турбины должны обладать высоким сопротивлением ползучести, усталости, высокотемпературной газовой коррозии, эрозионному разрушению; располагать достаточной жаропрочностью и пластичностью; быть малочувствительными к надрезам (концентраторам напряжений) и в то же время удовлетворять определенным технологическим свойствам: обрабатываемость резанием, давлением, свариваемостью; хорошими литейными свойствами.

Лопатки турбины изготавливают из жаропрочных сплавов на никель-хромовой и никель-хром-кобальтовой основе, легированных Ti, Al, Mo, W, Ta, Nb, Zr, V, Hf, Y, La, Re и др. Используются в основном литейном жаропрочные сплавы, реже — деформируемые. Литейные сплавы в настоящее время более жаропрочные и жаростойкие, чем деформируемые сплавы.

Для изготовления рабочих и сопловых лопаток применяют следующие жаропрочные сплавы: литейные при температуре нагрева 950...1000°С — ЖС6К, ЖС6У, ВЖЛ-12У и другие; при 1050...1100°С — ЖС6У, ЖС6В, ЖС26ВИ, ЖС32 и другие; деформируемые при температуре нагрева до 950°С — ЭП929, ЭП109, ЭП220, ЖС6КП и др.

В перспективе для лопаток турбины представляют особый интерес тугоплавкие металлы и их сплавы (Ta, Cr, W, Nb и др.) и керамика.

Технологичность конструкций лопаток турбины. В настоящее время литье по выплавляемым моделям (в оболочковые формы) является единственным методом, который позволяет в промышленном масштабе наиболее экономично получать заготовки рабочих и сопловых лопаток турбины с точностью и шероховатостью трастовых поверхностей заготовки, не нуждающихся в последующей их обработке.

Основные технологические требования к конструкции литых лопаток и заготовке, обеспечивающие высокое качество лопаток, сводятся к следующему. Чтобы избежать коробления пера лопатки и образования рыхлот и раковин, рекомендуется монолитные лопатки отливать с максимальной толщиной пера не более 9 мм. Если по конструкции лопатка должна иметь максимальную толщину более 9 мм, то необходимо перо лопатки выполнять полым. В бандажной полке следует предусматривать технологические отверстия для фиксации керамических стержней в литейной форме.

В конструкции лопаток необходимо предусматривать радиусы скруглений (галтели). В местах перехода от пера к замковым полкам или хвостовикам радиус скругления должен быть в пределах 3...5 мм; в турболизаторах, расположенных в полости, не менее 0,5 мм. Толщину стенок необходимо выполнять с уклоном 0,5 мм на 100 мм длины пера. Толщина стенок пера допускается не менее 0,6 мм.

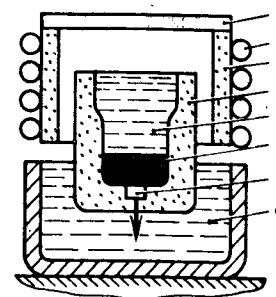
Штырьки, связывающие стенки корыта и спинки, необходимо располагать в шахматном порядке. Расстояние между штырьками и диаметр штырьков должны быть не менее 4 и 2 мм соответственно. Сопряжение штырьков со стенками корыта и спинки пера следует оформлять галтелями.

16.2. Построение технологических процессов изготовления лопаток турбины

Заготовки для лопаток турбины. Лопатки турбины изготавливают из литейных и, реже, из деформируемых жаропрочных сплавов.

Рис. 16.3. Схема получения отливок высокоскоростной направленной кристаллизацией в вакуумной или нейтральной среде:

1 — крышка из графитового волокна; 2 — нагреватель; 3 — изолятор; 4 — керамическая форма; 5 — жидкий металл ($1560 \pm 30^\circ\text{C}$); 6 — поверхность раздела расплава и твердого металла (зона градиента температур); 7 — затравка (сплав NiW); 8 — жидкометаллический кристаллизатор (расплав алюминия, 679...800°С)



Заготовки из литейных сплавов получают литьем по выплавляемым моделям (прецизионное литье в оболочковые формы), а из деформируемых сплавов — горячим объемным деформированием.

Литые заготовки лопаток турбины. Серийное изготовление лопаток турбин из литых заготовок является более экономичным, чем из штампованных. При вакуумной плавке и заливке форм технологические отходы металла (литниковая система, выпоры и др.) не окисляются, их можно повторно использовать при плавке, а это снижает расход дорогостоящего металла. Себестоимость изготовления лопаток при этом снижается до 60%.

Заготовки-отливки лопаток различают: обычные, с поликристаллической или равновесной структурой; с направленной кристаллизацией и монокристаллические, имеющие столбчатую дендритную структуру.

Литье с направленной кристаллизацией в оболочковые формы. Литье с направленной кристаллизацией (НК) в настоящее время является одним из основных методов получения литых заготовок лопаток ротора из жаропрочных сплавов.

Схема получения отливок с НК представлена на рис. 16.3.

Направленно-кристаллизационные отливки ориентацию структуры (зерен) приобретают в процессе прохождения оболочковой формы с жидким металлом фронта кристаллизации через зону градиента температур на поверхности раздела расплава и твердого металла. Кристаллизация металла в керамической форме строго контролируется путем создания соответствующего продольного и поперечного градиента температур.

Высокоскоростная НК осуществляется при градиенте температур на поверхности раздела расплава и твердого металла $G 40...50^\circ\text{C}/\text{мм}$ со скоростью кристаллизации $v_{кр} \approx 20...40$ мм/мин, а **обычная НК** — при $G \approx 30^\circ\text{C}/\text{мм}$ и $v_{кр} \approx 0,5...1,0$ (5,0) мм/мин. Отливки с НК получают более плотными и однородными по всем сечениям пера. Перо отливки лопатки образуется из 1...3 зерен, без поперечных границ зерен, по которым чаще всего происходит разрушение лопаток в условиях эксплуатации. Ресурс работы лопаток с НК в два-три раза выше по сравнению с лопатками с поликристаллической равновесной структурой.

Более перспективными являются отливки с монокристаллической структурой, не содержащей поперечных границ зерен. Ресурс работы у этих лопаток выше, чем у лопаток с НК. Технология и оборудование для

изготовления монокристаллических лопаток ротора турбины в настоящее время отрабатываются в НИИ совместно с промышленностью.

Отливки лопаток с равновесной структурой, с НК и монокристаллические изготавливают прецизионным литьем в оболочковые формы.

Прецизионное литье в оболочковые формы обеспечивает получение литых заготовок без припуска на механическую обработку пера лопатки с шероховатостью поверхности $Ra = 5...2,5$ мкм. Припуск по замку $0,8...1,2$ мм на сторону. КИМ литой лопатки около $0,6$.

Сущность процесса литья заключается в следующем. Из легкоплавких или легкорастворимых в воде материалов в прессформе получают модель лопатки, ее покрывают специальной силикатной обмазкой, которая при высыхании образует на модели лопатки корку (оболочку). Далее из модели, покрытой керамической обмазкой, удаляют модельную массу (вымывают горячей водой или выплавляют) и прокаливают при высокой температуре, с тем чтобы превратить силикатное покрытие в прочную керамическую оболочку. Место, занятое ранее моделью, образует полость, в которую и заливают расплавленный металл заготовки.

При изготовлении пустотелой отливки внутри литейной формы помещают *керамический стержень*, образующий внутреннюю полость охлаждаемой лопатки. Отлитые заготовки лопаток извлекают из оболочки, удаляют стержень, зачищают и после тщательного контроля подвергают термообработке.

Технология изготовления отливок лопаток по выплавляемым моделям имеет много вариантов как в выполнении основных операций, так и по составу применяемых модельных и формовочных материалов.

Рассмотрим *технологический процесс изготовления отливок рабочих охлаждаемых лопаток с направленной кристаллизацией*.

В технологическом процессе изготовления отливки охлаждаемой лопатки можно выделить следующие основные этапы.

1. Изготовление керамического стержня.
2. Изготовление модели лопатки.
3. Сборка моделей лопаток в блоки (секции).
4. Приготовление огнеупорной суспензии, окраска и сушка секций лопаток.
5. Удаление модельной массы из оболочек.
6. Прокалка оболочек.
7. Плавка металла, заливка оболочек и кристаллизация отливок.
8. Разрезка секций.
9. Удаление керамических стержней.
10. Контроль отливок лопаток.

Изготовление керамических стержней. Стержни для отливок охлаждаемых лопаток изготавливают из электрокорунда разных марок (5, 12, 1410, 1420 и др.) с небольшой добавкой пластификатора ППЭ-10 (5%) и алюминиевого порошка АСД4 (5%). Стержень формируется в специальной прессформе под давлением $10...14 \cdot 10^3$ Па. Стержень, очищенный от облоя и прилипших частиц стержневой массы, кладут на $3...5$ мин в ванну с теплой водой ($42...52^\circ\text{C}$). Подогретый стержень закладывается в драйер и выдерживается в нем $3...5$ мин. Драйер состоит из двух половинок, имеющих

профиль спинки и корыта. Затем стержни укладываются в корыта; их уплотняют глиноземом и ставят в электропечь на прокалку.

После прокалики стержни зачищают, проверяют внешним осмотром для выявления раковин, трещин, сколов и утяжин, а также геометрические размеры и форму каждого стержня.

Очищенные от глинозема стержни пропитывают в растворе лака КО-815 с выдержкой до прекращения выделения пузырей воздуха и сушат при температуре $80...100^\circ\text{C}$ не менее 3 ч.

Изготовление моделей лопаток. Материалом для приготовления модельных масс служат парафин, стеарин, канифоль, церезин, полистирол, пластмассы, битум нефтяной и др. В настоящее время в основном используется *модельная масса*, состоящая из карбомида (мочевина) марки А (ГОСТ 2081-75); *селитры калиевой* марок А, Б, В (ГОСТ 19790-74); *силикагеля технического* (ГОСТ 3956-76). Модели лопаток формируются в специальных разъемных прессформах, обычно стальных. Размеры рабочей зоны прессформы должны учитывать усадку модельного состава и металла отливки при охлаждении. Рабочие поверхности прессформы покрываются тонким слоем смазки (смесь 50 % этилового спирта и 50 % касторового масла). Стержень вкладывают в матрицу корыта прессформы. Собирают прессформу, вакуумируют и прессуют модель лопатки. После зачистки облоя, заусенцев и контроля модели собирают в блоки (секции).

Сборка моделей лопаток в блоки производится в кондукторе, чем обеспечивается высокая точность взаимного расположения модели лопатки и литниковой системы.

Процесс изготовления керамической оболочки состоит из покрытия моделей керамической обмазкой, обсыпки электрокорундом и сушки, сначала на воздухе, а затем в атмосфере аммиака.

Для приготовления керамической обмазки применяют *электрокорунд* и *этилсиликат* ЭТС-40*.

Керамическая оболочка в зависимости от размеров лопатки формируется из $7...12$ последовательно наносимых слоев. Для этого блоки моделей погружают два-три раза в ванну с керамической обмазкой. Затем их посыпают электрокорундом для лучшей связи между слоями и предотвращения растрескивания. Толщина обмазки при этом составляет $1...1,5$ мм. При нанесении первого слоя суспензия удаляет с поверхности моделей адсорбированный воздух и смачивает поверхность блока. При нанесении последних слоев оболочка впитывает жидкую составляющую суспензии, вследствие чего последняя постепенно густеет, повышается ее вязкость. Последний слой — закрепляющий — наносят без обсыпки зернистым материалом. Это повышает общую прочность оболочки, предотвращает осыпание поверхностных зерен при выплавлении моделей. За естественной сушкой блоков в вытяжном шкафу в течение двух часов следует ускоренная сушка в течение $40...50$ мин в аммиачно-газовой среде. Аналогично наносятся остальные слои.

Контролируют сушку каждого слоя обмазки погружением пробной

* Этилсиликат $\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4$ — этиловый эфир ортокремниевой кислоты.

модели в гидролизированный этилсиликат, после чего обмазка не должна отставать и растрескиваться.

Удаление модельной массы из оболочек. Мочевина удаляется из чаши при давлении воды $(1,5...2) \cdot 10$ Па и температуре $25...35^\circ\text{C}$ в течение не менее 5 мин. Из лопаток мочевины удаляется при давлении $(0,8...1,5) \cdot 10$ Па и температуре $25...35^\circ\text{C}$ в проточной воде не менее 10 мин. Оболочка промывается в ванне в 3...5 литрах подкисленной воды в течение 5...10 мин.

Прокатка оболочек. После выплавления модельной массы формы сперва сушат, а затем обжигают. Оболочки обжигают в камерных печах. Загружают оболочки на под печи при температуре нагрева не выше 700°C , затем температура повышается до $1080^{+260}_{-10}^\circ\text{C}$, выдержка 6...8 ч. Затем оболочки охлаждаются вместе с печью до температуры 800°C , а далее — по плану.

Плавка металла, заливка оболочек и кристаллизация отливок. Эта часть технологического процесса изготовления заготовок-отливок рабочих лопаток турбины выполняется на вакуумной установке модели УВНК-8П методом высокоскоростной направленной кристаллизации. Установка имеет следующие технические характеристики: мощность установки 486 кВт; емкость тигля 10 кг; скорость вертикального перемещения оболочковых форм $0,1...15$ мм/мин; максимальная температура кристаллизации 1000°C .

Установка состоит из следующих функциональных узлов: плавильной камеры, в которой размещены индукционная плавильная печь, печь подогрева оболочковых форм и жидкометаллический кристаллизатор; механизма вертикального перемещения, обеспечивающего подачу блока форм из зоны нагрева и заливки в зону кристаллизации; вакуумно-газовой системы для создания рабочей среды в плавильной и шлюзовой камерах; системы водоохлаждения элементов и узлов установки; шлюзовой камеры для подачи в плавильную камеру блока форм под заливку и выгрузки готовых отливок без нарушения параметров ее среды.

Металл для отливок плавят в индукционных высокочастотных печах в условиях вакуума (10^{-3} мм рт. ст.) при температуре нагрева $1560 \pm 30^\circ\text{C}$. Расплавленный металл заливают в оболочковые формы, предварительно нагретые до 1100°C .

Процесс направленной кристаллизации осуществляется путем постепенного погружения залитых оболочек в ванну жидкого алюминия марки А66 с температурой расплава $670...800^\circ\text{C}$ (жидкометаллический рекристаллизатор) со скоростью 20 ± 2 мм/мин.

Закристаллизованные блоки охлаждают на воздухе не менее четырех часов. Керамику от отливок секции отбивают вручную. Отливки отрезают от литниковой системы абразивным отрезным кругом толщиной 3...5 мм, обдувают электрокорундом, полируют, осуществляют контроль на макроструктуру, а на специально отлитых образцах проверяют химический состав и механические свойства (твердость, сопротивление растяжению, пластичность, ударную вязкость).

Удаление керамических стержней из отливок производится растворением их в расплаве бифторида калия (ТУ 6-02-1217-81) при температуре нагрева $350...370^\circ\text{C}$ в течение 1,5...4,5 ч с последующей тщательной про-

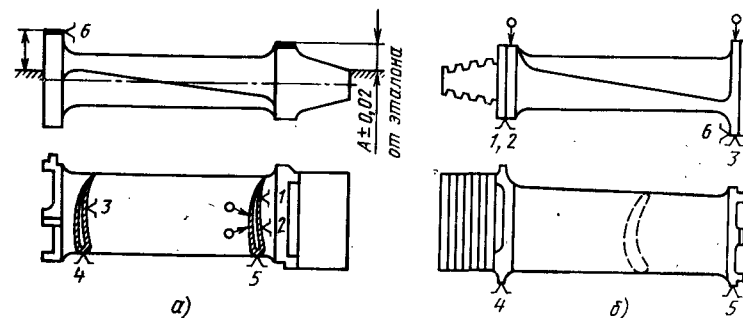


Рис. 16.4. Схемы базирования литой охлаждаемой рабочей лопатки с бандажной полкой при обработке елочного профиля хвостовика:

а — первые технологические базы; б — основные технологические базы

мывкой в воде. Бифторид калия токсичен, поэтому работа с ним требует соблюдения правил охраны труда.

Контроль отливок лопаток осуществляется прежде всего для выявления внутренних и внешних дефектов в металле лопаток и для проверки в отливках полноты удаления остатков стержневой керамики.

Контроль внутренних дефектов в материале каждой отливки осуществляется рентгеновским методом. Для этого внутреннюю полость отливки заполняют контрастирующим гранулированным порошком из сплава ЖС6У, предварительно просушенным при температуре $150...180^\circ\text{C}$ в течение 1,5...2 ч. Отливки, заполненные порошком, подвергают также рентгеноконтролю на полноту удаления стержневой керамики.

После рентгеноконтроля материала пера отливок предварительно полируют абразивной лентой на станках ЛВП-314, промывают в 5 %-ном водном растворе вертолина* (температура $80...90^\circ\text{C}$). Затем отливки промывают в сетевой воде, после чего перо лопаток подвергают жидкоабразивной обработке (АЖО) на станке ЭЗ-106. Длительность цикла на одной позиции 45...60 с. Давление пульпы $3,5 \cdot 10$ Па. Затем профиль пера промывают сетевой водой и отливка поступает на окончательный контроль профиля пера и внешних дефектов материала методом ЛЮМ-10В (открытые трещины, поры и коррозионные поражения).

Технологические базы у заготовок отливок охлаждаемых рабочих лопаток турбины. Первичными технологическими базами для обработки основных базовых поверхностей рабочей лопатки с бандажной полкой являются: установочная база — поверхности крайних сечений корыта (три опорные точки 1...3); направляющая база — входная кромка пера (две опорные точки 4, 5) и опорная база на поверхности бандажной полки со стороны пера (опорная точка 6). Зажим лопатки в приспособлении на спинке (рис. 16.4, а).

Основные технологические базы для обработки пера, хвостовика и бандажной полки приведены на рис. 16.4, б: установочная база — поверхности хвостовика и бандажной полки (три опорные точки 1...3);

*Вертолин 74, марка А (ТУ 38-109-60-86).

направляющая база — боковые поверхности хвостовика и бандажной полки со стороны входной кромки (две опорные точки 4, 5) и опорная база — поверхность бандажной полки со стороны спинки (опорная точка 6).

Технологическими базами у литых охлаждаемых рабочих лопаток без бандажной полки являются: установочная база — поверхности крайних сечений спинки или корыта (три опорные точки 1..3); направляющая база — входная кромка (две опорные точки 4, 5) и опорная база — поверхность хвостовика со стороны корыта (опорная точка 6).

Основные этапы механической обработки литых рабочих лопаток приведены ниже в типовом технологическом процессе, разработанном НИИД.

Типовой технологический процесс механической обработки лопаток ротора турбины из литых заготовок. Заготовка — литье в оболочковые формы с направленной кристаллизацией или с равноосной поликристаллической структурой. Материал отливок — литейные жаропрочные сплавы типа ЖС6У-ВИ, ЖС6К, ВЖЛ12У, ЖС26 и др. Профиль пера, проточная поверхность полки хвостовика и бандажной полки, карманы на хвостовике отливаются без припуска на механическую обработку*.

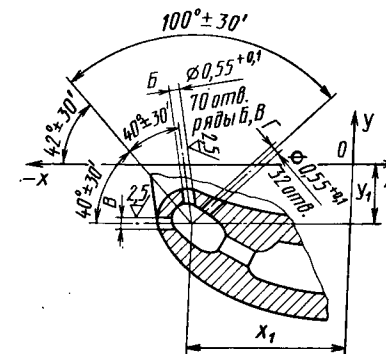
Базами для механической обработки и контроля отливок служат профиль спинки в крайних сечениях пера, входная кромка и точка С на проточной поверхности бандажной полки. Схема механической обработки литой рабочей лопатки с бандажной полкой в типовом технологическом процессе представлена основными его этапами с указанием оборудования, необходимого для их заполнения.

Этапы технологического процесса механической обработки лопатки турбины

1. Обработка перфорационных отверстий на входной кромке пера электронно-лучевым (электронно-лучевая установка типа ТР450-М150-ГТТР) или электроэрозионным методом (электроэрозионный станок 4Г721М или 4Д722А) (рис. 16.5).
2. Гидроабразивная обработка внутренней полости и отверстий на входной кромке.
3. Шлифование базовых поверхностей на полке хвостовика и бандажной полке со стороны спинки, корыта, входной и выходной кромок (плоскошлифовальный станок 3Д722).
4. Шлифование клина хвостовика (плоскошлифовальный станок 3Д722).
5. Шлифование (фрезерование) слочного профиля хвостовика (специальный шлифовальный станок SS-13 фирмы „Эльб-Шлифф“ или продольно-фрезерный двухшпиндельный ДФ-392М).
6. Шлифование полки, боковых и торцевых поверхностей хвостовика (плоскошлифовальный станок 3Г71М или 3Е711В).

* Литая заготовка лопатки турбины спроектирована в соответствии с ОСТ 1.41793—78 „Допуски на размеры и шероховатость литых необрабатываемых поверхностей“ и ОСТ 1.41154—72 „Допуски на размеры и припуски на механическую обработку“.

рис. 16.5. Операционный эскиз обработки перфорационных отверстий на входной кромке пера лопатки



7. Шлифование поверхностей бандажной полки (плоскошлифовальные станки 3Д722, 3Г71М, 3Е711В).

8. Шлифование профиля лабиринта бандажной полки и заднего торца хвостовика (всего комплекта лопаток в технологическом диске; специальный шлифовальный станок с ЧПУ СШЛП-1)

9. Стабилизирующий отпуск (вакуумная электропечь FHV-90GS фирмы „Улвак“ (Япония) или СЭВ-5,5/11, 5-М1).

10. Контроль внутренней полости по расходу воздуха через лопатку.

11. Окончательный контроль. Контроль методом ЛЮМа.

12. Нанесение жаростойких многокомпонентных покрытий типа Ni Cr AlY на поверхности пера и полок хвостовика и бандажной (вакуумно-плазменная установка модели МАП-2 или электронно-лучевая установка модели УЭ175).

Диффузионный отжиг лопаток (вакуумная электропечь FHV90GS фирмы „Улвак“ или СЭВ-5,5/11,5-М1).

Заготовки рабочих лопаток турбин из деформируемых сплавов получают горячей штамповкой, прессованием (выдавливанием), прокаткой и вальцеванием, стремясь к обеспечению в заготовке продольной ориентации структуры металла. Наиболее отработанным методом является горячая штамповка заготовок, которую проводят обычно на ковочных прессах мощностью 15...50 МН, кривошипных, фрикционных и гидравлических прессах-молотах в открытых или закрытых штампах. Заготовки штампуют чаще с бандажной полкой на конце пера и без нее, с облоем и без облоя, сплошные (не охлаждаемые). Отличие способа безоблойной штамповки от обычного сводится к более жесткому дозированию металла исходной заготовки.

При выборе припуска на механическую обработку рабочих лопаток турбин можно руководствоваться рекомендациями НИИДА: для лопаток длиной до 200 мм припуск по профилю пера на сторону составляет $0,8^{+0,5}_{-0,2}$ мм и $1,5^{+0,5}_{-0,2}$ мм для остальных поверхностей хвостовика и бандажной полки, а для лопаток длиной 200...350 мм — соответственно $1,0^{+0,5}_{-0,2}$ и $2,5^{+0,5}_{-0,2}$ мм.

Заготовки лопаток турбин с постоянным профилем по длине пера можно получить методом выдавливания (экструзия). Такой метод обес-

печивает получение заготовок лопаток с минимальными припусками и продольную ориентацию структуры. Выдавливание заготовок может производиться на стандартном кузнечно-прессовом оборудовании: гидравлических, механических или фрикционных прессах, на горизонтально-ковочных машинах и др. Выдавливаемый материал нагревается до температуры, близкой к верхнему пределу ковочного интервала. Рекомендуется применять индукционный нагрев. Во избежание разрыва металла у тонких кромок пера в связи с более быстрым их охлаждением в конструкции штампа предусматриваются „карманы”, обеспечивающие некоторое утолщение „кромки”. Излишний металл, заполняющий карманы, удаляется механической обработкой.

Для получения лопатки с переменным профилем экструдированную заготовку подвергают *холодной прокатке*. Между операциями прокатки заготовки необходимо отжигать для восстановления пластичности и снятия остаточных напряжений.

Технологические базы подразделяют на первичные (т. е. исходные поверхности заготовки лопатки) и основные технологические базы. *Первичными технологическими базами* при обработке любых лопаток ГТД являются спинка или корыто пера лопатки (имеющие минимальный припуск или вообще без припуска на механическую обработку), входная кромка и ряд поверхностей на хвостовике и бандажной полке; они указываются в чертеже заготовки. Первичные базы используются обычно для обработки основных технологических баз.

В зависимости от конструкции и размеров лопаток существует много вариантов *основных технологических баз*. Наибольший интерес представляют два из них. Для лопаток без бандажных полок чаще всего используют в качестве основных баз так называемые „*плоские*” базовые поверхности (см. рис. 2.5): установочная база — плоскость замка со стороны спинки (две опорные точки 1, 2) и поверхность на технологической бобышке (опорная точка 3); направляющая база — входная кромка или боковая поверхность хвостовика со стороны выходной (входной) кромки (две опорные точки 4, 5) и опорная база — отверстие в технологической бобышке (опорная точка 6). Основные базы используются для обработки пера и хвостовика лопатки.

Для точных штамповок лопаток с бандажными полками, имеющими припуск по профилю пера до 1 мм на сторону, первичной технологической базой является профиль пера. Относительно профиля спинки и корыта, обеспечивая равномерное распределение припуска по профилю пера, накернивают три центровые отверстия (установочная база): два на торце хвостовика и одно на торце бандажной полки. Используя эту первичную технологическую базу, обрабатывают основные базовые поверхности хвостовика и бандажной полки со стороны спинки и входной кромки. Пери, хвостовик с елочным профилем замка и бандажная полка обрабатываются от основных технологических баз. В качестве примера на рис. 16.4, б показана схема базирования лопатки при фрезеровании (шлифовании) елочного профиля хвостовика.

В настоящее время НИИДом разработаны типовые технологические процессы изготовления лопаток ГТД. Их внедрение с использованием уни-

фицированной оснастки позволяет значительно сократить сроки подготовки производства новых двигателей, снизить стоимость изготовления технологической оснастки и трудоемкость производства лопаток, а также повысить качество и стабильность их изготовления.

Типовой технологический процесс механической обработки лопаток ротора турбины из деформируемых жаропрочных сплавов. Лопатки ротора турбины из деформируемых сплавов обычно сплошные (неохлаждаемые) и с бандажной полкой. Эти лопатки изготавливают из точных заготовок с уменьшенными припусками по профилю пера под механическую обработку.

Технологический процесс получения *точной штамповки лопаток турбины* включает: высадку на горизонтально-ковочных машинах раздельно хвостовика и бандажной полки; горячую вальцовку на ковочных вальцах; предварительную штамповку на кривошипных и винтовых прессах и окончательную штамповку на винтовых прессах. Для лопаток длиной до $L \leq 200$ мм номинальный припуск по перу составляет $0,8^{+0,5}_{-0,2}$; КИМ — примерно 0,25.

Основные этапы типового технологического процесса механической обработки заготовок лопаток турбины из деформируемых сплавов

1. Отрезка облоя по контуру лопатки (абразивная, электрохимическая или светолучевая).
2. Распределение припуска по профилю пера с помощью оптико-механического прибора ПОМКП-4 и накернивание двух точек на торце хвостовика и одной точки на торце бандажной полки (рис. 16.6).
3. Фрезерование (протягивание) и шлифование базовых поверхностей хвостовика и бандажной полки со стороны спинки и входной кромки и со стороны корыта и выходной кромки (продольно-фрезерный станок 7720, плоскошлифовальный полуавтомат 3Д722).
4. Фрезерование входной и выходной кромок, поверхностей сопряжения пера с хвостовиком и бандажной полкой раздельно со стороны спинки и корыта (вертикально-фрезерный станок с ЧПУ 6Р13Ф3 или 6М13ГН-1Н).
5. Фрезерование (протягивание) клина хвостовика (вертикально-фрезерный станок 6Т12 или горизонтально-протяжный 7Б57 или СПС-40).
6. Электрохимическая обработка профиля пера, карманов (раздельно на двухсторонних объемно-копировальных станках ЭХС-10А или ЭХС-10Б; ЭКУ-320).

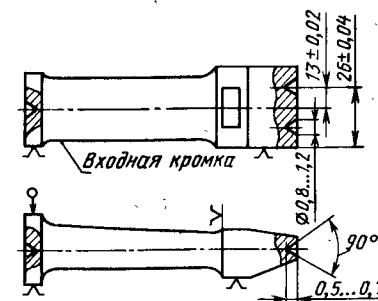


Рис. 16.6. Накернивание торцев хвостовика и бандажной полки при распределении припуска по профилю пера

7. Фрезерование входной и выходной кромок, поверхностей сопряжения пера с хвостовиком и бандажной полкой со стороны спинки и корыт раздельно (вертикально-фрезерный станок с ЧПУ 6Р13Ф3 или 6М13ГН-1Н).

8. Шлифование абразивной лентой профиля пера со стороны спинки и корыта, поверхностей сопряжения пера с хвостовиком и с бандажной полкой со стороны корыта и спинки раздельно (шлифовально-копировальные полуавтоматы ХШ-185М, ХШ-186, ленточно-шлифовальный полуавтомат ЗЛШ-41).

9. Полирование пера, кромок, поверхностей сопряжения пера с хвостовиком и с бандажной полкой со стороны корыта и спинки (бабка С-86).

10. Травление и контроль прижогов и других внешних дефектов сплава лопаток.

11. Фрезерование (предварительное и окончательное) или шлифование елочного профиля хвостовика (фрезерные двухшпиндельный ДФ-392АС2 и одношпиндельный ДФ-392АС1 полуавтоматы; специальный шлифовальный полуавтомат SS-13 фирмы „Эльб-шлиф“).

12. Фрезерование боковых и торцевых поверхностей, карманов хвостовика.

13. Электроимпульсная обработка контура бандажной полки (электроимпульсный копировально-прошивочный станок 4Б723М).

14. Шлифование поверхностей бандажной полки (плоскошлифовальный станок ЗД722).

15. Полирование абразивной лентой профиля пера (ленточно-полировальный виброконтактный полуавтомат ЛВП-4).

16. Стабилизирующий отпуск (вакуумная электропечь типа FHV-90GS фирмы „Улвак“ или СЭВ-5,5/11,5-М1).

17. Контроль ЛЮМа внешних дефектов материала лопаток.

Сопловые лопатки турбины обычно литые, двухзамковые, охлаждаемые с перфорацией по перу лопатки.

Заготовку-отливку изготавливают точным литьем по выплавляемым моделям. Проточная часть лопатки (перо) отливается без припуска на механическую обработку. Припуск по замкам лопаток (полки, цапфы) $0,8^{+0,5}_{-0,2}$.

16.3. Выполнение основных операций технологического процесса изготовления лопаток турбины

Независимо от различия в конструкции лопаток турбины их технологические процессы механической обработки можно представить следующими схемами: рабочие лопатки турбины из *штампованных заготовок* — обработка баз, ЭХО и полирование пера, обработка хвостовика и бандажной полки; рабочие лопатки турбины из *литых заготовок* — обработка хвостовика, перфорационных отверстий на пере, бандажной полки; *сопловые лопатки* — обработка поверхностей полок, перфорационных отверстий и входной кромки.

В технологии производства лопаток ГТД все шире используются физико-химические методы обработки (ультразвуковые, электрохимические, ионно-плазменные, светолучевые и др.).

Обработка базовых поверхностей. Базовые плоскости на хвостовике и технологической бобышке фрезеруют, шлифуют, реже протягивают, обеспечивая точность размеров в пределах 8...13-го качества и шероховатость поверхности $Ra = 2,5...0,63$ мкм.

Фрезерование с последующим шлифованием считается основным методом обработки технологических баз рабочих лопаток турбины. При обработке стремятся применять наиболее производительные методы фрезерования: одновременное фрезерование нескольких деталей набором фрез, непрерывное фрезерование торцевой фрезой на вертикально-фрезерном станке с круглым столом или на станках барабанного типа. После фрезерования плоские стороны шлифуют обычно на карусельных плоскошлифовальных станках. Учитывая плохую обрабатываемость лезвийным инструментом жаропрочных лопаточных сплавов, особенно литейных, обработку базовых и других поверхностей лопатки предпочтительнее производить шлифованием.

Базовые поверхности шлифуют абразивными кругами на обычных плоскошлифовальных станках и электроалмазным шлифованием на специальных станках типа ЭШЛ-301 или на модернизированных плоскошлифовальных станках. *Электроалмазное шлифование* совмещает электрохимическое (анодное) растворение и механическое (абразивное) резание, обеспечивает увеличение производительности обработки и уменьшение износа абразивного круга (вследствие анодного растворения обрабатываемого металла), повышает точность и снижает шероховатость обрабатываемых поверхностей.

После обработки баз фрезеруют (шлифуют) входные и выходные кромки и предварительно обрабатывают клин хвостовика, поверхность которого используется для токоподвода при ЭХО пера лопатки.

Обработка елочного замка лопатки. Елочный замок хвостовика рабочей лопатки турбины обрабатывают в два этапа: вначале обрабатывают клин (скосы), а затем — елочный профиль замка.

Клин обрабатывают фрезерованием, протягиванием (редко) и абразивным и электроалмазным шлифованием.

Клин фрезеруют в две операции: предварительно и окончательно. Предварительно фрезеруют клин на вертикально-фрезерном станке торцевой фрезой в два перехода, одновременно обрабатывая несколько деталей. Окончательно клин фрезеруют на горизонтально-фрезерном станке сборной фасонной фрезой.

Протягивание клина производят одновременной обработкой обеих его сторон на горизонтально-протяжном станке типа 7А540. Протягивание клина хвостовика не нашло широкого применения в производстве лопаток из-за плохой обрабатываемости жаропрочных сплавов и низкой стойкости протяжек.

Абразивное и электроалмазное шлифование — наиболее перспективные методы обработки клина; оно осуществляется на плоскошлифовальных станках типа ЗД722 или на двухшпиндельных станках типа ЭШЛ-301.

Елочный профиль замка обрабатывают фрезерованием, шлифованием, протягиванием (редко) или сочетанием этих методов обработки.

Фрезерование елочного профиля замка является наиболее простым способом обработки елочного профиля замка, не требующим специального оборудования и сложной оснастки, что обусловило ему широкое применение на заводах. Обработка ведется фасонной фрезой (методом копирования) на горизонтально-фрезерном станке типа ДФ-392АС1. Лопатка уста-

навливается в кассету, которая закрепляется в приспособлении, устанавливаемом на столе станка. Операция выполняется в два перехода: сначала фрезеруют одну сторону профиля замка, затем кассету с обрабатываемой лопаткой переворачивают в приспособлении и обрабатывают другую сторону. Преимущество установки и закрепления лопатки в кассете — простота конструкции и надежность ее в работе. Недостатки — деформация лопатки и самой кассеты от усилия зажима, что приводит к снижению точности обработки; переустановка кассеты утомляет рабочего (ее масса около 6...8 кг); ограниченные возможности для механизации приспособления.

Фреза — фасонная, конической или цилиндрической формы, из твердых сплавов ВК6, ВК60М, работает методом попутного фрезерования.

Более высокая производительность и точность относительного расположения обеих сторон профиля замка лучше всего может быть достигнута при одновременной обработке обеих сторон замка на станках типа ДФ-392АС2 (двухшпиндельный), ГФ-609 и ГФ-643 (четырёхшпиндельные).

Профиль замка шлифуют профилированным высокопористым абразивным кругом на специальных станках. Шлифование — наиболее перспективный метод обработки елочного профиля замка в лопатках из труднообрабатываемых сплавов. Шлифование елочного замка профилированным абразивным кругом, называемое еще глубинным шлифованием, обеспечивает более высокую точность профиля замка, чем фрезерование; не требует дорогостоящего режущего инструмента. На этой операции хорошо зарекомендовали специальные шлифовальные станки фирмы „Эльб-шлиф“ модели SS-13 — двухшпиндельные, с горизонтальным расположением шпинделей, с автоматическим циклом для одновременной обработки профиля замка с двух сторон у четырех лопаток. Заготовка лопатки устанавливается в многоместное приспособление, елочный профиль шлифуется в три перехода. Перед чистовым переходом обязательная правка абразивного круга алмазным роликом (алмаз синтетический АС-65Т). Точность обработки елочного профиля по шагу зубцов 2...6 мкм, практически нулевое смещение гребенок.

Липецкий станкостроительный завод налаживает производство отечественных станков подобного типа: модель ЛШ-220 для шлифования елочного профиля с одной стороны замка (предварительно и окончательно) и модель ЛШ-232 для шлифования замка одновременно с двух сторон у нескольких лопаток с циклической правкой абразивного круга в процессе шлифования.

Протягивание елочного профиля замка, несмотря на его высокую производительность, не нашло применения в серийном производстве лопаток из-за налипания стружки на переднюю грань зуба протяжки, малой стойкости протяжек, трудностей их комплектования и замены после переточек, высокой стоимости комплекта из 4...6 протяжек.

Сопловые лопатки. Плоскости полок верхнего и нижнего замков литых сопловых лопаток обрабатывают *шлифованием* на универсальных и специальных плоскошлифовальных станках. Лопатки на первых операциях обычно базируются поверхностью корыта в приспособлениях кассетного типа.

Обработка пера рабочих лопаток турбины. Пера рабочих лопаток из

деформируемых жаропрочных сплавов сначала подвергается ЭХО, а затем шлифуется и полируется абразивной лентой. В литых лопатках перо шлифуют и полируют или только полируют. Завершающей обработкой любой рабочей лопатки является нанесение жаростойкого покрытия на перо лопатки.

ЭХО пера у штампованных лопаток турбины является одним из наиболее эффективных методов обработки сложнофасонных поверхностей деталей (более подробно — см. подразд. 14.2). ЭХО обеспечивает точность пера (отклонение профиля спинки и корыта от расчетного) — 0,15...0,3 мм; шероховатость обработанной поверхности $R_a = 1,25...0,63$ мкм; не создает наклепа и остаточных напряжений в лопатке.

У многих жаропрочных сплавов после ЭХО обнаруживается растравливание по границам зерен глубиной до 0,03 мм, которое обычно с увеличением плотности тока уменьшается. Следы растравливания удаляют последующим шлифованием абразивной лентой и полированием.

Пера литых лопаток, не имеющих в заготовке припуска на механическую обработку, чаще всего подвергается только безразмерному виброабразивному или жидкоабразивному полированию для уменьшения шероховатости литой поверхности пера.

Шлифование пера абразивной лентой. Пера лопаток абразивным кругом не шлифуют. Шлифование абразивным кругом вызывает прижоги поверхностного слоя и низкую точность профиля пера из-за неравномерного износа абразивного круга. По этой причине перо лопаток турбины и компрессора шлифуют абразивной лентой на копировальных ленточно-шлифовальных станках. Поверхность спинки и корыта шлифуют одновременно или раздельно.

Шлифование абразивной лентой имеет ряд преимуществ по сравнению со шлифованием абразивным кругом. Эластичная абразивная лента обеспечивает равномерное снятие припуска по всей шлифуемой фасонной поверхности детали. Скорость ленты не зависит от износа, в то время как при износе абразивного круга его диаметр уменьшается, что сказывается на точности и эффективности обработки. Рабочая поверхность ленты может быть в несколько раз больше рабочей поверхности круга, что дает возможность повысить производительность и улучшить условия охлаждения. Шлифование абразивными лентами с охлаждением минеральным маслом или эмульсией в большинстве случаев сопровождается возникновением в поверхностном слое детали сжимающих остаточных напряжений, в то время как при шлифовании кругами возникают преимущественно растягивающие остаточные напряжения. Кроме того, смена лент легче и проще смены круга, ленты безопаснее в работе.

Поверхности пера шлифуются лентой методом обкатки с помощью кулачков-копиров. Обкатка пера лопатки кулачком производится либо путем качания детали и кулачка вокруг неподвижной оси, либо в результате планетарного движения (качания) детали вокруг неподвижного кулачка.

Абразивная лента (рис. 16.7) представляет собой тканевую основу (саржа, диагональ, бязь), на одной стороне которой наклеен абразив, а другая пропитана аппретом для придания ткани определенной жесткости.



Рис. 16.7. Схема строения абразивной ленты с электростатическим нанесением зерен: 1 — основа; 2 — уток; 3 — клеевая связка; 4 — абразивные зерна; 5 — аппрет

Материал абразивных зерен — электрокорунд. При изготовлении водостойких лент применяют для связки синтетические смолы на основе фенола, различные лаки, жидкое стекло. Наибольшее распространение при шлифовании лопаток получили тонкослойные ленты, у которых толщина слоя в 1,5...2 раза больше поперечника зерна. Шлифование лентами обеспечивает шероховатость поверхности $Ra = 1,25...0,32$ мкм.

При шлифовании легированных и жаропрочных сталей и сплавов оптимальная скорость ленты 25 м/с, удельное давление 25...30 кН/м². Стойкость абразивной ленты в зависимости от принятых режимов и условий обработки 2...3 ч. Наиболее интенсивный съем металла наблюдается в первые 30 мин работы ленты.

Шлифование пера лопаток абразивными лентами осуществляется двумя методами: раздельным шлифованием поверхностей спинки и корыта широкой абразивной лентой; одновременным двухсторонним шлифованием поверхностей пера лопатки узкой абразивной лентой (ширина ленты 20...50 мм).

Раздельное шлифование широкой абразивной лентой поверхностей спинки и корыта является более производительным методом. Однако в связи с большим выделением тепла при шлифовании лентой и деформациями лопаток при раздельной обработке поверхностей пера этот метод уступает по точности обработки методу шлифования пера лопатки узкой абразивной лентой.

Широкой абразивной лентой шлифуют спинку лопаток на станках

ХШ-186М, корыто — на станках типа ХШ-185М, а также на станках типа 3813Д.

Схема шлифования абразивной лентой спинки пера лопатки на станке типа ХШ-186 приведена на рис. 16.8. Кассета с лопаткой закрепляется на столе, установленном на каретке, совершающей прямолинейное возвратно-поступатель-

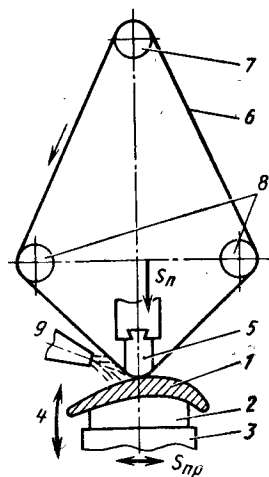


Рис. 16.8. Схема шлифования спинки пера рабочей лопатки турбины:

1 — обрабатываемая лопатка; 2 — стол; 3 — каретка; 4 — движение обкатки; 5 — копир (кулачок); 6 — абразивная лента; 7 — ведущий шкив; 8 — направляющие шкивы; 9 — подача СОЖ

ное движение. Абразивная лента огибает неподвижный копир, имеющий отраженную форму спинки (или корыта) лопатки. При сближении обрабатываемой лопатки с неподвижным кулаком лента врезается в деталь; начинается процесс шлифования спинки, в ходе которого, лопатке сообщается сложное комбинированное движение, состоящее из возвратно-поступательного движения каретки и движения обкатки. Подача копира на обрабатываемую лопатку может быть ручной или автоматической.

Узкими абразивными лентами шлифуют лопатки компрессора.

Обработка перфорационных отверстий в пере лопаток. Перфорирование пера охлаждаемых рабочих и сопловых лопаток турбины можно осуществить следующими физико-химическими методами обработки: *электроискровым* (электроэрозионным), *электронно-лучевым*, *электрохимическим* и *светолучевым*. Обработка перфорационных отверстий этими методами рассмотрена в подразд. 14.1, 14.2 и 14.6. Обработка отверстий малого диаметра ($\phi 0,3...0,6$ мм) сверлами в труднообрабатываемых жаропрочных сплавах не экономична.

16.4. Повышение ресурса и надежности работы лопаток турбины технологическими методами

Основными направлениями повышения ресурса и надежности работы лопаток турбины технологическими методами являются нанесение на перо лопатки жаростойких покрытий и ионно-лучевая обработка (ионная очистка и ионное легирование).

Защитные покрытия на перо лопатки наносятся следующими методами: диффузионным насыщением различных элементов, электронно-лучевым осаждением, вакуумно-плазменным напылением, ионным и лазерным легированием.

Диффузионные покрытия. Для лопаток турбины, работающих при температуре нагрева до 1000°С, чаще всего используются алитирование и хромоалитирование пера лопаток, надежно защищающие перо от высокотемпературной газовой коррозии в течение 1000 ч и более. При температуре нагрева более 1000°С на перо лопатки наносятся многокомпонентные жаростойкие покрытия.

Алитирование (диффузионное насыщение алюминием) осуществляют несколькими способами: в порошковых смесях с активатором; нанесением суспензии с последующим отжигом в жидких средах.

Алитирование в порошковых смесях проводят в герметичных контейнерах при температуре 850...1050°С в течение 2...6 ч. Толщина алитированного слоя 0,02...0,08 мм; твердость $НМ = 550...800$ Н; максимальная концентрация алюминия в поверхностном слое до 30% (массовых). Порошковая смесь имеет следующий состав: ферроалюминий (Fe Al содержащий 70...75% Al и 30...25% Fe) — 98% и хлористый аммоний (NH₄Cl, активатор) — 2% или порошок алюминия — 40%, оксид алюминия (Al₂O₃ — шамот) — 58% и хлористого аммония — 2%. Режим алитирования — 850°С, продолжительность 4 ч с последующим старением при этой температуре, выдержка 35 ч.

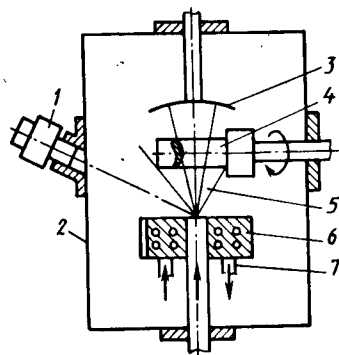


Рис. 16.9. Схема вакуумной камеры электроно-лучевой установки для нанесения покрытий на лопатки турбины: 1 — электронная пушка; 2 — вакуумная (рабочая) камера; 3 — подогреватель; 4 — лопатка; 5 — пары испаряемого металла; 6 — водоохлаждаемый тигель; 7 — трубопровод для подачи воды

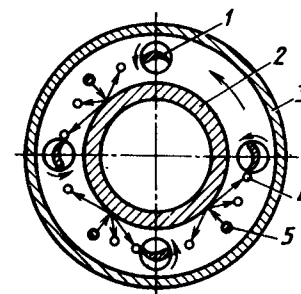
Алитирование осуществляется нанесением суспензии (для лопаток из сплавов ЖС6К, ЖСЗЛС, ВЖЛ12), состоящей из мелкодисперсного алюминиевого порошка АСД4 (225 г) и органической связки (350 мл коллокселина). Диффузионный отжиг — 950°C , выдержка — 2...6 ч.

Хромоалитирование (диффузионное насыщение алюминием и хромом) обеспечивает более высокую жаростойкость и механические свойства покрытия по сравнению с алитированием; осуществляется способом порошков в вакууме. Порошковая смесь имеет следующий состав: алюминия — 3...9%, хрома 41...47%, оксид алюминия — остальное. Режим хромоалитирования — нагрев до температуры 1050°C либо до 1200°C ; выдержка 2...5 ч; вакуум $p = 6,55...13,33$ Па. Максимальная концентрация элементов в поверхностном слое пера: алюминия до 15% и хрома 8...10%.

Многокомпонентные покрытия. Одно-двухкомпонентные защитные покрытия уже не удовлетворяют возрастающим требованиям к лопаткам турбин двигателей четвертого поколения. Для них используются многокомпонентные покрытия (МКП), основные из них: NiCrAlY (сплав СДП2: Ni — основа, Cr — 20%, Al — 13%, Y — 0,2...0,6%) и NiCoCrAlY (сплав СДП4: Ni — основа, Co — 6...9%, Cr — 14...22%, Al — 13...15%, Y — 0,1...1%). Эти покрытия на перо лопатки наносятся электронно-лучевым осаждением и вакуумно-плазменным напылением.

Электронно-лучевое осаждение МКП основывается на термическом испарении атомов. Пары металлов или сплавов, осаждаясь на перо лопатки, образуют покрытие. Для испарения тугоплавких металлов применяют электронно-лучевой нагрев. Схема рабочей камеры для нанесения МКП электронно-лучевым методом приведена на рис. 16.9. Электромагнитными линзами электронный луч направляется в испарительный тигель (медный водоохлаждаемый цилиндр 6, дном которого служит прутки испаряемого материала). Испаряемый металл осаждается на перо вращающейся лопатки, предварительно нагретой до 900°C в вакууме не ниже $8,75 \cdot 10^{-3}$ Па. Толщина покрытия 80...100 мкм, продолжительность напыления 48 лопаток — 2...6 ч. Преимущество этого метода — возможность нанесения покрытий, как металлических, так и любого нетокопроводящего материала (керамики и др.). Для нанесения многокомпонентных и композиционных покрытий используются электронно-лучевые установки типа УЭ175 и УЭ137 (рис.

Рис. 16.10. Схема нанесения вакуумно-плазменных покрытий на установке типа МАП-1: 1 — лопатка; 2 — катод; 3 — анод; 4 — атом; 5 — ион



5.5), разработанные в Институте электросварки им. Е. О. Патона.

Вакуумноплазменное нанесение МКП. Метод основан на явлении электродугового распыления покрытия в вакууме при давлении $p \geq 2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Материал катода (покрытие) преобразуется в поток плазмы. Конденсация вещества осуществляется из пароплазменной фазы. Процесс испарения, конденсации и ионной бомбардировки осуществляется в вакуумной камере, металлический корпус которой служит анодом (рис. 16.10). Катод изготавливается из материала наносимого покрытия. На лопатки подается отрицательный потенциал. В процессе напыления лопатка вращается вокруг своей оси и оси катода. Катод имеет вертикальное перемещение, позволяющее ему равномерно изнашиваться. Одновременно напыляется от 48 до 96 лопаток. Скорость испарения катода 220 г/ч. Толщина покрытия на перо — 60...80 мкм. Продолжительность нанесения покрытия 3 ч. Для нанесения МКП используются вакуумноплазменные установки типа МАП-1 и МАП-2.

Ионное легирование пера лопатки — наиболее перспективный метод повышения жаростойкости (сопротивления газовой высокотемпературной коррозии), усталостной прочности, сопротивления эрозионному разрушению. Для повышения жаростойкости имплантируются обычно редкоземельные элементы: лантан, гафний, иттрий и др. Ионному легированию можно подвергнуть перо лопатки без покрытий, но можно произвести ионное облучение до и после нанесения защитного покрытия, существенно повысив этим жаростойкость в условиях эксплуатации. Ионная очистка пера до нанесения жаростойких покрытий повышает их адгезиозные свойства. Описание процессов и технологического оборудования для нанесения защитных жаростойких покрытий и ионно-лучевой обработки дано в гл. 5.

16.5. Конструкция, технические условия и материалы лопаток компрессора. Классификация лопаток

Лопатки компрессора являются наиболее массовыми деталями. На некоторых двигателях их число достигает 1500 шт. и более.

В зависимости от назначения лопатки компрессора делятся на *рабочие* или лопатки ротора компрессора (рис. 16.11) и *лопатки статора компрессора*. Они изготавливаются в основном из алюминиевых и титановых

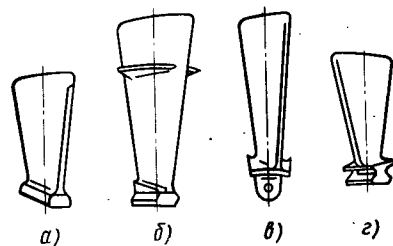


Рис. 16.11. Лопатки ротора компрессора: а — с хвостовиком типа ласточкина хвоста; б — с антивибрационной полкой; в — с шарнирным хвостовиком; г — с кольцевым трапецевидным хвостовиком

сплавов, высоколегированных сталей и жаропрочных сплавов. Длина лопаток на разных двигателях находится в пределах 15...1000 мм. Основную номенклатуру лопаток компрессора составляют лопатки длиной от 60 до 150 мм.

Основными конструктивными элементами, влияющими на технологию изготовления лопаток, являются габаритные размеры, наличие одной или двух полок, формы хвостовика и пера (закрутка), толщина и значение радиусов скругления кромок и значение радиусов сопряжения пера с полкой.

В соответствии с этой классификацией лопатки делятся на группы, и для них отраслевые технологические институты разрабатывают типовые технологические процессы, технологическое оборудование и оснастку.

Технические условия на изготовление лопаток компрессора

Точность изготовления основных элементов лопаток компрессора можно характеризовать следующими данными.

Пера лопаток (рис. 16.12, а):

Отклонения профиля спинки ΔP_c и корыта ΔP_k пера в расчетных сечениях от заданной	от 0,06 до 0,40 мм
Отклонение профиля входной $\Delta P_{вх}$ и выходной $\Delta P_{вых}$ кромок	от 0,03 до 0,2 мм
Отклонение толщины профиля пера $\Delta C_{max} = \Delta P_c + \Delta P_k$	
Допуск на угол закрутки пера в поперечных сечениях $\Delta \alpha$	$\pm (12...20)^\circ$
Отклонение ширины хорды профиля пера Δb	$\pm (0,2...0,6)$ мм
Шероховатость пера лопаток Ra	0,63 ... 0,08 мкм

Хвостовики лопаток:

Типа ласточкина хвоста (трапецевидные, рис. 16.12, б).

Размеры посадочных поверхностей

Допуск на угол посадочных поверхностей α_3

Шероховатость Ra :

рабочих поверхностей замка	1,25 мкм
остальных	1,25...5,0 мкм
Число типоразмеров	примерно 30

Кольцевой трапецевидный хвостовик (рис. 16.12, в) — разновидность замка типа ласточкина хвоста у рабочих лопаток компрессора. При сборке он устанавливается в кольцевой паз венца диска компрессора. Размеры посадочных поверхностей изготавливаются с точностью 6-го

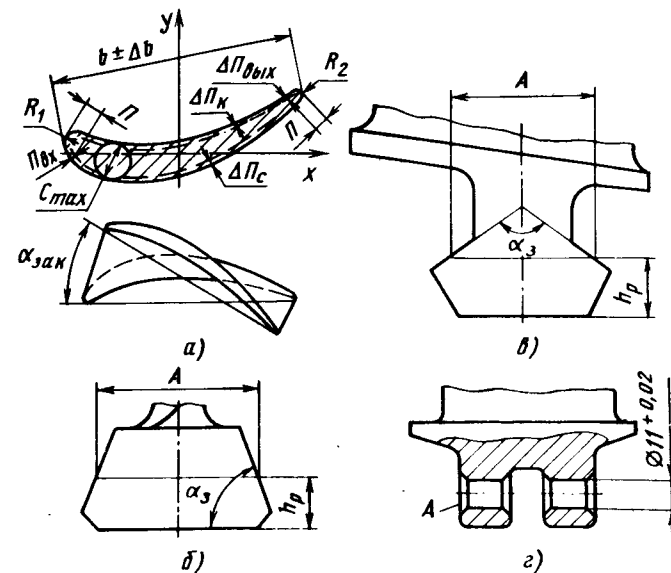


Рис. 16.12. Основные конструктивные элементы рабочих лопаток компрессора, определяющие точность их изготовления:

а — перо лопатки; б — хвостовик типа ласточкина хвоста; в — кольцевой трапецевидный хвостовик; г — шарнирный хвостовик

квалитета. Допуск на угол посадочных поверхностей $\alpha_3 = 110^\circ_{-30'}$. Шероховатость рабочих поверхностей $Ra = 1,25$ мкм.

Шарнирный (вилочный) замок (рис. 16.12, г). Отверстие под штифт выполняется по 6-му качеству. Неперпендикулярность оси этого отверстия относительно базового торца — не более 0,1 мм на длине 100 мм. Шероховатость поверхности отверстия под штифт $Ra = 1,25$ мкм, шероховатость остальных поверхностей замковой части лопатки $Ra = 5,0...1,25$ мкм. Проушины серебрят, а затем наносят специальное покрытие.

Спрямоляющие и сопловые лопатки с цапфами. Диаметр цапф обычно задают с допуском по 6...9-му качеству. Непараллельность и перпендикулярность поверхностей полок и цапф — 0,05...0,1 мм, относительно нижнего замка — не более 0,15 мм. Шероховатость этих поверхностей $Ra = 2,50...0,63$ мкм.

Дополнительные условия. Допуск на массу рабочей лопатки устанавливают до 2...5% от массы расчетной лопатки. Для лопаток ротора компрессора устанавливают нижний допустимый предел частот по первой изгибной форме и выборочно испытывают на усталость.

Материалы лопаток компрессора должны обладать хорошими прочностными характеристиками, пластичностью, а также высоким сопротивлением коррозии (электрохимической, солевой, газовой), пылевой эрозии; достаточной жаропрочностью и жаростойкостью, особенно для лопаток последних ступеней компрессора высокого давления, где температура воздуха достигает 700...800°C. При этом материал лопаток должен иметь и

хорошие технологические свойства: хорошо обрабатываться резанием, давлением, обладать свариваемостью.

Лопатки компрессора изготавливают из коррозионно-стойких и тепло-стойких хромистых сталей, алюминиевых, титановых и жаропрочных сплавов и композиционных материалов.

Для лопаток компрессора, работающих при температуре нагрева до 550°C , применяют титановые сплавы: ВТ3-1, ВТ8М, ВТ9, ВТ18У, ВТ22, ВТ25У, ВТ33 и др. При температуре нагрева лопаток до $600\ldots 650^{\circ}\text{C}$ используют коррозионно-стойкие и теплостойкие стали 13Х12Н2В2МФА-Ш, 15Х12Н2ВМФАБ-Ш, 15Х16К5Н2ВМФАБ-Ш.

Лопатки последних ступеней компрессора, работающие при температуре нагрева $650\ldots 800^{\circ}\text{C}$, изготавливают из жаропрочных сплавов на никелевой основе: ХН45МВТЮБР, ВЖ105, ХН77ТЮР и др.

Для лопаток при температуре ниже $250\ldots 350^{\circ}\text{C}$ могут применяться алюминиевые сплавы типа АК4, АК6, ВД-17, стеклопластики, например углепластик-стеклопластик, армированный графитовым волокном (турбо-вентиляторный двигатель RB-211 английской фирмы „Роллс-Ройс“). Фирма „Пратт и Уитни“ (США) в двигателе J79 использовала боропластик. Недостатком стеклопластиков является низкая эрозионная стойкость, плохое сопротивление удару.

При температуре нагрева лопаток до 400°C могут быть использованы металлические композиционные материалы, например бороалюминиевая однонаправленная композиция (при температуре 20°C $\sigma_{\text{в}} = 100\ldots 120$ Н/мм², $E = 2,3 \cdot 10^4$ МН, $\gamma = 2,65$ г/см³).

Применение композиционных материалов для лопаток компрессора в настоящее время сдерживается.

Технологичность конструкции лопаток компрессора, изготавливаемых из штамповок, определяется их материалом, формой, соотношением конструктивных элементов и значением допусков на размеры и форму лопатки.

Конструктору при проектировании лопаток необходимо учитывать ряд факторов, влияющих на технологичность изготовления заготовок методами объемного деформирования. Так, с увеличением угла закрутки пера повышаются нежелательные боковые нагрузки на инструмент в процессе изготовления, увеличивается коробление деталей, снижается стойкость штампов, поэтому угол закрутки не должен превышать 45° . Следует стремиться к уменьшению соотношений площадей поперечных сечений хвостовика и пера. С увеличением указанного соотношения усложняются и становятся более трудоемкими операции предварительного фасонирования (перераспределения объема исходной заготовки между хвостовиком и пером) под последующую штамповку. Чем больше разница в площадях сечений хвостовика и пера, тем выше перепад температур в хвостовике и пере заготовки лопатки при ее охлаждении после горячей штамповки, что ведет к увеличению коробления. В лопатках с антивибрационной полкой следует стремиться к уменьшению высоты и ширины полки. При горячей штамповке и холодном вальцевании технологичность лопаток повышается с уменьшением пера и увеличением толщины кромок.

Унификация и нормализация конструктивных элементов лопаток,

обоснованное назначение допусков на отклонения при их изготовлении, выбор материалов лопаток с учетом его обрабатываемости способствуют повышению технологичности конструкции лопаток и созданию типовых прогрессивных технологических процессов их изготовления.

Большое влияние на технологичность конструкции лопаток имеет также правильное оформление чертежей, которое должно соответствовать имеющимся в отрасли ОСТам, в которых обобщен опыт производства лопаток серийных заводов и ОКБ.

Рассмотрим примеры оценки технологичности конструкции некоторых лопаток.

Наиболее технологичные беззамковые лопатки с постоянным профилем и небольшим углом закрутки пера. Точные заготовки для таких лопаток можно получить штамповкой или вальцеванием из прессованных или катаных профилей.

Лопатка компрессора с антивибрационной полкой, трастовая поверхность которой образована параллельными плоскостями, а не цилиндрической поверхностью, является более технологичной конструкцией, позволяющей использовать высокопроизводительные методы ее обработки.

16.6. Построение технологического процесса изготовления лопаток компрессора

Заготовки лопаток. Лопатки компрессора изготавливают только из деформируемых теплостойких сталей, алюминиевых, титановых и жаропрочных сплавов. Заготовками для лопаток являются штамповки, полученные горячим деформированием на кривошипно-шатунных прессах, изотермической штамповкой, высокоскоростной штамповкой, вальцеванием. В последнее время ведутся работы по изготовлению лопаток из профильной полосы ЭХО.

Штамповка заготовок на кривошипно-шатунных прессах была наиболее распространена: припуск по перу $0,8\ldots 1,5$ мм на сторону, КИМ — $0,15$. На смену ей приходят методы получения точных заготовок с малыми припусками — изотермическая и высокоскоростная штамповка.

Изотермическая штамповка. Температура деформируемой заготовки, штампа и окружающего их пространства поддерживается примерно постоянной на протяжении всего цикла обработки, т. е. процесс деформирования протекает при постоянной температуре в изотермических условиях. Например, изотермическое штампование заготовок из стали осуществляется при температуре нагрева $1100 \pm 20^{\circ}\text{C}$.

Заготовки штампуют на тихоходных гидравлических прессах, оснащенных установкой для изотермического деформирования с индукционным нагревом (УИДИН). На некоторых заводах штамповку нагревают в газовых печах. Метод изотермического штампования используется для изготовления точных заготовок из сталей и титановых сплавов. Припуск по перу $0,2\ldots 0,4$ мм на сторону, КИМ — $0,5\ldots 0,6$. Заготовка штампуются за 2...3 перехода, первые два перехода — на гидровинтовых прессмолотах, последний переход — методом изотермического штампования. Шероховатость поверхности пера после пескоструйной очистки $Ra = 5\ldots 2,5$ мкм.

Исходные заготовки из титановых сплавов покрывают суспензией стекла для защиты от окисления. Сперва их нагревают в электрической печи до 920...950°С, а затем их помещают в УИДИН, где поддерживается температура нагрева 870...890°С.

Высокоскоростная штамповка. Скорость деформирования этим методом составляет 16...40 м/с. При штамповке на обычном кузнечно-прессовом оборудовании скорость деформирования равна 0,1...6 м/с. Основными технологическими преимуществами высокоскоростной штамповки являются улучшение теплового баланса штамповок, увеличение инерционных сил, способствующих лучшему заполнению металлом гравюры штампа; уменьшение контактного трения и увеличение пластичности металла при больших скоростях деформаций. Все это обеспечивает изготовление штамповок сложной формы без облоя, с тонкими кромками, малыми радиусами ($r = 0,5...2,0$ мм) и малыми штамповочными уклонами или совсем без них ($1...30^\circ$). Припуск по перу 0,2 мм на сторону, а в ряде случаев и без припуска на механическую обработку. Недостатки этого метода — можно штамповать только однополочные лопатки, повышенный износ штамповок.

Штампуют заготовки на высокоскоростных молотах (ВСМ) с энергией удара до 5 кН·м за 1...2 удара (с промежуточным подогревом). Примерные режимы высокоскоростной штамповки на ВСМ с энергией удара 4 кН·м для стали 13Х12Н2В2МФА — 1150°С; с припуском под безразмерное полирование; титановый сплав ВТ9 — 980°С. Можно получить заготовку без припуска на механическую обработку. Шероховатость поверхности заготовки $Ra = 5$ мкм; КИМ — 0,4...0,5.

Широкое внедрение этого метода в серийное производство сдерживается из-за нехватки специализированного технологического оборудования.

Из приведенного выше материала о заготовках лопаток компрессора следует, что современный уровень кузнечно-штамповочного производства,

Таблица 16.1.

Точность заготовок компрессорных лопаток, полученных прогрессивными способами объемного деформирования

Площадь проекции пера на плоскость разъема штампа, см ²	Припуск по перу на сторону, мм	Допуск на толщину пера, мм	Припуск по хвостовику, мм
До 50	0,3	+ 0,6 - 0,2	до 1,0
50...75	0,3	+ 0,6 - 0,2	до 1,2
75...125	0,4	+ 0,8 - 0,2	до 1,5
125...200	1,0	+ 1,0 - 0,4	до 2,0
200...350	1,5	+ 1,0 - 1,0	до 2,5

новые технологические процессы объемного деформирования (штамповка на гидравлических прессах, изотермическая и высокоскоростная штамповка, холодное вальцевание) позволяют получать заготовки лопаток с припусками по перу, исключающие грубые обдирочные и черновые операции механической обработки. Можно изготавливать заготовки с припусками под финишные операции механической обработки (шлифование, полирование) и без припуска; при этом припуски на хвостовике лопаток также существенно уменьшаются. Припуски и допуски для точных заготовок лопаток приведены в табл. 16.1.

Заготовки лопаток, изготавливаемых без припуска на размерную механическую обработку (холодным вальцеванием, изотермической штамповкой), выполняются с точностью по перу, регламентируемой чертежом готовой детали.

Технологические базы. Выбор технологических баз существенно зависит от конструкции лопатки, ее размеров, вида и точности заготовки. Существует много вариантов технологических баз, используемых в практике. Рассмотрим два из них.

Для рабочих лопаток компрессора длиной до 150 мм с нормальной жесткостью технологическими базами для обработки замка (рис. 16.13, а) являются: установочная база — поверхность корыта (опорные точки 1...3), направляющая база — входная кромка (опорные точки 4...5) и опорная база — центровая фаска в технологической бобышке (опорная точка 6). Зажим — по спинке пера.

Технологические базы для обработки пера лопатки: хвостовик (замок) и центровые фаски на технологической бобышке: установочная база — торцевая поверхность хвостовика (подошва замка — опорные точки 1...3); направляющая база — рабочая поверхность замка (опорные

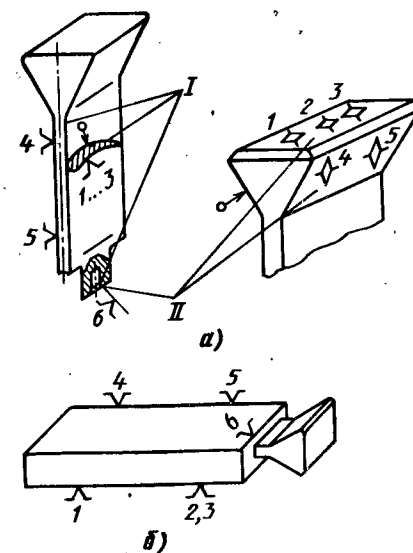


Рис. 16.13. Технологические базы для обработки рабочих лопаток компрессора:

а — лопатка с нормальной жесткостью пера (предварительно обработана входная кромка); б — точная штамповка с малой жесткостью пера залита в брикет; I — технологическая база для обработки замка; II — технологическая база для обработки пера

точки 4, 5) и опорная база — центровая фаска на торце технологической бобышки. Зажим — по рабочей поверхности замка.

Штамповка лопатки с малой жесткостью. Для обработки замка перо штамповки легкоплавким сплавом (60 % висмута, 40 % олова) или пласт. массой заливают в брикет прямоугольной формы. Температура плавления сплава $80 \pm 15^\circ\text{C}$. Технологическими базами для обработки замка являются плоскости брикета (рис. 16.13, б). После обработки замка штамповку лопатки из брикета извлекают расплавлением брикета в масле МС20 при температуре нагрева 139°C . Температура воспламенения масла 220°C .

Основные этапы технологического процесса механической обработки лопаток компрессора. В качестве примера рассмотрим схемы типовых технологических процессов изготовления средних и крупногабаритных рабочих лопаток компрессора.

Типовой технологический процесс механической обработки однозамковой рабочей лопатки компрессора (точная штамповка с припуском по перу 0,2...0,5 мм на сторону, длина $l \leq 120$ мм)

1. Распределение припуска по перу и заливка заготовки легкоплавким сплавом в брикет.

2. Протягивание контура хвостовика.

3. Освобождение заготовки из брикета.

4. ЭХО и (или) холодное вальцевание пера.

5. Шлифование входной и выходной кромок одновременно (станки ШКР-2Б).

6. Шлифование абразивной лентой и полирование прикомлевого участка пера (станок 3ЛШ-91, полировальная бабка).

7. Виброабразивное полирование пера, сопряжения и кромок (виброустановка ВУД-1000ДМ).

8. Подрезка пера по длине.

9. Нанесение на перо лопатки защитных покрытий.

Типовой технологический процесс изготовления крупногабаритных лопаток компрессора с бандажными полками (с длиной пера до 600 мм).

Заготовки-штамповки крупногабаритных лопаток компрессора изготавливают с припусками на механическую обработку 4...8 мм. Технология изготовления этих лопаток требует применения дорогостоящего специализированного оборудования, сложной технологической оснастки и контрольно-измерительных средств.

Крупногабаритные лопатки компрессора по конструктивной форме хвостовика различают: лопатки с хвостовиками типа ласточкина хвоста и елочного типа.

Технические условия на обработку крупногабаритных лопаток компрессора следующие:

1. Отклонение профиля пера от расчетного не более $\pm 0,15$ мм; на длине 3...5 мм от входной и выходной кромок отклонение профиля пера от расчетного не более $\pm 0,8$ мм.

2. Смещение профиля пера от номинального положения в направлении оси у не более 0,25 мм.

3. Угловой разворот профиля пера от номинального положения у комля относительно оси z не более $\pm 15'$.

4. Отклонение хорды от расчетного значения не более 0,4 мм за счет входной кромки и не более 0,4 мм за счет выходной кромки.

Штамповка лопатки с припуском по перу 4_{-1}^{+3} мм

Основные этапы технологического процесса изготовления крупногабаритной лопатки компрессора с хвостовиком типа ласточкина хвоста

1. Протягивание хвостовика (горизонтально-протяжной станок 7Б57 или СПС-40) и зацентровка технологической бобышки на конце пера.

2. Фрезерование контура бандажной полки отдельно со стороны корыта и спинки (вертикально-фрезерный станок с ЧПУ 6Р13Ф3 или 6М13ГН-1).

3. Фрезерование сопряжений пера с хвостовиком и бандажной полкой (горизонтально-фрезерный станок 6Р83Г или вертикально-фрезерный с ЧПУ ФП-17).

4. Фрезерование кромок пера (вертикально-фрезерный с ЧПУ 6Р13Ф3 или 6М13ГН-1).

5. Электрохимическая обработка пера (установки ЭКУ-251М, ЭХО-2 или АГЭ-4).

6. Фрезерование кромок пера, контура бандажной полки отдельно со стороны спинки и корыта (вертикально-фрезерный станок с ЧПУ 6Р13Ф3 или 6М13ГН-1).

7. Шлифование абразивной лентой профиля пера и поверхностей сопряжения пера с хвостовиком и бандажной полкой отдельно со стороны спинки и корыта (ленточно-шлифовальный копировальный станок 4ШСЛ-7 или алмазно-шлифовальный 4ШЭЛ-4; 3ЛШ-52).

8. Травление и контроль для выявления прижогов, трещин и других внешних дефектов металла.

9. Стабилизирующий отжиг (электропечь УВН-15).

10. Виброполирование пера, бандажных полок, полок хвостовика и поверхностей сопряжения (виброустановка типа ВУД-1000ДМ).

11. Отрезка технологической бобышки (абразивно-отрезной).

12. Деформационное упрочнение профиля пера и хвостовика.

13. Детонационное напыление или электроискровое покрытие контактных поверхностей бандажных полок (детонационная установка типа КМЗ или электроискровая типа ЗПОМ).

14. Определение частот собственных колебаний лопатки.

15. Гальваническое серебрение хвостовика.

16.7. Выполнение основных операций технологического процесса изготовления лопаток компрессора

Базовые поверхности лопаток компрессора фрезеруют и шлифуют на универсальных металлорежущих станках (горизонтально-, вертикально- и продольно-фрезерных, плоскошлифовальных) подобно обработке базовых поверхностей у лопаток турбины (см. подразд. 16.3). Вспомогательная технологическая база (бобышка на конце пера) обычно обрабатывается в две операции: сначала фрезеруют торец бобышки, а затем зацентрируют его. Торец бобышки фрезеруют на вертикально-фрезерном или на двухшпиндельном продольно-фрезерном станке одновременно у двух лопаток.

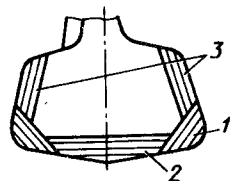


Рис. 16.14. Схема протягивания хвостовика типа ласточкина хвоста

Зацентрировывают бобышку по кондуктору на вертикально-сверлильном станке. Более целесообразно операции фрезерования торца и зацентрировки совместить в одну, выполняя ее на фрезерно-центровальном полуавтомате. Входная и выходная кромки лопаток в зависимости от угла закрутки и длины лопатки фрезеруются на копировальных полуавтоматах типа ФК-300, К-75, вертикально-фрезерных станках с ЧПУ типа 6Р13ФЗ, СМ13ГН-1. У спрямляющих лопаток с цапфами вначале фрезеруют торцы цапф, а затем зацентрировывают их. Торцы фрезеруют набором из двух фрез на горизонтально-фрезерном станке, а зацентрировывают по кондуктору на вертикально-сверлильных станках. Цапфы протачивают и шлифуют в центрах. Боковые поверхности полок фрезеруют на горизонтально-фрезерных станках набором из двух фрез. Резьба на цапфах накатывается или фрезеруется на резьбофрезерных станках.

Обработка замков лопаток компрессора

Замки типа ласточкина хвоста (трапециевидные). Обработку штамповочных рабочих лопаток компрессора, имеющих хвостовик (замок) типа ласточкина хвоста, обычно начинают с замка. Замки этого типа у рабочих лопаток компрессора протягивают: вначале обрабатывают фаски 1 (рис. 16.14), затем подошву 2 и боковые (рабочие) поверхности 3. Сборная протяжка состоит из пяти секций, положение каждой секции можно регулировать в корпусе. При протягивании замков лопаток из сталей и титановых сплавов применяют следующие режимы: скорость резания 2...5 м/мин, подъем на зуб 0,02...0,05 мм, СОЖ — эмульсия. Протяжки очищают от стружки чаще всего струей СОЖ при обратном ходе протяжки.

Замки рабочих лопаток компрессора протягивают на горизонтально-протяжных (типа 7510, 7520), вертикально-протяжных (типа МП23) и на специализированных горизонтально-протяжных станках непрерывного действия (типа МП-57, 7Б57, СПС-40). Применение вертикально-протяжных станков обеспечивает значительную экономию производственных площадей и необходимые условия для автоматизации процесса протягивания замка. Однако психологический дискомфорт работы станочника на площадке станка, находящейся на высоте до двух метров, затрудняет использование этих станков для протягивания хвостовиков в серийном производстве.

Горизонтально-протяжной полуавтомат типа МП-57 имеет поворотный стол на две позиции (рабочую и загрузочную) и устройство, обеспечивающее непрерывное движение кареток, на которых установлены блоки протяжек для обработки замка. Замок типа ласточкина хвоста на этом станке обрабатывается в две установки: сначала протягивается профиль замка (боковые поверхности, фаски и подошва), а затем — торцы (скосы) и паз.

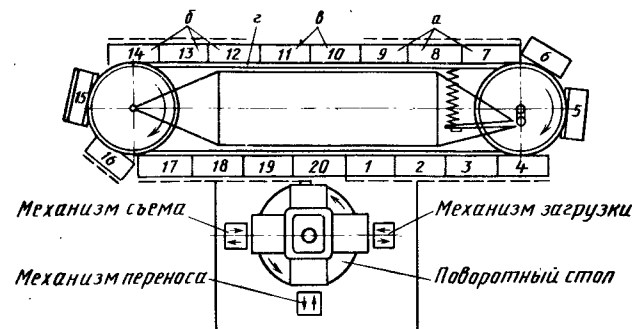


Рис. 16.15. Схема обработки хвостовика рабочей лопатки компрессора на горизонтально-протяжном автомате непрерывного действия: а, б — рабочие ползушки с протяжками; в — холостые ползушки; г — транспортер

Во время обработки замка на загрузочной позиции поворотного стола производят снятие и установку лопаток.

В серийном производстве более выгодно протягивание трапециевидных хвостовиков на протяжных автоматах непрерывного действия типа НПЛ-1 (рис. 16.15), где экономический эффект пропорционален программному заданию. Скорость протягивания на станках типа НПЛ-1 составляет 10...30 м/мин. При большой производственной программе хвостовики обрабатывают на автоматических линиях. Из-за сложности конфигурации лопаток обработку замка и пера на автоматических линиях пока производят отдельно. При создании автоматических линий за основу принимают типовые технологические процессы обработки лопаток, имеющих геометрическое сходство (рабочие лопатки компрессора с трапециевидным хвостовиком, лопатки статора компрессора с призматическим хвостовиком и т. д.).

Трапециевидные хвостовики, устанавливаемые в кольцевые пазы диска. Комплект рабочих лопаток одной ступени (примерно 80...90 шт.), в которых надо обработать кольцевые трапециевидные хвостовики, укладывается в специальное приспособление, ориентируя и фиксируя каждую лопатку относительно оси замка. Лопатки, установленные в приспособление, заливаются карбонидом. Этим увеличивается жесткость данной технологической системы при последующей обработке хвостовиков. Затем приспособление с лопатками устанавливается и закрепляется на планшайбе токарного станка (рис. 16.16) при допустимом биении поверхностей А и Б до 0,02 мм.

Хвостовики лопаток обрабатывают точением за две установки: сперва протачивают профиль хвостовика со стороны входной кромки пера, затем приспособление с лопатками на планшайбе станка переакрепляют другой стороной и протачивают профиль хвостовика уже со стороны выходной кромки пера. Более перспективным является протягивание этих хвостовиков на станках автоматах непрерывного действия типа НПЛ-1.

Шарнирные замки рабочих лопаток компрессора обрабатываются на обычном универсальном оборудовании или на станках с ЧПУ типа агре-

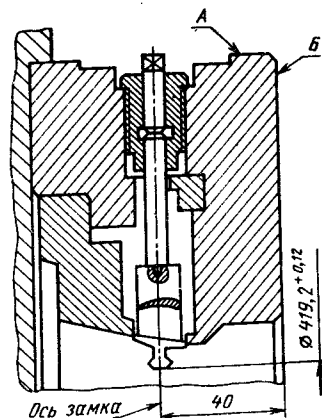


Рис. 16.16. Схема установки и закрепления рабочей лопатки компрессора в приспособлении для точения кольцевого трапецевидного хвостовика

гатных фрезерно-расточной группы. Например, на станке типа МА655СМ замок лопатки обрабатывается за три операции.

Елочные замки стальных лопаток компрессора в основном обрабатываются протягиванием на горизонтально-протяжных станках типа 7Б57, СПС-10 и др.

Обработка пера лопаток

Пера лопаток обрабатывают в два этапа: предварительно и окончательно. В процессе предварительной обработки перо фрезеруют, обрабатывают электрохимическими, электроэрозионными методами или их комбинацией. Окончательная обработка пера осуществляется шлифованием, полированием или холодным вальцеванием. Трудоемкость предварительной обработки зависит от вида и точности изготовления заготовки. Пера точных заготовок обычно только вальцуются.

Фрезеруют спинку и корыто раздельно на четырех- и восьмишпиндельных копировально-фрезерных станках узкими поперечными (станки типа 4КФЛ, 8КФЛ) или продольными строчками (станки типа 4ФПЛ). Раздельное фрезерование спинки и корыта дает возможность подвода дополнительных опор под необрабатываемую сторону пера для увеличения его жесткости. Недостатком метода раздельного фрезерования является коробление пера лопатки, которое возникает при одностороннем, поочередном съеме припуска с заготовки.

Более производительными и лишенными указанного выше недостатка являются копировально-фрезерные полуавтоматы типа ФСЛ-1 и КА-65 для одновременной обработки корыта и спинки, включая косые участки и у замка рабочих и направляющих лопаток компрессора. ФСЛ-1 — восьмишпиндельный станок, на котором спинка и корыто фрезеруются продольными строчками одновременно у четырех лопаток длиной до 300 мм с углом закрутки до 30° . КА-65 — четырехшпиндельный станок, предназначенный для одновременной обработки спинки и корыта двух больших лопаток длиной до 600 мм и с углом закрутки до 60° .

Электрохимическая обработка*. Исходной заготовкой для ЭХО является штамповка с предварительно обработанными входной и выходной кромками пера, базовыми поверхностями со стороны хвостовика и технологической бобышки. Для подвода электрического тока к лопатке обрабатывают также клин замка с чистотой поверхности не ниже $Ra =$

* Физико-химическая сущность процесса ЭХО изложена в подразд. 14.2.

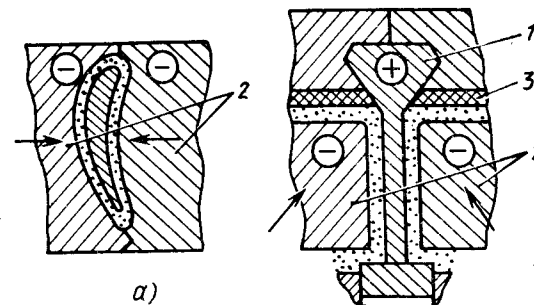


Рис. 16.17. Схема круговой ЭХО пера лопатки компрессора:

а — обработка профиля пера; б — обработка прикомлевого участка пера; 1 — лопатка (калиброванная полоса); 2 — электроды; 3 — изоляция

$= 2,5 \dots 1,25$ мкм. Электрохимическую обработку стальных лопаток обычно проводят в проточном электролите (см. рис. 14.1), чаще всего в 5...15 %-ном водном растворе поваренной соли при плотности тока $15 \dots 25$ А/см² и напряжении 10...15 В. Температура электролита поддерживается в пределах $20 \dots 30^\circ\text{C}$, рабочий зазор 0,15...0,3 мм. Обработку одновременно спинки и корыта производят на станках для ЭХО типа ЭХО-2, АГЭ-2, АГЭ-3, АГЭ-4, ЭКУ-251М. ЭХО обеспечивает точность профиля пера 0,15...0,4 мм, шероховатость поверхности пера $Ra = 2,50 \dots 0,63$ мкм. Для лопаток компрессора из титановых сплавов обычно используют другие режимы и более сложные электролиты. Для обработки лопаток из титанового сплава ВТ9 применяют электролит, состоящий из 5 %-ного водного раствора NaCl с добавкой 1...1,2 % NH_4Cl . Температура электролита $25 \dots 30^\circ\text{C}$.

Круговая электрохимическая обработка лопаток компрессора. ЭХО широко используется при изготовлении лопаток ГТД. Однако с появлением таких конкурирующих методов, как вальцовка, изотермическая штамповка, область применения ЭХО в последнее время несколько сузилась. Существующие методы ЭХО на постоянном токе позволяют обрабатывать проточную часть лопатки без кромок и прикомлевых участков лишь предварительно (точность $\pm 0,1 \dots 0,2$ мм) с последующей ручной доработкой.

Фирмой „Роллс-Ройс“ (Англия)* разработаны процесс и оборудование для ЭХО полного профиля лопатки. Этот процесс назван „круговой“ ЭХО, так как лопатка устанавливается между двумя электродами, которые на последнем этапе полностью закрывают перо лопатки (рис. 16.17). Данный процесс позволяет обрабатывать кроме проточной части лопатки еще кромки и прикомлевые участки. Заготовка лопатки — калиброванная полоса. Время обработки лопатки 8 мин.

Электроимпульсную (электроэрозионную) обработку иногда применяют для обработки малогабаритных лопаток. Скорость съема металла по глубине составляет 5...10 мкм/с.

*Metallworking Production, 1985, № 11.

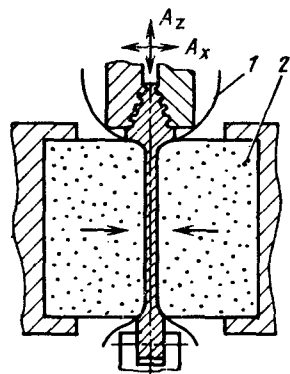


Рис. 16.18. Схема виброконтактного полирования пера лопаток:
1 — абразивная лента; 2 — резиновая прокладка

Шлифование пера лопатки компрессора. Перо лопатки компрессора шлифуют преимущественно узкими абразивными лентами на копировально-ленточных станках, обеспечивая шероховатость поверхности $Ra = 0,63 \dots 0,32$. Узкой лентой шлифуют двумя способами: поперечными и продольными

строчками. При шлифовании поперечными строчками (круговое шлифование) лопатка быстро вращается вокруг своей оси и медленно перемещается в продольном направлении (станки типа ХШ-12А, ШПЛ-300 и др.). При втором способе лопатка быстро перемещается вдоль оси относительно ленты и медленно поворачивается (подача) после прохождения каждой строчки (станки типа ЛША-1а, ЛШ-2 и др.). Производительность шлифования поперечными строчками выше, чем продольными, и тем значительнее, чем больше кривизна и угол закрутки профиля пера. Однако точность и шероховатость обрабатываемой поверхности при шлифовании поперечными строчками хуже из-за больших сил инерции быстровращающейся лопатки, приводящих к ее деформации при обработке. Припуск на сторону при предварительном шлифовании абразивной лентой на станках типа ЛШ-1 до 0,05 до 0,2 мм, а при окончательном шлифовании — до 0,04 мм.

Полирование пера лопатки. Полирование — финишная операция изготовления всех видов лопаток ГТД, обеспечивающая заданную шероховатость пера ($Ra = 0,63 \dots 0,08$), минимальные остаточные напряжения и наклеп. Для отделочной обработки пера лопаток применяют следующие методы полирования: механическое, абразивно-жидкостное (или гидроабразивное), виброабразивное и электролитическое.

Механическое полирование различают: ручное и виброконтактное. Ручное полирование осуществляется на полировальных станках (бабках) с использованием фетровых (войлочных) кругов с наклеенным абразивным зерном или покрытых пастой ГОИ.

Более перспективный способ механического полирования — виброконтактное полирование абразивной лентой на ленточно-копировальных виброконтактных станках типа ЛВП-4 (лопатки турбин) и ЛВП-3, ВПЛ-3, ВПЛ-4 (лопатки компрессора) (рис. 16.18). Полирование осуществляется благодаря сложному вибрирующему движению лопатки между двумя неподвижными абразивными лентами, которые прижимаются к перу с помощью гидравлических тисков и резиновых профильных колодок. Абразивные ленты, сматываемые с бобин, по мере необходимости протягиваются специальным устройством подачи. Перо стальных лопаток поли-

руют за три перехода абразивными лентами разной зернистости (ЭБ20, ЭБ8, ЭБ5), а на последнем переходе — пастой ГОИ. Толщина снимаемого металла при полировании до 0,05 мм.

Абразивно-жидкостное (гидроабразивное) полирование применяют в основном для глянцевого пера лопаток. Надобность в этом возникает при подготовке пера под травление до и после люминесцентного контроля, для снятия нагара и др. Гидроабразивное полирование производят в специальной камере. На обрабатываемую поверхность под избыточным давлением до $6 \cdot 10^5$ Па направляется струя масла или эмульсии с абразивным порошком — электрокорундом или карборундом (рис. 16.19). Размер абразивного зерна 20...120 мкм. Производительность гидроабразивного полирования зависит от скорости подачи струи, величины зерна и концентрации абразива в жидкости, а также от расстояния сопла до обрабатываемой поверхности. В процессе полирования каретка с закрепленной на ней форсункой, к которой подается рабочая жидкость, совершает возвратно-поступательные движения относительно пера лопатки. Угол направления струи $15 \dots 45^\circ$; сопло располагается на расстоянии 50...100 мм от обрабатываемой поверхности. Абразивная жидкость обычно состоит из 25...50 весовых частей абразивного зерна и 20...32 частей содовой эмульсии. Чистота поверхности после полирования не более $Ra = 0,32$ мкм.

Виброабразивное полирование — механический и химико-механический процессы сглаживания микронеровностей и снятия мельчайших частиц металла с обрабатываемой поверхности абразивом рабочей среды, совершающей колебательные движения.

В вибробункере лопатка и частицы рабочей среды движутся с различными скоростями. Интенсивность протекания процесса виброабразивной обработки зависит от скорости относительного перемещения лопаток и частиц рабочей среды, от объема заполнения рабочей камеры, гранулометрического состава части абразива и их режущих свойств, силы трения и др. Виброабразивная обработка лопаток производится с непрерывной подачей раствора, который охлаждает и смачивает детали и рабочие частицы, удаляет продукт износа и частицы рабочей среды с поверхности лопаток. Непрерывная промывка рабочей среды сохраняет ее режущие свойства.

Установка для виброабразивной обработки (рис. 16.20) состоит из основания с амортизатором, U-образной рабочей камеры с закрепленным на ней вибратором (вибробункера), бака-отстойника и системы подачи жидкости.

В процессе виброабразивной обработки снимаются заусенцы, остав-

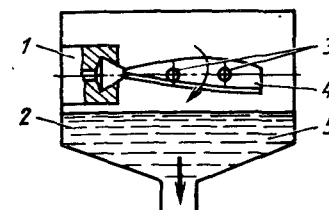


Рис. 16.19. Схема гидроабразивного полирования пера лопаток

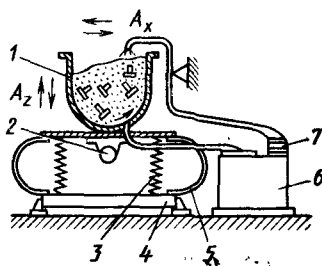


Рис. 16.20. Схема виброабразивного полирования пера лопаток:

1 — вибробункер; 2 — дисбаланс; 3, 5 — пружины; 4 — рама; 6 — бак; 7 — насос

шиеся после механической обработки, скругляются входная и выходная кромки и полируется перо лопатки. При этом понижается шероховатость обработанных поверхностей и создается поверхностный наклеп малой интенсивности. При виброабразивной обработке поверхностей с шероховатостью $Ra = 1,0...1,25$ мкм съём металла достигает 0,1 мм/ч, а с менее шероховатых — не более 0,01 мм/ч. Виброабразивная обработка осуществляется в две операции: виброабразивное шлифование, обеспечивающее шероховатость поверхности до $Ra = 1,25...0,63$, и виброабразивное полирование с шероховатостью обработанной поверхности до $Ra = 0,32...0,15$ мкм. Для виброабразивного шлифования наполнителем является абразивная крошка высокой твердости на керамической связке размером 1...3 см³.

Виброабразивное полирование производится в рабочей среде, состоящей из фарфоровых и стеклянных шариков диаметром 10 мм и деревянных кубиков размером 1 см³. В качестве рабочей жидкости применяют раствор следующего состава: нитрит натрия ($NaNO_2$ — 15%, углекислый натрий — 5%; карбоксиметилцеллюлоза (КМИ) — 25%, древесная мука — 20%, мыльная стружка — 32%, поверхностно-активное вещество ОП-7 — 3%.

Рабочую среду для виброабразивного шлифования первоначально обкатывают на работающей установке в течение 30...40 мин. Только после скругления острых кромок абразивного боя среда считается годной к загрузке в нее лопаток. Общий объем загрузки деталей и наполнителя должен составлять 50...70% объема рабочей камеры. Соотношение объемов деталей и твердого наполнителя составляет 0,33...0,35.

Виброабразивное шлифование лопаток компрессора производится по следующему режиму: амплитуда колебаний 4...6 мм, частота колебаний 25 Гц, продолжительность обработки 2 ч ± 15 мин.

Режим виброабразивного полирования состоит в следующем: амплитуда колебаний 2...3 мм, частота колебаний 33...35 Гц, продолжительность обработки 2 ч ± 15 мин.

Лопатки в рабочую камеру загружают вручную поштучно при установленном режиме работы установки, обеспечивая этим равномерное распределение их в объеме рабочей смеси. После окончания времени обработки лопатки выгружают из камеры также вручную по мере появления их на поверхности, не останавливая установку до полной выборки всех лопаток. После этого загружают следующую партию лопаток. После виброаб-

разивной обработки лопатки промываются в содовой воде от абразивной пыли.

Электролитическое полирование — разновидность ЭХО металлов, использующая анодное растворение поверхностного слоя детали (см. подразд. 14.3). Технологический процесс электрополирования пера лопатки турбины следующий. Лопатку, подлежащую полированию, тщательно обезжиривают, устанавливают в специальное приспособление, которое подвешивают на перекладине (анод) в ванне с электролитом. Электрополирование лопаток производится в сернофосфорных или сернофосфорнохромовых электролитах по режиму: температура электролита 15...30°С, плотность тока 40...80 А/дм². Припуск на электрополирование оставляют не более 0,05 мм. Электрополирование лопаток сопровождается неравномерным съемом металла на поверхности пера (на кромках больший съём, чем на середине спинки и корыта), что в значительной мере сдерживает применение его на заводах отрасли.

Холодное вальцевание пера рабочих лопаток компрессора применяют как метод окончательной обработки заготовки, полученной точной штамповкой или предварительным фрезерованием, обеспечивающими необходимую величину и требуемый характер распределения припуска по перу. Физическая сущность процесса холодного вальцевания состоит в следующем. Заготовка лопатки, изготовленная методом точной штамповки с окончательно обработанным хвостовиком и небольшим припуском по перу (0,2...0,5 мм на сторону), подвергается пластическому деформированию в холодном состоянии в фасонных калибровочных валках, приобретая окончательную форму, размеры и закрутку за один или за несколько проходов (рис. 16.21). В процессе деформирования происходит объемное перераспределение материала с увеличением поперечных размеров профильных сечений и удлинением пера до заданных размеров.

В случае многопроходного вальцевания лопатку подвергают промежуточному отжигу для снятия наклепа и остаточных напряжений. Число проходов устанавливают в зависимости от величины припуска и достижимой степени деформации (обжатия) для данного материала за один проход с учетом жесткости и мощности вальцовочного стана. Например, допустимая степень деформации заготовки из стали 13Х12Н2В2МФА за один проход порядка 35%, для титанового сплава ВТ3-1 степень деформации 16...17%. Скорость вальцевания определяется экспериментально для каждого материала лопаток, например, для стали ЭИ961 она лежит в пределах 10...20 м/мин, а для стали ЭП866Ш и сплава ЭП718ИД всего 2,5...5 м/мин.

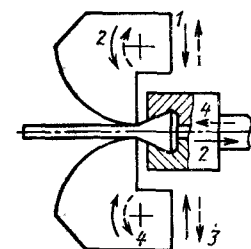


Рис. 16.21. Схема холодного вальцевания пера рабочей лопатки компрессора:

1, 2 — рабочие переходы вальцевания; 3, 4 — возврат вальков и захвата в исходное состояние

Продолжительность цикла однопроходного вальцевания с установкой и снятием заготовки, составляет 0,5...1 мин для лопатки длиной до 100 мм и 1...2 мин при длине 200...250 мм.

Припуск при вальцевании пера лопатки принимают 0,1...0,3 мм на сторону. Число проходов 1...4. После последней операции вальцевания предусматривается термообработка в аргоне или в вакууме. Шероховатость поверхности после вальцевания $Ra = 0,32...0,08$ мкм. Вальцевание заменяет шлифование, полирование и деформационное упрочнение поверхностного слоя, существенно повышает КИМ.

Перо рабочих лопаток вальцуют на специальных установках типа УВЛ-100-7 (для лопаток длиной до 100 мм).

16.8. Повышение ресурса и надежности работы лопаток компрессора технологическими методами

Основными технологическими направлениями повышения ресурса и надежности работы лопаток компрессора являются: деформационное упрочнение; нанесение защитных покрытий; ионное легирование; серебрение рабочей поверхности хвостовика рабочих лопаток. Физико-химическая сущность этих методов технологического обеспечения ресурса и надежности работы деталей ГТД рассмотрена в гл. 5. Здесь же будет затронута только специфика их применительно к лопаткам компрессора.

Деформационное упрочнение лопаток. ППД подвергается перо лопаток из сталей и титановых сплавов, работающих при температуре нагрева не более 350...400°С, т. е. ниже температур, вызывающих релаксационные, а тем более рекристаллизационные процессы в деформированном поверхностном слое. ППД лопаток на оптимальных режимах для реальных условий их эксплуатации повышает сопротивление усталости на 15...25%.

Основные методы деформационного упрочнения пера лопаток: пневмогидродробеструйный, гидродробеструйный, струйно-механический, гидрогалтовка, виброупрочнение, ультразвуковое упрочнение стальными шариками и упрочнение микрошариками.

Пнеumo- и гидродробеструйное упрочнение пера лопаток производят стальными шариками (диаметром 0,5...2,0 мм) с эмульсией или трансформаторным маслом на эжекторных установках (см. рис. 5.1) типа УГП-200 (для лопаток длиной до 200 мм) и УГП-400 (для лопаток длиной до 520 мм). После деформационного упрочнения шероховатость поверхности возрастает примерно с $Ra = 0,63...0,08$ мкм до $Ra = 2,5...0,63$ мкм, требуется повторное виброконтактное полирование до $Ra = 0,63...0,08$ мкм.

Гидрогалтовка лопаток (струйномеханическое упрочнение) производится на специальных установках типа ГРП-300 (рис. 16.22), одновременно обрабатывающих 20 лопаток стальной дробью ДСЛ № 1 в смеси масел МК-8 (60%) и МС-20 (40%). Лопатки крепятся в кассетах, а кассеты — на диске. В процессе обработки лопатки совершают реверсивно планетарное движение в рабочей смеси: вращаются вокруг своей оси, находясь в кассетах (относительное движение), и участвуют в движении при вращении диска. Лопатки вращаются вначале в одну сторону, а затем в другую. Рабочая смесь в процессе обработки хорошо перемещивается лопастями и

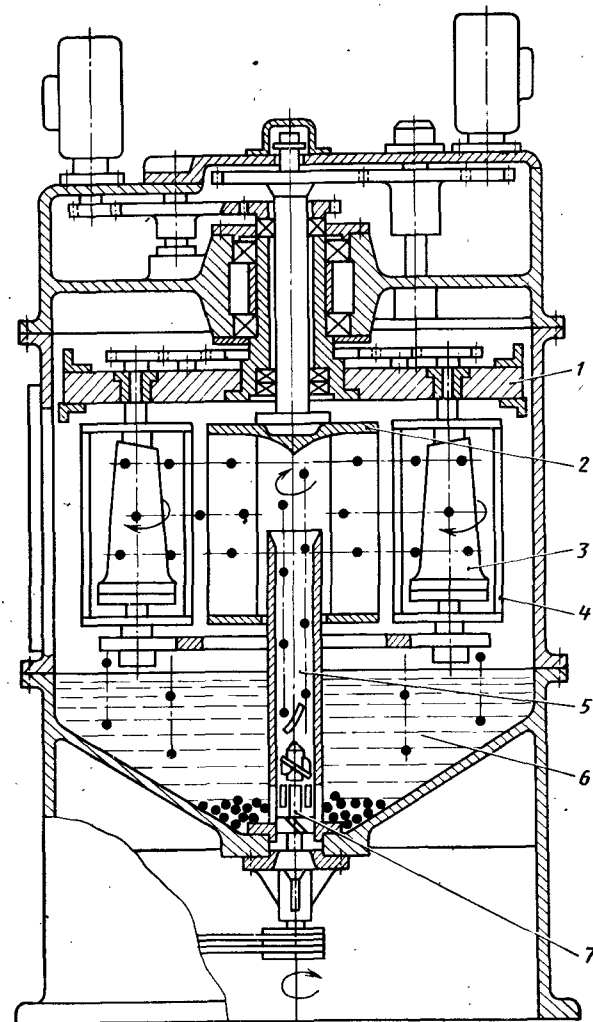


Рис. 16.22. Схема виброгалтовки рабочих лопаток компрессора на установке ГРП-300: 1 — ротор; 2 — дробеметное колесо; 3 — обрабатываемая лопатка; 4 — кассета; 5 — направляющий аппарат; 6 — рабочая среда; 7 — осевой насос

направляется с определенной скоростью осевым насосом в зону обработки. Шероховатость поверхности пера лопатки после гидрогалтовки $Ra = 0,63...0,32$ мкм.

Виброупрочнение лопаток производят на специальных установках с инерционным приводом типа ВГМ-5, ВГМ-6, одновременно обрабатывая до 200 лопаток (см. рис. 5.2). Установка состоит из рабочей камеры, в которой находится приспособление роторного типа с обрабатываемыми лопатками и рабочая смесь. Рабочая камера жестко крепится на раме.

В процессе обработки приспособление с лопатками вращается в рабочей смеси, а рабочая камера совершает колебания в вертикальной плоскости. Раму и рабочую камеру подвергают колебаниям при помощи неуравновешенного ротора, в котором специально создан большой дисбаланс. При вращении ротора возникают неуравновешенные центробежные силы, создающие вибрацию рамы и рабочей камеры. Шероховатость поверхности после упрочнения $Ra = 0,32...0,08$ мкм.

В процессе упрочнения данным способом возможен расклеп кромок пера. В связи с этим лопатки с кромками радиусом, равным или более 0,3 мм, должны обрабатываться шариками диаметром 2,5...3,5 мм, а лопатки с кромками радиусом 0,1...0,2 мм — шариками диаметром 1,8...2,0 мм. Лопатки, кромки которых имеют радиус 0,15...0,08 мм, должны обрабатываться с применением специальных экранирующих приспособлений. Резьбы и отверстия, выполненные по 7...9-му качеству, должны предохраняться.

Ультразвуковое деформационное упрочнение лопаток. Лопатки упрочняют на специальных установках (см. рис. 5.3). Основными узлами установки являются магнитострикционный преобразователь типа ПМС-15А-18 с контейнером (волноводом) и источник питания вибратора (генераторы типа УЗГ-2-10, УЗГ-1-4). Стенки контейнера совершают колебательное движение сложной формы. Стальные шарики совершают в основном колебания в горизонтальной плоскости с различной амплитудой по высоте. Ударяясь о поверхность пера, они деформируют поверхностный слой пера лопатки. Шероховатость пера несколько увеличивается и составляет $Ra = 0,63...0,32$ мкм.

Процесс упрочнения пера лопаток имеет следующие основные параметры: рабочая частота колебаний 16...20 кГц; диаметр стальных шариков 1...3 мм; число одновременно загружаемых шариков в полость волновода 200...800 шт.; смачивающая жидкость — вода с антикоррозионными добавками, количество ее 0,12% рабочего объема; продолжительность обработки 3...15 мин.

Деформационное упрочнение лопаток микрошариками. Перо лопаток компрессора упрочняют микрошариками (диаметром 100...400 мкм) на специальных установках типа УДМ-3 (см. рис. 5.4). Преимущество данного метода — возможность деформационного упрочнения лопаток с тонкими кромками пера и малыми радиусами переходов с обеспечением шероховатости поверхности $Ra = 0,63...0,15$ мкм.

Защитные покрытия для лопаток компрессора. Лопатки компрессора в условиях эксплуатации подвергаются механическим и коррозионно-эрозионным воздействиям (солевая, электрохимическая и газовая коррозия; пылевая эрозия). Механические повреждения (забоины) обычно располагаются в верхней части пера лопаток, а коррозионно-эрозионные — в прикомлевой, т. е. в зоне максимальных напряжений. Это снижает усталостную прочность лопаток. Для защиты от коррозионно-эрозионных повреждений на перо лопатки наносятся покрытия. Основные методы нанесения покрытий — электролитическое осаждение, диффузионное насыщение и вакуумно-плазменное напыление.

Электролитическим осаждением на перо стальных лопаток наносится никель-кадмиевое (Н — Кг) покрытие. Технология нанесения покрытия

состоит в следующем. Перо лопатки после обдувки электрокорундом никелируется в два этапа (толщиной слоя 9...12 мкм) и отжигается при температуре $350 \pm 10^\circ\text{C}$, выдержка 1,5 ч. Затем осаждается слой кадмия толщиной 1...3 мкм. Покрытие Н — Кг имеет достаточную коррозионно-эрозионную стойкость до 350°C .

Диффузионные покрытия*. Для стальных лопаток компрессора применяются два вида диффузионных покрытий: диффузионное хромоалюминидное Х — ДифА и диффузионное алюминидно-силикофосфатное (алюминидо-керамическое) ДифА — СФ.

Технология нанесения хромоалюминидного покрытия Х — ДифА состоит в следующем. На перо лопатки после полирования ($Ra = 0,53...0,32$ мкм) электролитическим методом осаждается слой хрома толщиной до 3...7 мкм. Затем в порошковой смеси производится диффузионное алитирование в герметизированном контейнере при температуре 490°C на глубину 8...20 мкм. Концентрация алюминия на поверхности пера $C_{\text{Al}} \approx 60...80\%$. Твердость алитированного слоя $HM = (650...750) \cdot 10^3 \text{ Н/мм}^2$. Состав порошка для низкотемпературного алитирования: алюминиевый порошок ПА-4 (чистота 99,9%, дисперсность 200...400 мкм) — 92...99% и треххлористый алюминий (AlCl_3 — активатор) — 8...1%.

Технология нанесения алюминидо-керамического покрытия ДифА — СФ состоит в следующем. Производится низкотемпературное алитирование (при 500°C) в порошковой смеси. Толщина алюминидного слоя (FeAl_3) 8...20 мкм. Затем в водных солевых растворах на поверхность алитированного слоя наносится последовательно сперва силикатный слой с последующим диффузионным отжигом при температуре 500°C , выдержка 10 мин, а затем наносится фосфатный слой, диффузионный отжиг при температуре 500°C , выдержка 10 мин. Толщина силикатно-фосфатной пленки примерно 3 мкм. Твердость керамической пленки $HM = (1000...1200) \cdot 10^3 \text{ Н/мм}^2$. Замок лопатки в процессе нанесения покрытия защищают специальным покрытием из фосфата алюминия, которое затем удаляется промывкой лопаток в воде.

Наилучшей коррозионно-эрозионной стойкостью обладают алюминидные покрытия Х — ДифА и ДифА — СФ. Покрытия ДифА — СФ более технологичны. Технология их нанесения на стальные лопатки достаточно проста. Процесс нанесения покрытия Х — ДифА более трудоемок, при гальваническом хромировании хром осаждается на кромках пера неравномерно, что снижает усталостную прочность лопаток.

Плазменные и металлокерамические покрытия для пера лопаток компрессора. Для стальных лопаток компрессора целесообразно использовать два вида покрытий: ионно-плазменное покрытие из нитрида титана и металлокерамические ВП-АФЦ и Н-ВП-АФЦ-2 (с подслоем никеля), АФГ, АСФ и др.

Нитрид титановое покрытие наносится плазменным напылением в вакууме на перо лопатки, нагретой до 450°C . Плазменное покрытие из нитри-

* Е. Г. Иванов. Защитные покрытия для лопаток ГТД. М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, с. 116; Е. Г. Иванов. Покрытия для стальных лопаток компрессора ГТД //Антикоррозионные покрытия, Л.: Наука, 1983. С. 148 — 153.

да титана (толщиной до 20 мкм) обладает более низкой коррозионной стойкостью и может применяться до рабочих температур 350°С. Для нанесения этого покрытия требуется более высокая чистота поверхности пера и дорогостоящее технологическое оборудование.

Технология нанесения металлокерамического покрытия ВП-АФЦ. На перо лопатки, обдуть электрокорундом, наносится суспензия порошков оксидов в растворе хроматно-фосфатного связующего с последующей сушкой при температуре 350°С в течение 30 мин.

Технология нанесения металлокерамического покрытия с подслоем никеля Н-ВП-АФЦ-2. Производится гальваническое никелирование пера лопатки (обдуть электрокорундом) на толщину 9...12 мкм, а затем — отжиг при температуре 350°С, выдержка 1 ч, а далее подобно нанесению покрытия ВП-АФЦ.

Металлокерамические покрытия из-за большой толщины (80...100 мкм) целесообразно применять для крупногабаритных лопаток. Покрытие ВП-АФЦ по сравнению с другими более технологично: процесс его напыления на перо лопатки менее трудоемок, чем нанесение покрытия гальваническим способом и алитированием. Покрытие обладает достаточной коррозионно-эрозийной стойкостью до температуры 400°С. Однако неравномерность напыления и сравнительно низкая эрозийная стойкость приводят к выветриванию его с лопаток в условиях эксплуатации. Места выветривания подвергаются коррозионным повреждениям, так же как и лопатки без покрытия.

Гальваническое никелирование пера лопатки перед напылением (покрытие Н-ВП-АФЦ-2) расширяет температурные границы применимости металлокерамических покрытий до 450°С. Однако при этом трудоемкость процесса нанесения покрытия существенно увеличивается, а при выветривании его верхнего слоя процессы коррозии происходят интенсивнее, что практически сводит на нет преимущества Н-ВП-АФЦ-2 перед покрытием ВП-АФЦ и Н — Кг.

Ионное легирование. Наиболее перспективным направлением для улучшения эксплуатационных свойств лопаток компрессора является ионное легирование. Ионное легирование изменяет физико-химическое состояние поверхностного слоя материала лопаток, обеспечивая этим повышение эксплуатационных свойств деталей. Исследования показали, что коррозионно-эрозийные свойства лопаток из стали ЭП866Ш и никелевого сплава ЭП719ИД можно существенно повысить ионным легированием азотом. Ионная имплантация бора или азота в лопатки из титановых сплавов ВТ9, ВТ18У, ВТ25У повышает сопротивление усталости на 15...25 % при температуре нагрева 450 и 500°С. Заметно возрастает сопротивление солевой коррозии лопаток из сплава ВТ9 после ионного легирования такими элементами, как бор, палладий, лантан. Внедрение ионного легирования лопаток в серийное производство сдерживается отсутствием технологического оборудования.

16.9. Технический контроль лопаток ГТД

Лопатки проверяют как в процессе механической обработки, так и после ее окончания. Контроль лопаток включает в себя: выявление внеш-

них и внутренних дефектов материала; проверку шероховатости обрабатываемых поверхностей в соответствии с требованиями чертежа; проверку размеров, формы профилей пера (спинки, корыта) и замков и их взаимного расположения; определение массы и частоты собственных колебаний лопаток; выборочные испытания рабочих лопаток турбины и компрессора на усталость.

Выявление дефектов материала. Контроль внешних и внутренних дефектов материала лопаток позволяет выявить трещины и волосовины на поверхности, раковины, пористость, расслоения, инородные включения и флокены в материале. Для этой цели применяют травление, цветную дефектоскопию, люминесцентный, магнитный и ультразвуковой методы контроля.

Магнитопорошковый метод основан на притяжении частиц порошка железа (или его окислов) к магнитным полюсам, образующимся у намагниченной детали в местах нарушения сплошности. Осевший порошок делает невидимые до этого дефекты хорошо видимыми невооруженным глазом. По характеру оседания порошка можно определить не только место расположения дефекта, но также их примерные размеры.

Для осуществления магнитопорошкового контроля необходимы специальные аппараты (магнитные дефектоскопы типа УМДЭ-2500), в комплект которых входят приспособления для намагничивания контролируемых лопаток (соленоид или электромагнит), устройство для опыливания порошком или полива жидкостью, в которой находится во взвешенном состоянии железный порошок, а также приспособление для размагничивания лопаток после контроля. Магнитопорошковым методом выявляются трещины с шириной раскрытия 0,001 мм и более, глубиной 0,01 мм и более. Относительная простота и довольно высокая надежность этого метода способствовали его широкому внедрению. Этим методом можно контролировать стальные лопатки компрессора, а также шестерни, валы, оси, силовые сварные рамы и другие детали из ферромагнитных материалов с относительной магнитной проницаемостью не менее 40.

Цветная дефектоскопия. Цветной и люминесцентный методы контроля (капиллярные методы дефектоскопии) применяются для выявления дефектов, выходящих на поверхность детали. Метод цветной дефектоскопии основан на способности специальной красной краски проникать в глубь поверхностных дефектов и белой краски впитывать в себя красную краску из дефекта. После нанесения и удаления с контролируемой поверхности красной краски часть ее сохраняется внутри дефекта. При последующем нанесении на очищенную поверхность белой краски последняя впитывает в себя из дефекта красную краску и, окрашиваясь, выявляет дефект.

Красная краска — смесь анилинового красителя „Судан IV” с растворителем бензолом и трансформаторным маслом. Белая краска — окись цинка (цинковые белила), разведенная в коллодии, бензоле, ацетоне.

Метод обнаруживает трещины шириной от 0,01 мм, по глубине от 0,05 мм и по протяженности от 0,3 мм.

Люминесцентный метод (ЛЮМ-А) основан на способности некоторых жидкостей светиться при облучении ультрафиолетовым светом. Контроли-

руемую деталь после тщательной очистки и обезжиривания погружают в ванну с индикаторной жидкостью, легко проникающей в трещины, поры и другие поверхностные несплошности. Затем деталь промывают, удаляя жидкость только с поверхности, тогда как полости дефектов остаются заполненными индикаторной жидкостью. Далее деталь протирается насухо и поверхность ее покрывается из пульверизатора проявляющейся краской, обладающей высокой поглощающей способностью. Индикаторная жидкость выступает из дефектных мест на поверхность пленки, образованной проявляющим составом. Наличие дефектов устанавливают, осматривая лопатку (деталь) в темной комнате при ультрафиолетовом освещении, трещины и поры обнаруживаются в виде светящихся желто-зеленым цветом линий и пятен. После контроля деталь промывается в ацетоне.

В качестве люминофора применяют жидкость ЛЖ-6А (ТУ6-09-1042-76), состоящую из бутилового спирта, эмульгатора (ОП-7) и химического продукта ЛЖ-6А. Люминофор с поверхности детали удаляется водой и очищающей жидкостью ОЖ-1 (ТУ6-09-1043-76), состоящей из этилового спирта и эмульгатора ОП-7. Проявляющей жидкостью (ТУ6-09-1092-76) служит белая нитрозмаль „Экстра”, разведенная в смеси коллодия и ацетона.

Люминесцентный метод ЛЮМ-А надежно выявляет выходящие на поверхность трещины, поры, рыхлоты, окисные пленки, засоры и т. д. Он обнаруживает трещины шириной от 0,01 мм, по глубине от 0,05 мм и по протяженности от 0,2 мм. Чувствительность метода ЛЮМ-А несколько выше метода цветной дефектоскопии.

Внутренние дефекты материала лопаток проверяются рентгеновским и ультразвуковым методами.

Рентгеновский (радиографический) метод. Рентгеновский метод обнаружения дефектов основан на ослаблении рентгеновского излучения материалом детали, при котором теневое изображение просвечиваемой детали регистрируется на рентгенографической пленке. Достоинством метода является высокая чувствительность к выявлению в материале детали внутренних пор, раковин, инородных включений и др.

Для просвечивания литых лопаток турбины используются передвижные кабельные рентгеновские аппараты типа РУП-100-10, РУП-150-10-1 и др.

Ультразвуковой метод контроля с использованием поверхностных волн позволяет выявлять поверхностные трещины и металлургические дефекты материала. Данный метод применяется обычно для выявления трещин входной и выходной кромок, реже — на поверхности спинки и корыта, возникающих при изготовлении и эксплуатации лопатки.

Метод основан на прозвучивании контролируемого материала коротковременными импульсами ультразвуковых колебаний, распространяющихся по поверхности лопатки, и улавливании их отражений (эхо-сигналов) от дефектов.

Контроль кромок пера проводится следующим образом. Контактная поверхность головки ультразвукового дефектоскопа, покрытая тонким слоем масла, прикладывается к кромке пера у замка лопатки так, чтобы ультразвуковые волны были направлены к другому концу пера лопатки. О наличии дефекта судят по форме осциллограммы. Если при контроле

на экране дефектоскопа между начальным и конечным импульсами нет промежуточных импульсов, то это подтверждает отсутствие трещин на контролируемой кромке лопатки. Появление промежуточных импульсов на экране дефектоскопа будет указывать на наличие препятствий, способных отражать ультразвуковые волны при прозвучивании лопаток вдоль кромки (микрорастрескивание поверхностного слоя, глубокие риски на кромке пера, внутренние дефекты материала и др.).

Шероховатость обработанных поверхностей лопаток проверяется внешним осмотром путем сравнения с эталоном или непосредственным измерением шероховатости поверхности профилометром типа 253 или другим прибором.

Контроль геометрических размеров, формы профилей пера и замка и их взаимного расположения. Операции этого вида технического контроля лопаток наиболее трудоемкие. Приборы, применяемые на этих операциях, можно разделить на две основные группы: *бесконтактные* — оптико-проекторные и *контактные* — механические, оптико-механические, пневматические и пневмогидравлические.

Контроль пера и замков лопаток. Перо лопатки проверяют в расчетных поперечных сечениях бесконтактными и контактными методами. Одним из бесконтактных методов контроля является проверка профиля на проекторах, используемая в единичном производстве. У нас они не нашли применения.

Широкое использование в производстве находят приборы, работающие по контактному методу (по отдельным точкам) с различными отсчетными устройствами. Ими проверяют перо и замок лопаток.

При малом масштабе производства профиль пера лопаток иногда проверяют шаблонами. Отклонение профиля спинки и корыта от шаблона определяют визуально на просвет или с помощью шупа. Контроль пера шаблонами малопроизводителен, субъективен и требует громоздкого шаблонно-измерительного хозяйства.

В серийном производстве использовались механические приборы с индикаторами часового типа, настраиваемые по эталонной лопатке. Они просты и удобны в работе, но малопроизводительны. Большая трудоемкость контроля массовых деталей обусловила применение многомерных высокопроизводительных приборов и измерительных машин, в которых механизированы все вспомогательные движения (зажим и подвод измерительных элементов и др.). Применяемые многомерные приборы контактного типа разделяют на оптико-механические и приборы с применением электроконтактных, индуктивных и пневмоконтактных датчиков. Такие приборы настраивают по эталонной лопатке.

Многомерные приборы и измерительные машины можно быстро перенастраивать на контроль других лопаток. Эти приборы снабжены соответствующими элементами для настройки. Область их применения — промежуточный и окончательный контроль. Базой для крепления лопатки является замок или центровые углубления, два из которых имеются на боковых поверхностях замка и одно — у конца пера. К числу таких приборов относятся универсальные многомерные оптико-механические приборы (ПОМКЛ) для одновременного контроля профиля пера, смещения пера с

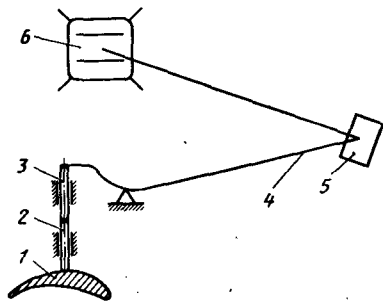


Рис. 16.23. Схема опико-механического прибора ПОМКЛ-4 для контроля профиля пера лопаток компрессора:
1 - лопатка; 2, 3 - контрольный и измерительный стержни; 4 - рычаг; 5 - зеркало; 6 - экран

оси замка, угла закрутки и толщины пера в поперечных сечениях лопатки компрессора (рис. 16.23).

Контроль криволинейной поверхности профиля сечения в приборах типа ПОМКЛ осуществляется следующим образом. По профилю проверяемого сечения пера лопатки устанавливаются с определенным шагом контактные стержни. Свободные концы стержней по эталону приведены к единой плоскости измерения. Отклонения профиля пера от заданного вызывают перемещения контактных стержней, передающиеся на измерительные стержни и далее на рычажки с соотношением плеч 5:1. Концы рычажков проектируются на экран с увеличением 10:1, обеспечивая общее увеличение 50:1. На экране устанавливаются границы поля допуска, по которым можно определять пригодность контролируемой лопатки. В зависимости от погрешности профиля в контролируемом сечении концы рычажков на экране либо отклоняются по отдельности от базовых прямых (при местных погрешностях профиля), либо все сместятся параллельно базовым прямым (при смещении всего сечения), либо расположатся на одной прямой под углом к базовой линии (при погрешности в угле закрутки). Лопатка в приборе закрепляется по замку. Контроль производится по точкам с шагом 5 мм. Точность измерения 0,02 мм, производительность - до 250 лопаток в час.

Основные геометрические параметры замков лопаток турбины и компрессора обычно проверяются механическими приборами с индикаторными часами, настраиваемыми по эталону.

Частоты собственных колебаний рабочих лопаток компрессора проверяют на электродинамических вибростендах.

Вопросы для самоконтроля

1. Каковы основные конструктивные элементы лопаток ГТД?
2. Из каких материалов изготавливают лопатки?
3. Какие виды заготовок лопаток и методы их изготовления используют в отрасли?
4. Какие поверхности лопаток турбины и компрессора используют для технологических баз?
5. Какими методами обрабатывают хвостовики лопаток ротора турбины и компрессора?
6. Как обрабатывают перо лопаток?
7. Каковы наиболее перспективные технологические методы повышения ресурса и надежности работы лопаток?
8. Каковы методы и средства технического контроля лопаток?

Глава 17. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

17.1. Конструкция, технические условия и материалы

В современных газотурбинных двигателях многие детали и узлы изготавливают из листового материала. До 20 % массы двигателя приходится на детали из листовых материалов, а трудоемкость изготовления их составляет около 15 % общей трудоемкости изготовления двигателя. Из листовых материалов изготавливаются оболочки и рубашки камер сгорания, детали форсажной камеры, створки, заслонки, корпуса компрессоров, баллоны, баки и многие другие детали и узлы.

Детали из листа можно разделить на плоские (прокладки), изогнутые (скобы, проушины) и объемные (оболочки) замкнутого контура. Они бывают цельные, сварные, паяные.

Технические условия на изготовление деталей из листового материала включают требования в отношении точности размеров и формы, герметичности, физико-химического состояния поверхностного слоя, покрытий и сварочных швов.

Требования к герметичности предъявляют только к конструкциям, которые работают в условиях высоких давлений или служат емкостью для жидкости. Такие узлы, как правило, подвергают гидротестам под давлением на 50...100 % выше рабочего.

Высокие требования предъявляются к поверхностному слою, особенно деталей, образующих проточную часть двигателя. На поверхностях деталей проточной части не должно быть сборок, складок и трещин, а шероховатость их должна соответствовать шероховатости прокатанного материала. В ряде случаев задают более высокую степень чистоты. Например, у лопаток входного патрубка шероховатость должна соответствовать $Ra = 0,63...0,15$ мкм, обеспечиваемая полированием.

Материалы для деталей из листа. При выборе материала учитывают рабочие нагрузки, среду и температурные условия, в которых работают детали, назначение и срок службы двигателя.

Материалы деталей из листа должны обладать не только хорошими эксплуатационными, но и технологическими свойствами: штампуемостью (способностью к пластическому деформированию), свариваемостью, паяемостью и обрабатываемостью резанием.

Для обработки давлением наиболее подходящими являются материалы, обладающие относительно малым пределом текучести, низкой твердостью и большим удлинением. Из них можно изготовить деталь за минимальное число переходов. Материалы с относительно равномерным удлинением меньше 5 %, как правило, требуют нагрева при формовании, а следовательно, вызывают удлинение цикла обработки и повышение ее стоимости.

Листовые детали газотурбинных двигателей изготавливают из следующих конструкционных материалов: алюминиевых сплавов АД1, АМц, АМг6, Д16; магниевых сплавов М1, М2, М3; титановых сплавов ВТ1-0, ВТ1-00,

ОТ4-0, ОТ4-1, ОТ4, ВТ14*, ВТ60*, ВТ5-1*, ВТ2*, ВТ20*, сталей 12Х18Н10Т, 08Х18Н10, 20Х13НГ9, 20Х23Н18, ХН38Т, 15Х18Н12С4Т10, 07Х16Н6, 08Х17Н5М3, 08Х15Н5Д2Т; жаропрочных сплавов ЭП648, ЭП718, ЭИ894К, ЭИ602, ВЖ98, ВЖ100, ВЖ101 и др.

При выборе материала из титановых сплавов следует учитывать, что эти материалы являются труднообрабатываемыми. По технологической пластичности при комнатной температуре листовые титановые сплавы различают: пластичные ВТ1-0, ВТ1-00; средней пластичности ОТ4-0, ОТ4-1 и ОТ4 и малой пластичности ВТ14, ВТ6С, ВТ5-1, ВТ20. Изготовление деталей из этих сплавов связано с применением специального оборудования, с повышенным износом оснастки и длительным циклом изготовления. Поэтому необходимость применения высокопрочных титановых сплавов должна быть обоснована условиями эксплуатации детали. Детали из титановых сплавов не рекомендуется изготавливать из листа толщиной менее 0,6 мм.

Технологичность деталей из листовых материалов. Эти детали должны иметь по возможности простой контур и геометрическую форму, плавные переходы от одного сечения к другому, с обязательным соблюдением рекомендуемых соотношений между отдельными конструктивными элементами. Элементы штампуемых деталей должны быть унифицированы. Это существенно облегчит подготовку к серийному производству. Унификации подлежат диаметры отверстий и деталей, получаемых пробивкой и вытяжкой, радиусы сопряжений плоских и объемных деталей; элементы жесткости; узлы гибки. Более подробно о технологичности деталей из листовых материалов см. в подразд. 6.6.

17.2. Построение технологических процессов изготовления деталей и узлов из листовых материалов

Наиболее сложными являются технологические процессы изготовления деталей и узлов в виде оболочек (камеры сгорания, сопла и др.).

Основные этапы технологического процесса изготовления деталей и узлов типа оболочек

1. Изготовление заготовок для деталей из листа.
2. Операции формообразования детали (гибка, штамповка и др.).
3. Механическая обработка деталей перед сваркой или лайкой.
4. Сборка деталей в узел перед сваркой или пайкой.
5. Сварка или пайка узла.
6. Обработка узлов после сварки или лайки.
7. Нанесение покрытий или окрашивание поверхностей.

При наличии особых требований в технологический процесс могут быть введены дополнительные операции, например зиговка, полирование и др.

Заготовки для деталей из листа. Заготовкой для формообразования деталей из листа является плоская заготовка. Чтобы изготовить плоскую заготовку, необходимо:

* Материалы с малой пластичностью при холодном деформировании; для деталей из листов этих сплавов толщиной свыше 1,8 мм требуется технологический нагрев заготовок и штампа до 700°С.

1. Определить форму и размеры плоской заготовки.
2. Выбрать листовой материал.
3. Раскроить и разрезать листы на полосы или квадраты.
4. Подготовить материал (полосы, квадраты) к вырубке или вырезке плоской заготовки.
5. Вырубить или вырезать плоскую заготовку.
6. Подготовить плоскую заготовку к операциям формообразования.

Форму и размеры плоской заготовки можно определить одним из следующих методов: методом равенства площадей; расчетом длин по средней линии; методом равенства объемов или масс; графоаналитическими методами.

Выбор метода расчета размеров плоской заготовки определяется формой детали. Например, для детали, состоящей из простых элементов, определяют методом равенства площадей. Для получения размеров плоской заготовки детали, получаемой гибкой с незначительной вытяжкой, наиболее удобным является метод расчета длин по средней линии. Метод равенства масс используют при наличии изготовленной детали. Плоские заготовки для деталей сложной геометрической формы обычно определяют методами равенства объемов или графоаналитическим.

Определив размеры плоской заготовки, выбирают из имеющегося сортамента или заказывают требуемый лист. Выбранные листы раскраивают и разрезают на полосы или квадраты требуемого размера. Допускаемые отклонения по ширине полосы или стороне многоугольника (в зависимости от размеров) — 0,5...2 мм. Листы иногда раскраивают на несколько различных деталей одинаковой толщины. Это позволяет наиболее выгодно использовать площадь листа, уменьшить технологические потери материала.

Разрезают листы на полосы или квадраты в крупносерийном производстве на гильотинных ножницах или в штампах на гидропрессах, в единичном и мелкосерийном производстве — пилами (дисковыми, ленточными, ножовками), газовой и лазерной резкой.

Подготовка материала к вырубке или вырезке плоской заготовки заключается в смазке листа машинным или отработанным моторным маслом для предохранения его от коррозии, облегчения условий вырубки или вырезки плоской заготовки. Стойкость вырубных штампов при этом увеличивается на 10...15 %.

Вырубка плоской заготовки производится штампом на кривошипном прессе. На рис. 17.1 приведена схема вырубки плоской заготовки штампом

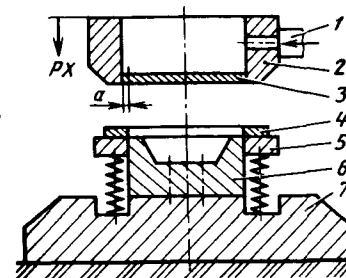


Рис. 17.1. Схема вырубки плоской заготовки на вырубном штампе с верхним расположением матрицы: 1 — подача воздуха для выталкивания заготовки; 2 — матрица; 3 — плоская заготовка; 4 — полоса; 5 — съемник; 6 — пуансон; 7 — подушка

с верхним расположением матрицы. При движении верхней части штампа вниз матрица 2, надавливая через материал на съемник 5, опускает его вниз, благодаря чему обнажается пуансон 6 и производится вырубка заготовки. При обратном ходе остающийся на пуансоне отход снимается с него съемником 5, а вырубленная заготовка выбрасывается из матрицы сжатым воздухом, подаваемым через патрубков 1.

Для обеспечения правильного процесса вырубки между матрицей и пуансоном предусматривается зазор, величина которого зависит от толщины и марки материала. Значение зазора выбирают по справочным данным. Например, для листа толщиной 2 мм из сталей 1Х18Н9Т и ЭИ417 оптимальный двухсторонний зазор между режущими кромками пуансона и матрицы составляет 0,2 мм.

Для выбора пресса определяют прежде всего необходимое усилие вырубки P по формуле

$$P = L t, \quad (17.1)$$

где L — периметр плоской заготовки; t — толщина материала листа, мм; τ — сопротивление вырубке, Н/мм².

В зависимости от предела прочности σ_B и других факторов принимают для стали $\tau = (0,75 \dots 0,90) \sigma_B$, а для алюминия $\tau = (0,6 \dots 0,9) \sigma_B$. Верхние предельные значения относятся к материалам толщиной от 0,5 до 2 мм, нижние — к материалам толщиной от 2 мм и выше.

Штампами с резиновой матрицей (рис. 17.2. а) вырубают плоские заготовки из алюминиевых сплавов толщиной до 1,5 мм, магниевые — до 2,5 мм, стальных — не более 1,0 мм. Роль пуансона в таком штампе выполняет стальная пластина (шаблон), а роль матрицы — резиновая подушка, имеющая относительное удлинение около 400 % и сжатие при нагрузке 10 МН/м² в пределах 40...60 %. Толщина шаблона 6...12 мм, толщина резины 30...60 мм.

Штампы с резиновой матрицей дешевле металлических. Их устанавливают обычно на фрикционных прессах.

В мелкосерийном и единичном производстве плоские заготовки вырезают на роликовых или вибрационных ножницах (для тонких круглых заготовок), газовым резаком (для толстостенных заготовок сложной формы) или плазменной горелкой.

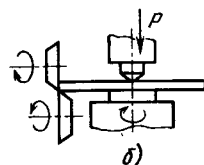
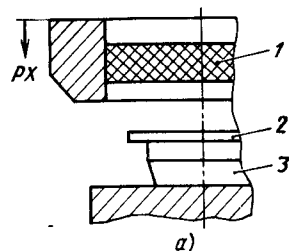


Рис. 17.2. Схемы вырубки и вырезки плоской заготовки:
а — вырубка плоской заготовки в штампе с резиновой матрицей; 1 — резиновая матрица; 2 — полоса (квадрат); 3 — шаблон (пуансон); б — вырезка круглых заготовок на роликовых ножницах

Вырезка круглых заготовок на роликовых ножницах показана на рис. 17.2. б. На ножницах можно также вырезать плоские заготовки с контуром сложной формы, предварительно разметив ее по шаблону. Кромки заготовок получаются довольно ровными, поэтому припуск на механическую обработку в этом случае принимают таким же, как и при вырубке под штампом.

Газовую вырезку производят по разметке. Используют также различные копируемые устройства. Кромки получаются неровными, поэтому припуск на последующую механическую обработку увеличивают.

17.3. Выполнение основных операций технологического процесса изготовления деталей из листа

Операции формообразования деталей из листового материала — основные операции в технологическом процессе изготовления деталей из листа. В зависимости от формы и размеров детали применяют следующие процессы формообразования: гибка; штамповка-вытяжка; формообразование разжимным пуансоном; ротационное выдавливание; штамповка жидкостью, взрывом; гидроэлектрическая штамповка.

Гибка используется для деталей, имеющих незамкнутый контур (половинки сопел, пилонов и др.).

В крупносерийном производстве гибку осуществляют в штампах под прессом или в гибочных машинах.

Гибку в штампах применяют для деталей, имеющих простую форму, например, таких, как половинки сопла, и обычно производят ее в одну операцию. Для деталей толщиной 6 мм и более заготовку предварительно нагревают, например, для стали 25ХГСА — 1080°С.

Затраты при формообразовании деталей на гибочных машинах значительно меньше, чем в штампах.

Гибку детали, имеющих цилиндрическую, коническую, а также корытообразную форму, можно производить на универсальных гибочно-вальцовочных машинах. Недостатком такого метода является неизбежность недовальцовки кромки и низкая точность. Обычно после гибки-вальцовки детали приходится выправлять, на что затрачивается довольно много времени.

При изготовлении деталей авиационных двигателей широко используется метод гибки с предварительным растяжением на специальных гибочных машинах. Этот метод позволяет получить точность, соответствующую примерно 8...9-му качеству, а отходы сократить до минимума. Он применим для изготовления деталей как малой, так и большой толщины из различных материалов, в том числе и жаропрочных.

Различают два способа гибки с растяжением: гибки с вращением формблока и гибка огибанием.

Гибка с вращением формовочного блока (рис. 17.3, а) осуществляется следующим образом. Прокатанную полосу зажимают одним концом на формблоке, а другим — в специальном быстродействующем захвате, связанном со штоком гидравлического цилиндра. Затем полосу растягивают и в растянутом состоянии накручивают на вращающийся формблок.

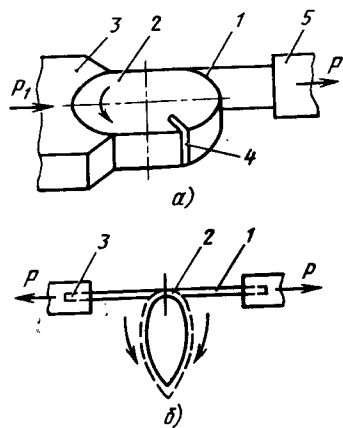


Рис. 17.3. Схема гибки с растяжением заготовок из полосы:
а — гибка с вращением; 1 — полоса, деформированная растяжением; 2 — формовочный блок; 3 — башмак; 4 — паз для заделки конца полосы; 5 — гидрозажим; б — гибка с огибанием; 1 — полоса, деформированная растяжением; 2 — пуансон; 3 — гидрозажим

На протяжении всего процесса гибки усилие растяжения поддерживают постоянным. Иногда деталь прижимают к вращающемуся формблоку башмаком из бронзы, закрепленным на штоке бокового гидравлического цилиндра. Боковой прижим обеспечивает более высокую точность детали. Во избежание надиров на детали и формблоке последний перед началом гибки смазывают консистентной смазкой. После гибки деталь в форме кольца имеет один разрез, который затем сваривают стыковой сваркой.

Схема гибки огибанием приведена на рис. 17.3,б. При гибке обоими способами в материале создаются напряжения, превышающие предел текучести (но не превышающие предел прочности). Исходя из этого определяют усилие растяжения:

$$P = \sigma_{0,2} F,$$

где $\sigma_{0,2}$ — предел текучести; F — площадь поперечного сечения заготовки.

Исходные заготовки (полоса) перед операцией гибки с растяжением не должны иметь отверстий и вырезов.

Штамповка деталей из листа. Штамповка (пластическое деформирование материала) — один из самых эффективных методов изготовления деталей из листа. Основными преимуществами штамповки являются: возможность получения деталей минимальной массы при заданной прочности и жесткости; высокий КИМ; высокая производительность труда и широкая возможность механизации и автоматизации процесса.

Целесообразность применения различных способов штамповки определяется с учетом масштаба производства, размеров и формы деталей и свойств материала. Ориентировочно считается, что в единичном производстве применение штамповки рационально только в случае использования универсальных штампов, в мелкосерийном и серийном производствах рекомендуется применять методы холодного пластического деформирования листовых материалов для получения деталей в инструментальных штампах на универсальных прессах или на специализированных молотах.

Различные способы холодной штамповки с использованием универсального кузнечно-прессового оборудования (механических, гидравличес-

ких прессов и др.) позволяют получить детали по 14-му качеству. Введением операций по калибровке и зачистке можно достигнуть их точности по 12...14-му качеству. Применение специальных прессов с импульсным характером нагрузки позволяет изготовить детали по 8...11-му качеству. Детали с точностью 7...9-го качества можно получить горячей листовой штамповкой с термофиксацией или штамповкой в условиях сверхпластичности материалов. Практика показывает, что повышение точности изготовления детали на 1,5...2 качества вызывает значительное, более чем в три раза, увеличение производственных расходов, поэтому при назначении допусков на размеры листовых деталей следует руководствоваться нормами экономической точности (табл. 17.1) для каждого возможного метода изготовления проектируемой детали.

Таблица 17.1

Точность и шероховатость поверхности листовых деталей, полученных в заготовительно-штамповочном производстве

Способ изготовления детали	Точность, качество	Шероховатость Ra , мкм (ГОСТ 2789—73)
Резка на ножницах материала длиной до 2000 м	14	—
Вырубка в штампах на универсальных прессах толщиной до 3 мм	12...13	20...10
То же для листов толщиной 3...5 мм	14	20...10
Чистовая вырубка в специальных штампах на специальном оборудовании	15	2,5...1,25
Гибка в инструментальных штампах	14...15	Соответствует шероховатости заготовки
Штамповка-вытяжка	11...13 (по диаметру)	2,5...1,25
Вытяжка в горячем состоянии	14	—
Вытяжка с калибровкой	7...9	0,64...0,32
Вытяжка и формовка взрывом и другими импульсными методами	12...13	0,32...0,16

Из-за высокого соотношения предела текучести и модуля нормальной упругости детали из титановых сплавов после штамповки имеют меньшую точность, чем соизмеримые с ними детали из алюминиевых сплавов. Более высокую точность деталей рекомендуется назначать только в случае оправданной необходимости.

Штамповка-вытяжка деталей

Подготовка плоских заготовок к штамповке-вытяжке. Процесс штамповки-вытяжки сопровождается значительным трением о поверхности

прижима, матрицы и пуансона штампа. Сухое трение часто приводит к образованию надиров и сборок на детали и быстрому износу штампа. Во избежание этого плоские заготовки перед вытяжкой смазывают чистым маслом, маслом с графитом и т. д. Однако лучшие результаты получают, если при покрытии заготовки тонким слоем перхлорвинилового лака ХВЛ-21 с последующей смазкой покрытых плоскостей маслом. Слой лака наносят распылителем и просушивают в печи или на воздухе. В тех случаях, когда деталь штампуют за несколько операций, после каждой вытяжки проводят термическую обработку (отжиг), при которой слой лака сгорает. Поэтому операцию подготовки необходимо проводить перед каждой операцией штамповки. Если же деталь штампуют в нагретом состоянии, то надобность в такой подготовке, как правило, падает.

Штамповка-вытяжка деталей типа оболочек

Разрабатывая технологический процесс штамповки, необходимо определить число операций вытяжки. При определении числа операций вытяжки стремятся, чтобы в каждой операции напряжения в металле не превосходили предела прочности, однако при полном использовании и его пластических свойств.

Обычно число операций и их последовательность определяют на основе экспериментально установленных коэффициентов вытяжки, представляющих собой отношение последующего (после операции) диаметра к предыдущему. Например, для первой операции коэффициент вытяжки

$$m_0 = d_1/d_0, \quad (17.3)$$

где d_1 — диаметр детали после первой вытяжки; d_0 — диаметр плоской заготовки.

Для последующих операций коэффициенты вытяжки представляют собой отношения

$$m_1 = d_2/d_1; m_2 = d_3/d_2; \dots; m_{n-1} = d_n/d_{n-1}, \quad (17.4)$$

где $d_1, d_2, d_3, \dots, d_{n-1}$ — диаметры промежуточных форм заготовок; d_n — диаметр готовой детали.

Средние значения коэффициентов вытяжки для стали в зависимости от относительной толщины материала приведены в табл. 17.2.

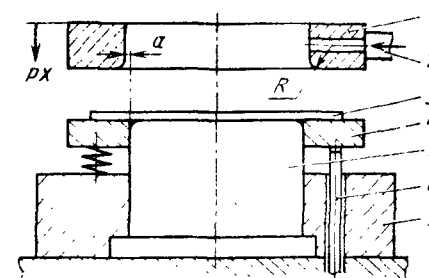
Таблица 17.2

Средние значения коэффициентов вытяжки

- Коэффициент вытяжки	Относительная толщина материала t/d , %					
	2,0 ... 1,5	1,5 ... 1,0	1,0 ... 0,6	0,6 ... 0,3	0,3 ... 0,15	0,14 ... 0,08
m_0	0,5	0,53	0,55	0,58	0,60	0,63
m_1	0,75	0,76	0,78	0,79	0,80	0,82
m_2	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,84
m_3	0,80	0,82	0,82	0,83	0,85	0,86
m_4	0,82	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88

Рис. 17.4. Схема штамповки-вытяжки детали из плоской заготовки:

1 — матрица; 2 — воздух для выталкивания детали; 3 — плоская заготовка; 4 — сьемник; 5 — пуансон; 6 — выталкиватель; 7 — пуансонодержатель



На заводах принимают иногда более высокие коэффициенты $m_0 = 0,6 \dots 0,7$, чтобы избежать образование трещин из-за неравномерной толщины материала.

Схема штамповки детали из плоской заготовки показана на рис. 17.4. При рабочем ходе пресса заготовка вначале зажимается между верхней и нижней частями штампа, а затем в течение всего рабочего хода пресса вытягивается. При проектировании штампа или выборе пресса особое внимание должно быть уделено обеспечению необходимого давления прижима плоской заготовки. Если давление будет недостаточным, то при вытяжке у детали могут образоваться складки или морщины, а если оно чрезмерно велико, то может образоваться разрыв материала. Оба дефекта неисправимы. Опытным путем установлено, что, например, для вытяжки стальной детали с толщиной стенки 1,5...2,0 мм давление прижима должно быть около 2,5 МН/м².

Важно также выбрать правильный зазор между матрицей и пуансоном, при котором наименее вероятны задиры при штамповке. Зазор устанавливается в зависимости от материала, операции вытяжки и выбирается в пределах (1,1...1,5) t на сторону. Иногда для начальных операций вытяжки зазор дополнительно увеличивают на 0,05...0,1 мм (учитывая, что материал может быть неравномерной толщины). На качество вытяжки влияет также и радиус закругления от плоскости к отверстию матрицы. Обычно радиус закругления составляет 6...10 толщин штампуемого материала. Переход должен быть гладким, его полируют. В конструкции штампов предусматривают устройство для снятия отштампованной детали с пуансона или выталкивания ее из матрицы механически или сжатым воздухом (рис. 17.4). Воздух поступает из заводской магистрали. Штампы, в которых для выталкивания детали применен сжатый воздух, более просты по конструкции, удобнее в эксплуатации и позволяют использовать прессы, не имеющие толкачей.

Усилие, необходимое для вытяжки детали в штампах, определяют обычно по эмпирическим формулам. При расчете по ним усилие вытяжки должно быть несколько меньше, чем усилие, необходимое для отрыва дна заготовки по опасному сечению:

$$P \leq L \cdot t \cdot \sigma_p, \quad (7.5)$$

где L — длина периметра детали; t — толщина материала; σ_p — разрушающее напряжение. Соответственно расчетному усилию подбирается пресс.

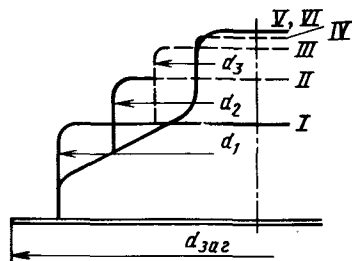


Рис. 17.5. Схема штамповки-вытяжки входного конуса жаровой трубы камеры сгорания: IV — вытяжки; VI — калибрование

Термообработка. После каждой операции штамповки-вытяжки предусматривается термообработка (отжиг) для восстановления пластичности материала детали. Нагревают детали в электрических печах. Температура нагрева различна для разных материалов. Например, секции жаровой трубы из сплава ЭИ435 нагревают до 1050°C , выдержка 15...20 мин, охлаждение на воздухе.

После термообработки с поверхностей детали удаляют окалину травлением или пескоструйной обработкой. Перед каждой следующей операцией вытяжки необходимо снова проводить подготовку — покрыть деталь лаком и маслом. Процесс термообработки обычно сопровождается короблением детали, поэтому после последней операции вытяжки и термообработки детали необходимо формовать (калибровать) без последующей термообработки.

В качестве примера на рис. 17.5 приведена схема штамповки-вытяжки конуса жаровой трубы камеры сгорания ГТД за пять операций вытяжки и одну — формовки.

Формовка (калибровка) деталей. Окончательно формируют деталь чаще в штампах, реже — в гидроштампах. Штампы для формовки мало отличаются по конструкции от вытяжных штампов.

Гидроформование деталей в специальных штампах (рис. 17.6). Штамп состоит из двух частей — верхней и нижней, связанных с подвижной

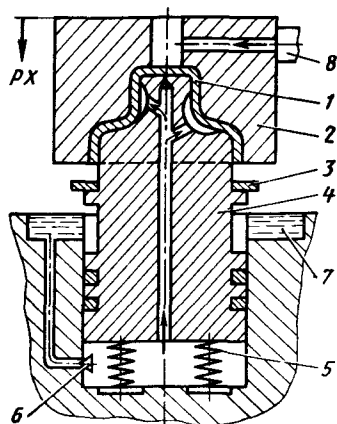


Рис. 17.6. Схема гидроформирования конуса жаровой трубы:

1 — формируемая деталь; 2 — матрица; 3 — упор; 4 — гидропуансон; 5 — пружина; 6 — обратный клапан; 7 — бачок с водой; 8 — воздух для выталкивания детали

и неподвижной частями гидравлического пресса. Перед началом рабочего хода, когда верхняя часть штампа поднята, пуансон-поршень 4 под действием пружин 5 поднят до упора 3. Полость под пуансоном-поршнем заполнена водой, поступающей через обратный клапан 6 из ванны 7. При рабочем ходе пресса формируемая деталь вначале зажимается (по нижней части) между пуансоном-поршнем и матрицей 2, а затем по мере опускания верхней части, а следовательно, и пуансона калибруется по форме матрицы под давлением воды. Вода выходит из полости под пуансоном-поршнем через центральное и наклонные отверстия в полость между деталью и пуансоном. При обратном ходе пресса пружины поднимают пуансон-поршень в исходное положение, а вода перетекает в полость под пуансоном. Деталь выталкивают из матрицы сжатым воздухом.

Точность гидроформования выше, чем формования в обычных штампах, поскольку давление на деталь распределяется равномерно, заставляя ее плотно прилегать к внутренней поверхности матрицы. При изготовлении такого штампа не требуется подгонять форму пуансона под форму матрицы.

Вытяжка с подогревом. Титановые сплавы ВТ6С, ВТ5-1, ВТ14, ВТ20 и др. имеют гексагональную кристаллическую решетку, поэтому обладают низкими пластическими свойствами. В холодном состоянии можно производить вытяжку только неглубоких деталей. Для вытяжки глубоких деталей из титановых сплавов необходим подогрев заготовки. Пластичность материала при этом улучшается. Процесс вытяжки может быть интенсифицирован, если ввести еще охлаждение стенок вытягиваемой детали. Охлаждение пуансоном позволяет повысить прочность стенки в опасной зоне. Температура подогрева заготовки для титановых сплавов до 700°C . Для смазки применяется масло „Вапор” с графитом. Вытяжку с подогревом заготовки рекомендуется выполнять на прессах, имеющих небольшую скорость движения ползуна, — лучше на гидравлическом прессе, чтобы дать возможность охладиться стенке. Матрицу и прижим следует изготавливать из жаропрочных материалов, например, из стали 5ХН13.

Формообразование деталей замкнутого контура разжимными пуансонами. Процесс формообразования разжимными пуансонами позволяет изготавливать детали: из материалов различной толщины, допускающих пластическое деформирование в холодном состоянии, степень деформации до $\epsilon_r = 0,18...0,20$; из заготовок, сваренных различными видами сварки, со сварными швами, выполненными встык и внахлестку, а также с несколькими сварными швами. Данный процесс изготовления деталей снижает трудоемкость в три и более раз по сравнению со штамповкой, ротационным выдавливанием и др.

Схема процесса формообразования разжимными пуансонами приведена на рис. 17.7. Заготовку 1 детали замкнутого контура, предварительно уменьшенную на величину принятого процента растяжения (за пределом упругости), надевают на разжимной пуансон и растягивают секторами 2, которые под действием усилия пресса P перемещаются по конусу 3 вниз и в радиальном направлении. Под действием напряжений, возникающих в заготовке при разжатии секторов, заготовка пластически деформируется и при достижении задаваемой степени деформации принимает форму по-

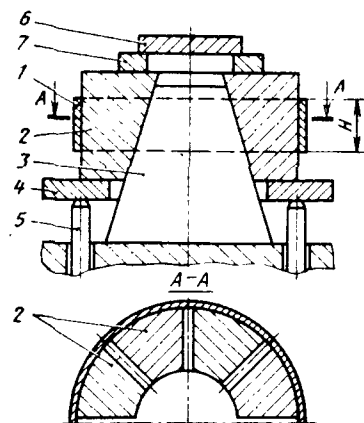


Рис. 17.7. Схема формообразования деталей замкнутого контура разжимными пуансонами:
1 — заготовка; 2 — секторы; 3 — конус; 4, 7 — направляющие; 5 — маркетные колонки; 6 — плита

верхности, образуемой секторами разжимного пуансона. Количество секторов разжимного пуансона должно быть не менее 12, для деталей диаметром 600...700 мм и более — 18...24. Оптимальное значение угла $\alpha = 8...15^\circ$ обеспечивает диапазон деформирования детали до $\epsilon = 0,2$ и наименьшие потери усилия.

Изготавливают детали замкнутых контуров методом растяжения разжимными пуансонами в два этапа: формообразование и калибровка.

Определение формы и размеров заготовки. При формообразовании деталей высоту H исходной цилиндрической заготовки или длину образующей определяют по формуле

$$\Psi H = H_0 (1 + \Psi) + B, \quad (17.6)$$

где H_0 — высота (длина образующей) по чертежу; Ψ — относительное уменьшение длины образующей в зависимости от степени деформации (рис. 17.8); $B = 10...12$ мм — припуск на подрезку торцев.

При калибровке заготовка имеет ту же форму, что и деталь, но размеры ее уменьшены на величину растяжения. Высоту заготовки (длину образующей) при калибровке принимают равной номинальным размерам детали или увеличивают на значение припуска на подрезку торцев в зависимости от метода изготовления предварительной формы детали.

Режим обработки. Увеличение степени деформации свыше 18...20% ограничивается наличием сварных швов у заготовки. При отсутствии свар-

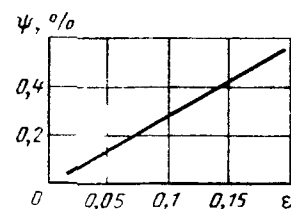


Рис. 17.8. График зависимости процесса утяжки заготовки по образующей ψ от степени деформации ϵ

ных швов (например, для заготовок, полученных вытяжкой) относительная степень деформации может быть увеличена.

Для получения деталей высокой точности формообразование делят на две операции: предварительную, при которой деталь не доводят до окончательных размеров на 2...3%, и после термообработки, окончательную.

Предельно допустимые степени деформации за одну операцию для заготовок, полученных аргоно-дуговой сваркой, разные для различных материалов. Например, для стали 20, Х18Н9Т, сплава ХН75МБТЮ (без термообработки сварного шва) $\epsilon = 0,18...0,20$; а для сплавов ВЖ98, ХН38ВТ — $\epsilon \approx 0,07...0,09$. При изготовлении деталей за несколько операций после каждой из них деталь подвергают термообработке.

Точность изготовления деталей. При формообразовании и калибровке деталей растяжением происходит сокращение размеров деталей вследствие упругих деформаций; окончательные размеры деталей по диаметрам меньше номинальных (размеров разжатого пуансона) на величину упругой деформации

$$D_1 = D(1 + \epsilon_y), \quad (17.7)$$

где D_1 — диаметр детали в конечный момент деформации; D — размер детали по чертежу; ϵ_y — упругая деформация.

Величину упругой деформации (пружинения) компенсируют двумя способами: увеличением размера разжимного пуансона на величину упругой деформации или опусканием разжимного пуансона по конусу вниз до достижения диаметра, равного сумме номинального размера и величины упругой деформации.

При формообразовании деталей со степенью деформации 18...20% наибольшее утонение материала не превышает 10...15%, при калибровке толщина стенки практически не изменяется.

Усилие деформирования. Усилие пресса, необходимое для формообразования деталей, рассчитывается по формуле

$$P = 2\pi t_3 H \frac{\delta_B K}{A}, \quad (17.8)$$

где t_3 — толщина заготовки; H — длина образующей заготовки; K — коэффициент, учитывающий влияние формы детали: (для цилиндрических деталей $K = 1,0$; выпуклой $K = 0,85$; вогнутой $K = 0,63$); σ_B — предел прочности при растяжении; A — величина, зависящая от коэффициента трения μ (равен 0,2...0,3) и угла конуса α , находят по графику.

Выдавливание деталей с утонением. Этим методом можно изготовить сложные детали цилиндрической и конической формы с прямолинейной или криволинейной образующей, имеющие постоянное, переменное или ступенчатое сечение стенок.

Схема выдавливания деталей с утонением, иногда называемого ротационным выдавливанием, приведена на рис. 17.9. Придание детали требуемой формы обеспечивается методом холодной прокатки металла путем перераспределения его объема.

Процесс выдавливания деталей осуществляют на токарно-давильных и

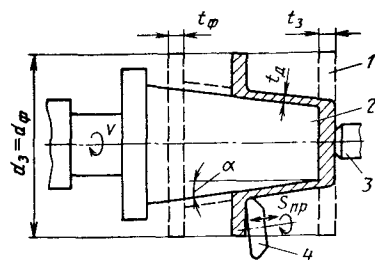


Рис. 17.9. Схема выдавливания деталей с утонением:
1 — заготовка; 2 — оправка; 3 — прижим;
4 — давящий ролик

специальных станках. Заготовку 1 зажимают между оправкой 2 и прижимом станка 3. К вращающейся заготовке подводится давящий ролик 4, который под действием нормального и осевого усилий, передаваемых суппортом, пластически деформирует заготовку по мере перемещения ролика относительно оправки. Степень деформации (обжатия) при выдавливании

$$\delta = \frac{t_3 - t_d}{t_3} 100\% = (1 - \sin \alpha) 100\%. \quad (17.9)$$

Высота выдавливаемых с утонением деталей не зависит от степени деформации и может быть получена любой величины, она зависит от диаметра начальной заготовки и угла оправки. Оправки для выдавливания обычно изготавливаются из инструментальной стали с твердостью HRC 56...60; поверхности тщательно полируются. Давильные ролики в виде усеченного конуса с радиусами закругления изготавливают из быстрорежущей стали с твердостью до HRC 70.

Заготовки. Вид заготовки зависит от материала, формы и размеров детали. Заготовки могут быть получены из листового металла вырубкой, глубокой вытяжкой. Заготовки могут быть плоскими в виде диска, цилиндрическими, коническими, полученными предварительной вытяжкой, ковкой или горячей штамповкой, отливкой, сваркой из труб.

При выдавливании наружный диаметр заготовок выбирают равным диаметру фланца детали, а внутренний диаметр заготовки равен внутреннему диаметру детали. Толщину заготовки определяют из условий равенства объемов металла заготовки и детали:

для цилиндрических деталей (рис. 17.10, а)

$$t_3 = t_d \frac{l_d}{l_3} \quad (17.10)$$

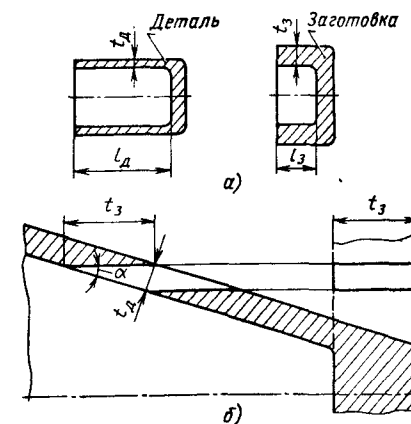
для конических деталей (рис. 17.10, б)

$$t_3 = t_d / \sin \alpha, \quad (17.11)$$

где t_d — толщина стенки детали; t_3 — толщина плоской заготовки (диска); l_d, l_3 — глубина внутренней полости цилиндрической детали и заготовки соответственно; α — угол конуса.

Режим выдавливания. Большинство сталей и сплавов обрабатывают при комнатной температуре. Титан и его сплавы из-за низкой пластичности

Рис. 17.10. Определение толщины заготовки при выдавливании цилиндрической (а) и конической (б) деталей



выдавливаются только с подогревом до температуры около 540°С. Давление на ролик при выдавливании $200 \cdot 10^7 \dots 300 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$. Большинство металлов обрабатывают со скоростью около 300 м/мин и подачей ролика 0,2...0,6 мм/об. За один переход можно изготовить детали при условии, что степень деформации материала будет не более 75% у цветных металлов и 65% у стальных. Если степень деформации превосходит приведенные значения, то изготавливать деталь следует в две операции с промежуточным отжигом.

Выдавливание осуществляется с охлаждением водной эмульсией и смазкой детали суспензией коллоидного цинка или моледисульфитными пастами.

Выдавливание с утонением обеспечивает: толщину стенки детали не менее 0,5 мм с точностью $\pm 0,05$, а по диаметру — $\pm (0,1 \dots 0,2)$ мм, шероховатость поверхности $Ra = 1,25 \dots 0,63 \text{ мкм}$.

Экономичность метода — нет потери металла в стружку, относительно невысокая стоимость оборудования и оснастки. Выдавливанием с утонением изготавливают валы, корпуса компрессоров, подшипников, обтекатели, камеры сгорания и другие детали.

Штамповка жидкостью. Формообразование деталей давлением жидкостью по сравнению с обычными методами их изготовления имеет следующие преимущества: получение крупногабаритных деталей, которые не могут быть изготовлены на существующих прессах; изготовление деталей, размеры которых увеличиваются у дна; возможность изготовления деталей без применения прессов, в штампах-матрицах, устанавливаемых на полу или в специальных установках.

Заготовки для штамповки жидкостью могут иметь плоскую форму или замкнутый контур (цилиндрические, конические и др.). Этим способом наиболее целесообразно изготавливать крупногабаритные детали типа днищ и конусных деталей замкнутого контура при сравнительно небольшой толщине. Схема штамповки жидкостью деталей замкнутого контура показана на рис. 17.11.

Штамповка взрывом. Штамповку взрывом наиболее эффективно при-

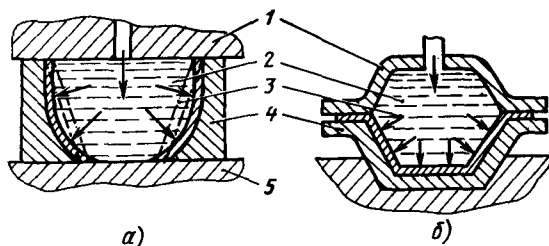


Рис. 17.11. Схема штамповки жидкостью деталей замкнутого контура:

а — коническая заготовка; б — плоская заготовка; 1 — верхняя крышка; 2 — жидкость; 3 — заготовка; 4 — матрица; 5 — нижняя крышка

менять при изготовлении крупногабаритных деталей и узлов двигателей из различных конструкционных материалов, в том числе из высокопрочных, при больших толщинах (детали из титановых и жаропрочных сплавов, молибдена и других материалов диаметром до 6 м и толщиной до 15 см). Для осуществления штамповки взрывом необходимы: *энергоноситель; среда; передающая давление (энергию взрыва) заготовке; матрица; дополнительные устройства* в зависимости от вида энергоносителя (труба, бак, бассейн и др). В качестве энергоносителя используют: горючие смеси, пороха и бризантные взрывчатые вещества (ВВ).

Штамповка горючими газовыми смесями (рис. 17.12) осуществляется парами бензина, метила, ацетиленом, метаном и другими газами, смешиваемыми с воздухом или кислородом. Нарастание давления в горючей смеси (быстрее, медленнее) зависит от содержания кислорода и начального давления, при котором происходит сгорание. Предварительное сжатие газовой смеси увеличивает конечное давление расширяющихся газов примерно пропорционально его величине. Давление горючей газовой смеси на заготовку может передаваться непосредственно, жидкостью или через поршень-воду.

При работе с горючими газами требуется тщательная вентиляция и систематическая очистка камеры.

Штамповка порохами. Пороха различают дымные и бездымные. Дымные пороха (65...75% калийной селитры, остальное сера и древесный уголь) при горении образуют большое коптящее пламя. *Бездымные пороха* (пироксилиновые и нитроглицериновые) не дают большого коптящего пламени, как дымные пороха, но содержат большое количество азотистых соедине-

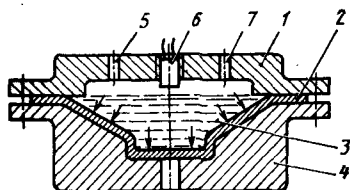
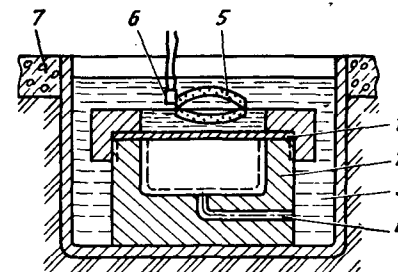


Рис. 17.12. Схема штамповки деталей горючими газовыми смесями с передачей давления на заготовку жидкостью:

1 — верхняя крышка; 2 — заготовка; 3 — вода; 4 — матрица; 5 — кислород; 6 — свеча; 7 — горючие газы

Рис. 17.13. Схема штамповки деталей взрывом:

1 — заготовка; 2 — матрица; 3 — вода; 4 — канал для вакуумирования полости штампа; 5 — кольцевой заряд ВВ; 6 — детонатор; 7 — бетон



ний, загрязняющих воздух. При работе с любыми порохами необходимо следить за тщательным удалением остатков взрыва.

Давление, создаваемое в камере сгорания пороховыми газами, может передаваться на заготовку непосредственно, через жидкость или инструмент.

Штамповка бризантными взрывчатыми веществами (рис. 17.13). Время превращения бризантного ВВ в газообразные продукты исчисляется долями секунды. Скорость детонации этих ВВ равна 1500...7500 м/с и зависит от типа бризантного вещества. Давление у поверхности заряда может достигать 27000 МН/м².

При штамповке взрывом применяют бризантные взрывчатые вещества аммониты, тротил, гексаген и др.

Энергию взрыва деформируемой заготовке можно передать непосредственно, через воздух, жидкость, сыпучее тело. Чем плотнее будет среда, тем больше используется энергия взрыва. Лучшей средой является вода. Плотность воды в 750 раз больше плотности воздуха, она дешева, растворяет в себе продукты распада ВВ, лучше поглощает ударную волну. Установки для формования деталей взрывом располагают в открытых местах, строго соблюдая все меры техники безопасности. Взрывчатые вещества и детонаторы хранят в специальных сейфах, имеющих негорючие стенки.

Установки для штамповки взрывом бывают бассейного и наземного типов. Резервуар наземного типа собирают из секций. Установки бассейного типа универсальные, более сложные. При формовании деталей взрывом требуются только матрицы, монолитные или в виде кольца. В монолитных матрицах предусматривают систему отверстий для удаления воздуха из рабочей полости. При единичном производстве матрицы изготавливают из дерева и бетона с эпоксидной облицовкой. Верхняя часть таких матриц изготавливается стальной.

Гидроэлектрическая штамповка (рис. 17.14). Сущность метода заключается в следующем. При импульсном электрическом разряде высокого потенциала в жидкости, непосредственно в зоне канала разряда, образуется паровой пузырь. Температура внутри пузыря достигает десятков тысяч градусов, давление — несколько тысяч атмосфер. Внезапное увеличение объема вызывает в окружающей жидкости ударную волну, которая распространяется со сверхзвуковой скоростью и создает первый *гидравлический удар*. Постепенно давление внутри пузыря падает и его полость смыкается,

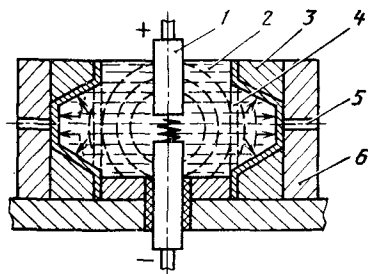


Рис. 17.14. Схема гидроэлектрической штамповки деталей:

1 — электрод; 2 — вода; 3 — матрица; 4 — заготовка; 5 — канал для воздуха; 6 — держатель матрицы

создавая второй — *кавитационный удар*. Ударная волна, встречая на своем пути заготовку, передает ей часть своей энергии, вследствие чего и происходит формование.

Обработка отверстий, углублений, выступов, отбортовка и зиговка. В соответствии с требованиями чертежа часто приходится в детали или узле осуществлять ряд операций по обработке отверстий, углублений или выступов, отбортовке и зиговке.

Отверстия в деталях из листового материала сверлят или пробивают штампом. При разработке операции приходится учитывать как рентабельность применения того или иного метода обработки при данном масштабе производства, так и требования качества деталей. Если, например, отверстия расположены на напряженной части детали, то их обычно сверлят во избежание дополнительных остаточных напряжений, которые могут возникнуть при пробивке штампов и привести к образованию трещин и разрушению детали во время ее работы. Отверстия сверлят также и в тех случаях, когда они близко расположены друг к другу или когда отношение их диаметров к толщине материала не превышает 1,0...1,5. При $d_{\text{отв}}/t \leq 1$ возможны поломки пуансонов штампа. В зависимости от масштаба производства и формы детали отверстия сверлят по разметке или через кондуктор. При большом числе отверстий, близко расположенных друг к другу, часто применяют кондукторы с делительным устройством или агрегатные станки. Пробивку отверстий штампом производят, как правило, на кривошипных прессах.

Углубления и выступы обычно оформляют штамповкой на эксцентриковых, кривошипных и фрикционных прессах в штампах. Однако этот метод не всегда применим. Опытном установлено, что качественная штамповка углублений или выступов может быть получена при отношении $h/d \leq 1,0$ для стальных деталей и $h/d \leq 1,3$ для деталей из алюминия и других мягких материалов. Здесь h и d — глубина и диаметр выступа.

Отбортовку малых отверстий производят в штампах со сменными пуансонами в расчете на проведение операции в несколько переходов. Зиговку выполняют на зигмашине, на шпинделях которой установлены и закреплены специальные ролики. Перед установкой обрабатываемой детали шпиндели разводят настолько, чтобы ролики не препятствовали установке. Кроме специальных машин для зиговки иногда используют токарные станки. Зиги выдавливают роликом, свободно сидящим на оси державки, закрепленной в суппорте станка. На токарных станках можно

также отбортовывать кромки детали, закатывать и выполнять другие подобные операции.

Механическая обработка. После вытяжки или тем более после гибки кромки деталей получаются неровными, поэтому перед сваркой их необходимо обработать. У деталей, свариваемых встык и имеющих толщину стенок более 3 мм, снимают еще и фаску под углом 45° . В некоторых случаях детали имеют переменную толщину стенки, тогда так же приходится проводить механическую обработку, используя различные копирующие устройства.

Соединение деталей. Детали из листовых материалов соединяются сваркой или пайкой, для чего они предварительно собираются в специальных приспособлениях, обеспечивающих требуемое взаимное их расположение. Иногда перед сваркой или пайкой детали соединяют между собой сварными точками (прихватка). Качество сварки в значительной мере определяется операциями сборки деталей под сварку и совершенством сборочно-сварочных приспособлений. Для сварки деталей двигателей применяются приспособления следующих основных видов: шаблоны для правильной установки свариваемых деталей; приспособления для закрепления деталей перед сваркой; сборочные приспособления для установки и закрепления деталей. Детали после сварки и термообработки часто бывают покороблены, возникает необходимость их правки. Правку выполняют различными способами. Детали простой формы при малых масштабах производства правят обычно вручную на болванках; узлы сложной формы, особенно при значительных масштабах производства, калибруют в специальных штампах или приспособлениях на прессах.

17.4. Повышение ресурса и надежности работы деталей и узлов из листовых материалов технологическими методами

Для повышения надежности и ресурса работы деталей и узлов горячего тракта двигателя широко применяется эмалирование; в перспективе — нанесение жаростойких покрытий, ионнолучевая обработка.

Эмалирование. Эмали применяются для предохранения от окисления металлов и сплавов при длительном нагреве. Фритты, используемые для приготовления жаростойких эмалей, получают путем грануляции шихты, расплавленной при $1350...1550^\circ\text{C}$. Для жаростойких эмалей используют фритты № 7, 8, 12, 13 и 14; их состав многокомпонентный, основные из них: песок кварцевый (SiO_2 , ГОСТ 22551-77), окись алюминия (Al_2O_3 , ГОСТ 21285-75), окись кальция (CaO , ГОСТ 8677-76), двуокись титана (TiO_2 , ГОСТ 9808-84) и др. Например, жаростойкая эмаль ЭВК-103 из фритты № 12 состоит из SiO_2 (52,6 %), B_2O_3 (7 %), BaO (8,8 %), CaO (7 %), MgO (1,8 %), Al_2O_3 (19,3 %), TiO_2 (3,5 %). Фритты поставляются в виде порошка размером фракции не более 0,08 мм и в виде гранулята.

Технология нанесения жаростойкой эмали ЭВК-103 содержит три основных этапа: подготовка поверхности под эмалирование, нанесение эмали, оплавление эмали.

Подготовка поверхностей детали под эмалирование включает следующие операции: обезжиривание в бензине Б-70 и в нефрасе (ГОСТ 443-76), сушка на воздухе, обжиг в электропечи при температуре $1000 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 3...8 мин, охлаждение на воздухе. Затем поверхности деталей, подлежащие эмалированию, обдувают электрокорундом зернистостью 25...16 в течение 1...12 мин. Места, не покрываемые эмалью, изолируют алюминиевой фольгой и изоляционной лентой.

Покрытие эмалью. Эмаль ЭВК-103 наносится пульверизатором на расстоянии не менее 300 мм от эмалируемой поверхности, сушится на воздухе в течение 0,5...2 ч или в сушильном шкафу при температуре нагрева $100...120^\circ\text{C}$ в течение 15...20 мин.

Оплавление эмали. Детали, установленные в приспособление, загружают в электропечь, имеющую температуру $1190 \pm 10^\circ\text{C}$. Эмаль оплавляется в течение 2...6 мин. Детали, вынутые из печи охлаждаются на воздухе. Затем аналогично наносится второй слой эмали. Эмалированный слой толщиной 40...120 мкм должен иметь ровную блестящую поверхность без пузырей, прогаров, прогалин и темных пятен.

17.5. Технический контроль деталей и узлов из листового материала

Контроль деталей и узлов из листового материала предусматривает внешний осмотр, проверку размеров и формы, толщины стенок, качества швов и их герметичности. Приемы контроля размеров и формы обычные и почти не отличаются от приемов контроля механически обработанных деталей.

В сварных или паяных узлах из листового материала особое внимание уделяют контролю качества шва. Дефекты сварки или пайки в узлах являются следствием неправильного процесса или несоблюдения условий, предусмотренных соответствующими инструкциями и технологией, или неудовлетворительного качества основного металла и других применяемых материалов, инструмента или оборудования.

Типичными дефектами сварных и паяных узлов являются следующие: неполномерность шва; наплывы присадочного материала или припоя; глубокие незаделанные кратеры; проплавление, выплески и ослабления основного металла при контактной сварке; непровары и несплавление кромок; пористость или шлаковые включения; деформации и коробления; микроскопические и макроскопические трещины; изменения структуры швов и зоны термического влияния; загрязнения металла швов вредными примесями (кислородом, азотом, серой и др.).

Первые четыре вида дефектов обнаруживаются при визуальном осмотре швов и часто называются внешними. Все остальные дефекты при внешнем осмотре почти не заметны и требуют для их обнаружения специальных методов исследования, например рентгеновского, магнитного, химического анализа или металлографического исследования и др.

Осмотр швов производят визуально с лупой или без нее как до зачистки, так и после нее. В случае необходимости размеры швов измеряют шаблонами.

Металлографические макро- и микроструктурные исследования наплавленного металла, зоны оплавления или диффузии припоя, зоны термического влияния и основного металла позволяют определить правильность выбранного режима сварки или пайки. Исследование микроструктуры особенно важно при сварке или пайке деталей из жаропрочных сплавов.

Механические испытания сварных и паяных соединений производятся на образцах, вырезанных из одной детали от партии, или на специально изготовленных. Механические испытания, статические (растяжение, сжатие, изгиб) и динамические (удар, вибрация) выполняются по обычным методам испытания металлов.

Просвечиваются швы рентгеновскими и гамма-лучами.

Герметичность проверяют у некоторых деталей гидравлических и пневматических систем ГТД, баллонов, емкостей. Наиболее нагруженные и имеющие важное значение из них контролируют в процессе изготовления, а некоторые — только в узле. В процессе изготовления обычно проверяют трубопроводы, корпуса, баллоны. Герметичность проверяют жидкостями (керосин, вода и др.) или газами (воздух, азот и др.), которые под давлением подводят внутрь детали (узла). Испытуемое давление должно быть в 1,2...1,5 раза больше рабочего. Негерметичность (наличие течи) определяют визуально, по падению давления в испытуемой полости и при помощи течеискателей.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие листовые материалы используют для деталей ГТД?
2. Как рассчитывают форму и размеры плоской заготовки?
3. Какие методы применяют для формообразования деталей из листа?
4. Назовите технологические возможности формообразования деталей замкнутого контура разжимными пуансонами, ротационным выдавливанием и штамповкой взрывом.
5. Какими технологическими методами можно повысить ресурс и надежность работы деталей из листа?

18.1. Конструкция, технические условия, материалы

Конструкции корпусных деталей двигателя и его агрегатов столь же разнообразны, как и выполняемые ими функции: их поверхности могут формировать проточную часть для воздуха, газа; содержать различные разделительные полости и соединительные каналы для топлива, масла, воздуха; они удерживают подшипники вращающихся деталей, направляющие поступательно передвигающихся деталей, воспринимают усилия от этих деталей, от давления газа, жидкости, передают их на корпус двигателя и от него ЛА. При всем разнообразии форм корпусов, их размеров, материалов они имеют общие технологические особенности их конструкции: наличие функционально объединенных групп поверхностей с весьма жесткими допусками на отклонение их положения внутри группы, несколько менее жесткими допусками на параметры взаимного расположения этих групп; включают большое число конструктивных элементов с необработанными поверхностями (или только зачищаемыми), точность которых обеспечивается на заготовительных операциях. Для функционально объединенных групп поверхностей ограничивают: непараллельность плоскостей фланцев, осей соосных посадочных поясков, перпендикулярность осей посадочных поясков на длине 100 не более 0,02...0,05; перпендикулярность резьбы плоскости фланца на длине 100 не более 0,2; смещение крепежных отверстий во фланцах от номинального положения не более 0,1...0,2. Сами сопрягаемые поверхности должны быть обработаны по 6...7-му качеству точности, шероховатость $Ra = 2,5...0,63$ мкм. Несопрягаемые поверхности имеют точность 8...10-й квалитет, шероховатость $Ra = 2,5$ мкм.

Особые требования предъявляют к герметичности. Герметичность отдельных корпусных деталей и собираемых из них узлов зависит от плотности материала (в литых заготовках), точности выдерживания толщин стенок (где они малы и есть опасность их отклонений, например при сверлении системы глубоких отверстий рядом со сложными необрабатываемыми полостями заготовки), плотности соединений сборных корпусов (сварных, паяных, механических). Последняя зависит от точности предшествующей механической обработки стыкуемых участков деталей корпуса, определяющей зазоры под сварку, пайку, прилегание плоскостей стягиваемых фланцев и т. д.

Построение технологического процесса, выбор технологического оборудования, оснастки определяются конструктивно-технологическими особенностями корпусов. По этим признакам корпуса делят на группы.

1. Крупногабаритные корпуса типа подкрепленных оболочек вращения, сваренных из листов, точеных или фрезерованных фланцев (из прогрессивных заготовок: получаемых с помощью методов прессования фасонных профилей, их гибки и сварки; раскатки). Привариваются также подкрепляющие ребра, перемишки, небольшие, изготовленные из литья или штамповок фланцы, кронштейны, бобышки (корпус компрессора, сопло и т. д.).

2. Среднегабаритные корпуса коробчатого типа, часто с механическими разрезами, имеющие сложные полости, систему каналов, изготавливаемые из отливок (например, корпуса агрегатов, коробки приводов).

3. Среднегабаритные и небольшие сварные корпусные детали сложных форм (например, корпуса опор, воспламенителей, диафрагм).

4. Мелкие корпусные детали очень разнообразных форм, которые могут прикрепляться и входить в состав предыдущих групп (детали корпусов механизмов регулирования сопла, направляющих аппаратов, датчиков давления, температуры).

18.2. Построение технологического процесса

Крупногабаритные сварные корпуса первой группы имеют сложный технологический процесс, включающий этапы: получение заготовок отдельных деталей, их механическая обработка перед сваркой, сварка и другие сварочные операции, механическая обработка корпусов в собранном виде. Так, примерный план обработки сварных корпусов компрессора, камеры сгорания включает:

- 1) предварительное и окончательное точение фланцев, промежуточных колец, подрезку торцев обечаек, отформованных из листа;
- 2) комплектацию, обезжиривание, зачистку мест под сварку, сборку в стапеле, прихватку (сваркой в нескольких точках), сварку, приварку бобышек;
- 3) термическую обработку;
- 4) окончательную обточку посадочных поверхностей и торцев фланцев;
- 5) сверление отверстий, нарезание резьбы в бобышках и фланцах;
- 6) слесарную зачистку, постановку втулок, футорок и другой арматуры;
- 7) контроль;
- 8) нанесение антикоррозионных покрытий (жаростойких, теплозащитных), окраску;
- 9) сборку, прихватку отдельных секций в стапеле, сварку, зачистку сварных швов;
- 10) монтаж на корпус различных деталей и агрегатов.

Среднегабаритные корпуса коробчатого типа обычно имеют разветвленную систему внутренних полостей, каналов, фигурную форму фланцев с множеством крепежных отверстий, сложную наружную форму, поэтому их заготовки рационально (а часто необходимо) получать литьем в кокиль для легких сплавов (алюминиевые, магниевые), в графитовые, керамические формы с применением стержней для образования полостей (из керамики); литьем по выплавляемым моделям и другими методами, позволяющими получить высокий коэффициент использования материала и точность корпусов из коррозионно-стойких, теплостойких сталей, жаропрочных и титановых литейных сплавов. Отливка сложных корпусных заготовок связана с неизбежными короблениями. Чтобы обеспечить правильное расположение обрабатываемых отверстий, плоскостей относительно необрабатываемых, часто приходится применять операцию разметки

с последующей ориентацией по ней детали методом установки с выверкой, после чего обрабатывают базы для автоматической установки детали в приспособления. Рекомендуются методы автоматической выверки и оптимизации положения таких сложных заготовок с помощью ЭВМ. Приведем характерный план обработки переднего корпуса коробки агрегатов:

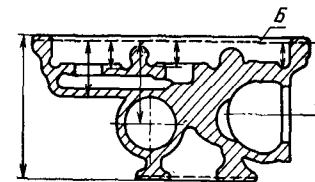
- 1) разметка отливки с нанесением рисок на покрытии заготовки (черная нитрозмаль);
- 2) установка с выверкой по риску, фрезерование плоскостей разъема корпуса (по фланцам) черновое и чистовое;
- 3) сверление, зенкерование, предварительное и окончательное развертывание по два базовых отверстия в каждом фланце;
- 4) обработка системы сложных ступенчатых отверстий с пространственной ориентацией их осей на многоцелевых станках с ЧПУ (например, с тремя управляемыми координатами шпинделя и управляемым поворотом стола с заготовкой на заданные углы). Операции включают большое число переходов (порядка 50) типа: „фрезеровать бобышку“, „зенкеровать поверхность“, „подрезать торец“, „расточить“, „произвести круговое фрезерование кармана“, „Предварительное (окончательное) развертывание“, „центровать центровочным сверлом“;
- 5) обработка системы глубоких отверстий на радиально-сверлильных станках;
- 6) алмазная расточка на алмазно-расточных станках;
- 7) электрохимическая обработка для удаления заусенцев;
- 8) шабрение плоскостей фланцев с проверкой их прилегания по краске;
- 9) гидро- и пневмоиспытания герметичности;
- 10) контроль.

Специфика плана обработки корпуса из магниевого сплава — частое повторение операций восстановления оксидного покрытия во избежание загорания. Вместо пневмоиспытаний (с малым давлением) могут проводиться гидроиспытания. Посадочные пояски и плоскости фланцев могут обрабатываться на токарных станках. Возможны и другие отличия.

В основу построения рационального технологического процесса изготовления корпусных деталей коробчатого типа должна быть положена идея типизации и построения групповых технологических процессов. Облегчается применение станков с ЧПУ, агрегатных станков, ориентированных на данную группу корпусов. Они позволяют большее число отверстий и других поверхностей обработать за один установ, повышая точность их взаимного расположения.

При обработке мелких и средних корпусных деталей часто применяют токарные и револьверные станки, а также токарные станки с ЧПУ. Из-за малой массы и габаритных размеров перестановка заготовок не связана с какими-либо трудностями. Легко совместить конструкторские и технологические базы. Первичной базой служит одна из наружных цилиндрических необрабатываемых поверхностей. Относительно нее обрабатываются поверхности центрального отверстия и доступные наружные поверхности. Обработанные поверхности используются как база на последующих операциях точения, сверления и фрезерования, нарезания резьбы и т. д.

Рис. 18.1. Разметка корпуса



Планы обработки среднегабаритных и небольших сварных корпусов состоят из изготовления отдельных их деталей, подготовки этих деталей к сварке, сборки их в стапеле и прихватки, сварки и окончательной обработки посадочных и высокоточных других поверхностей (например, расточка посадочных поясков под подшипники).

18.3. Выполнение основных операций

Разметочные операции характерны для наиболее сложных литых заготовок корпусов коробчатой формы (рис. 18.1). Обобщенный операционный эскиз содержит условие выдерживания до плоскости наносимой риски пяти размеров от поверхностей, которые в готовой детали останутся необработанными (только зачищенными). Это больше чем нужно для однозначного определения положения плоскости, поэтому данные размеры разметчик выдерживает не точно, а с допуском. Если в допуск не удастся уложиться, значит заготовка не может считаться годной. Для манипуляций с заготовкой на разметочной плите она ставится по поверхности на три регулируемых домкрата. Автоматизация данной операции возможна только с помощью ЭВМ (см. гл. 8) и соответствующего алгоритма. Далее для фрезерования поверхности базы *Б* положение заготовки на столе фрезерного станка выверяется по разметочной риске с помощью аналогичных трех домкратов. После достижения требуемого положения заготовка закрепляется.

Типичная операция обработки показанного на рис. 18.1. корпуса на многоцелевом станке с ЧПУ включает 48 переходов и 6 позиций, при изменении которых с деталью поворачивается согласно управляющей программе на углы 15, 24, 66, 90, 96 и 171°, чтобы оси отверстий соответствующей группы поверхностей совпали с направлением оси шпинделя станка. На рис. 18.2. показана одна из групп поверхностей корпуса и характерные инструментальные переходы их обработки: комбинированными зенкерами 1, 2, круговое фрезерование кармана 3, расточка канавки 4. Комбинированный и фасонный инструменты позволяют совместить переходы, повышая точность взаимного расположения поверхностей одной группы. Для достижения той же цели черновая и чистовая обработки поверхностей одной группы завершаются в одной позиции.

При сверлении отверстий на наклонной поверхности рекомендуется предварительно зенкером торцевать площадку, нормальную к оси отверстия. Зенкерование, предварительное и окончательное развертывание начальной ступени отверстия выполняются после сверления. Для уменьшения увода сверла применяют предварительное сверление коротким

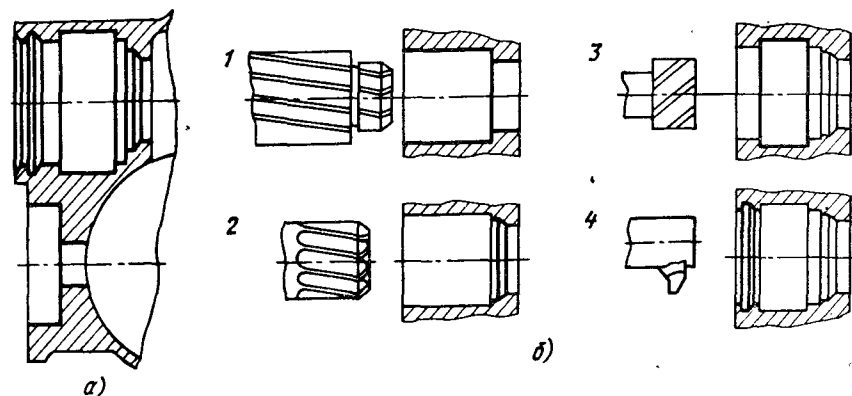


Рис. 18.2. Обработка корпуса на станке с ЧПУ:
а — обработка группы поверхностей; б — наладка инструментов

сверлом меньшего диаметра, зенкерование полученного отверстия, окончательное сверление, для которого начальный участок играет роль направляющей.

Для удаления заусенцев в местах пересечения масляных каналов (отверстий) в них вставляются электроды (катоды), анод соединяется с деталью. Перед включением рабочего тока проверяется отсутствие короткого замыкания.

Пневмоиспытания герметичности крепежных отверстий производятся сжатым воздухом под давлением 0,1 МПа при погружении детали в антикоррозионный раствор. Продолжительность испытаний 3 мин. Пузырьки воздуха не допускаются. Гидроиспытания проводят на специальной установке. Свободные выходы из внутренней полости закрываются технологическими заглушками, и в нее подается трансформаторное масло с избыточным давлением 0,4 МПа при температуре 60...70°С. Течь не допускается. Совпадение масляных каналов проверяется проволокой и визуально с помощью подсветки и зеркала. Прилегание торцев проверяется по краске. На фланцах зона отпечатка краски должна полностью охватывать герметизируемую полость и составлять не менее 80% площади контакта.

18.4. Специфика изготовления корпусных деталей из композиционных материалов

Применение композиционных материалов (стеклопластиков, углепластиков, керамики и др.) для корпусных деталей ВРД вместо металлических деталей или в сочетании с ними (армирование) — резерв уменьшения их массы, повышения химической стойкости, жаростойкости, демпфирования колебаний. Номенклатура композиционных материалов быстро расширяется. Их свойства весьма разнообразны, а главное — сильно зависят от структуры — конструкции самого материала. Причем для каждой конструкции корпуса и условий его нагружения при изготовлении

должна формироваться своя оптимальная структура. Это достигается применением соответствующего оборудования с ЧПУ. Важно также, чтобы в процессе формообразования большинство поверхностей детали были получены с окончательной точностью, чтобы при механической обработке не нарушать этой оптимальной структуры (перерезание волокон в волокнистых композитах, удаление особо прочного поверхностного слоя керамики и т. п.). Особо точные сопрягаемые поверхности могут быть включены в металлические фланцы и другие детали, вплетаемые (или соединяемые другими способами в композиционный материал) с учетом обеспечения их надежной совместной работы. Наиболее гибко с условиями нагружения детали увязывается структура композиционных материалов, состоящих из матрицы (связующее), армированной переплетаемыми волокнами: стеклопластики, углепластики и др. Тип связующего определяет допускаемую температуру, герметичность; материал волокон, пространственная структура их переплетения — прочность. Так, для корпусов, работающих до 250°С, применялись стеклопластики с нитями диаметром 14...16 мкм, содержащие отверждаемое связующее (по массе 30...40%), кремнеорганические соединения, фенолформальдегидные смолы и др.

Крупногабаритные корпуса типа тел вращения изготавливают намоткой стеклянных нитей, жгутов, лент, тканей на специальные оправки, устанавливаемые в патрон, закрепленный на шпинделе станка с ЧПУ. Это стекловолокно сматывается с бобин, насаженных на оси каретки, перемещающейся в соответствии с командами управляющей программы по координатам X и Z . Размещенный на каретке манипулятор дополнительно направляет стекловолокно (всего на станке до пяти управляемых координат). Можно получить намотку с переменной структурой по толщине и длине детали, обеспечивая высокое сопротивление давлению, изгибу и кручению наружных слоев, а внутри — достаточное сопротивление сдвигу (рис. 18.3, а). Пропитка связующим может выполняться: 1) в процессе намотки (мокрая) пропусканием стеклонитей через ванну; 2) с предварительной подсушкой пропущенных через ванну стеклонитей (полусухая) и последующей намоткой ими (их называют препрегами) изделия, после чего связующее размягчается нагревом; 3) сухая намотка каркаса волокон с последующей пропиткой в вакууме с подачей связующего под давлением. Перед намоткой на оправку наносится покрытие, предохраняющее

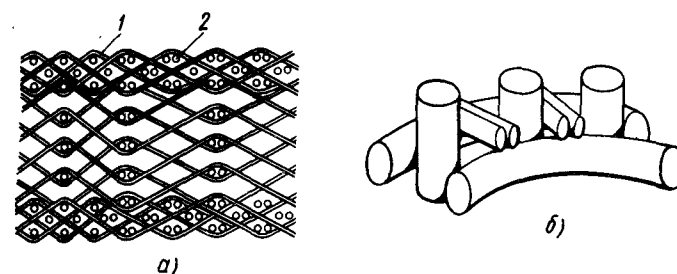


Рис. 18.3. Структура укладки волокон в деталях из композиционного материала:
а — переменное армирование; б — ортогональная укладка углеродных волокон

изделие от залипания. После пропитки выполняется операция опрессовки, обычно сочетающаяся с термообработкой, вызывающей отверждение связующего: в штампах с электроподогревом (давление берется от гидравлического пресса) или в автоклавах. Давление при опрессовке 4...6 МПа, температура 150...160°С. Далее идет механическая обработка; обрезка кромок, точение посадочных поясков.

Корпусы коробчатой формы можно набирать выкладкой (роботом или вручную) предварительно раскроенных и пропитанных стеклотканей или листового стеклошпона в прессформе. Далее, как обычно, идут прессование с термообработкой, механическая обработка.

Резкое повышение рабочей температуры достигается применением нового класса композиционных материалов, состоящих из каркаса углеродных волокон (рис. 18.3, б) в углеродной матрице. Технология получения каркаса аналогична таковой для стеклопластика. Матрица получается двумя методами.

1. Каркас пропитывается углеродосодержащими жидкостями (термоактивными фенольными и другими смолами, пеками из каменного угля, нефти). Далее идет отверждение с термообработкой, карбонизация (650...1100°С), графитизация (2600...2750°С). Высокая плотность достигается многократным повторением этих циклов ($\rho = 1,7 \text{ г/см}^3$).

2. Химическое осаждение углерода из метана или природного газа, остальное — как в первом способе. Корпусы из таких углерод-углеродных материалов не требуют охлаждения при высоких эксплуатационных температурах. Их можно использовать для корпусных деталей, не требующих герметичности. Недостаток — очень продолжительный технологический цикл и пока высокая стоимость. Детали имеют высокую жесткость, что важно для корпусов, имеющих весьма малую массу.

Обширная литература посвящена обзорам опыта разработки керамических материалов для поршневых и газотурбинных двигателей. Используются окислы алюминия, циркония, нитриды и карбиды кремния и их различные композиции. Они спекаются после прессования их смесей со связующим при 1400...2100°С. При рабочих температурах до 1100°С они превосходят по удельной прочности металлы (при изгибе, износе). Корпусные детали ВРД — одно из вероятных их применений. Основная проблема, сдерживающая их использование, — хрупкость. После спекания их обрабатывают шлифованием алмазными кругами. Плотность керамик выше, чем у углерод-углеродного материала, ее диапазон 2,5...3,5 г/см³. Но их технология проще, они дешевле, в 2,5...3 раза легче жаропрочных сплавов, не требуют охлаждения.

Вопросы для самоконтроля

1. На какие группы делятся корпуса по конструктивно-технологическим признакам?
2. Зачем нужны операции разметки заготовок корпусов и как их можно автоматизировать или исключить?
3. Как обеспечиваются требования к точности взаимного расположения конструктивных элементов сложных корпусов ДЛА?
4. Каковы перспективы изготовления корпусов из композиционных материалов — волокнистых и керамики?

$$\text{Значения } \Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

z	Φ(z)	z	Φ(z)	z	Φ(z)	z	Φ(z)
0,00	0,0000	0,31	0,1217	0,72	0,2642	1,80	0,461
0,01	0,0040	0,32	0,1255	0,74	0,2703	1,85	0,4678
0,02	0,0080	0,33	0,1293	0,76	0,2764	1,90	0,4713
0,03	0,0120	0,34	0,1331	0,78	0,2823	1,95	0,4744
0,04	0,0160	0,35	0,1368	0,80	0,2881	2,00	0,4772
0,05	0,0199	0,36	0,1406	0,82	0,2939	2,10	0,4821
0,06	0,0239	0,37	0,1443	0,84	0,2995	2,20	0,4861
0,07	0,0279	0,38	0,1480	0,86	0,3051	2,30	0,4893
0,08	0,0319	0,39	0,1517	0,88	0,3106	2,40	0,4918
0,09	0,0359	0,40	0,1554	0,90	0,3159	2,50	0,4938
0,10	0,0398	0,41	0,1591	0,92	0,3212	2,60	0,4953
0,11	0,0438	0,42	0,1628	0,94	0,3264	2,70	0,4965
0,12	0,0478	0,43	0,1664	0,96	0,3315	2,80	0,4974
0,13	0,0517	0,44	0,1700	0,98	0,3365	2,90	0,4981
0,14	0,0557	0,45	0,1736	1,00	0,3413	3,00	0,49865
0,15	0,0596	0,46	0,1772	1,05	0,3531	—	—
0,16	0,0636	0,47	0,1808	1,10	0,3643	3,20	0,49931
0,17	0,0675	0,48	0,1844	1,15	0,3749	3,40	0,49966
0,18	0,0714	0,49	0,1879	1,20	0,3849	3,60	0,499841
0,19	0,0753	0,50	0,1915	1,25	0,3944	3,80	0,499928
0,20	0,0793	0,52	0,1985	—	—	4,00	0,499968
0,21	0,0832	0,54	0,2054	1,30	0,4032	4,50	0,499997
0,22	0,0871	0,56	0,2123	1,35	0,4115	5,00	0,4999997
0,23	0,0910	0,58	0,2190	1,40	0,4192	—	—
0,24	0,0948	0,60	0,2257	1,45	0,4265	—	—
0,25	0,0987	—	—	1,50	0,4332	—	—
0,26	0,1026	0,62	0,2324	1,55	0,4394	—	—
0,27	0,1064	0,64	0,2389	1,60	0,4452	—	—
0,28	0,1103	0,66	0,2454	1,65	0,4505	—	—
0,29	0,1141	0,68	0,2617	1,70	0,4554	—	—
0,30	0,1179	0,70	0,2580	1,75	0,4599	—	—

1. Аброян И. А., Андронов А. Н., Титов А. И. Физические основы электроники и ионной технологии. М.: Высшая школа, 1984. 320 с.
2. Афонькин М. Г., Магницкая М. В. Производство заготовок в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1987. 256 с.
3. Балабанов А. Н. Технологичность конструкций машин. М.: Машиностроение, 1987. 336 с.
4. Евстигнеев М. И., Подзей А. В., Сулима А. М. Технология производства двигателей деталей аппаратов. М.: Машиностроение, 1982. 260 с.
5. Иващенко И. А. Проектирование технологических процессов производства двигателей деталей аппаратов. М.: Машиностроение, 1982. 224 с.
6. Ионная имплантация /Под ред. Дж. К. Хирвоояна. М.: Металлургия, 1985. 392 с.
7. Ковшов А. Н. Технология машиностроения. М.: Машиностроение, 1987. 320 с.
8. Матилин А. А. Технология машиностроения. Л.: Машиностроение, 1985. 496 с.
9. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Кокора А. И. и др. Лазерная и электронно-лучевая обработка. Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 570 с.
10. Серебренников Г. З. Оптимизация технологии изготовления тяжелонагруженных деталей с помощью ЭВМ. М.: Машиностроение, 1981. 200 с.
11. Справочник технолога-машиностроителя: В 2 т. /Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. М.: Машиностроение. Т. 1. 1986. 656 с. Т. 2, 1985. 496 с.
12. Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.

Введение.....	4
Раздел I. Основы проектирования технологических процессов механической обработки деталей	
Глава 1. Технологический процесс и его структура (основные понятия и определения).....	7
1.1. Производственный и технологический процессы.....	7
1.2. Структура технологического процесса.....	7
1.3. Виды операций и этапы технологического процесса.....	9
1.4. Концентрация и дифференциация операций.....	10
1.5. Технологическая классификация оборудования.....	12
1.6. Типы машиностроительного производства.....	12
1.7. Способы получения заданных размеров.....	15
Глава 2. Базирование и базы в машиностроении.....	16
2.1. Основные положения теории базирования.....	16
2.2. Классификация поверхностей и баз.....	17
2.3. Выбор технологических баз.....	19
2.4. Закрепление заготовок.....	21
Глава 3. Точность обработки.....	22
3.1. Точность и погрешности обработки.....	22
3.2. Причины, вызывающие погрешности обработки.....	22
3.3. Погрешности систематические и случайные.....	29
3.4. Аналитические и статистические методы определения погрешностей обработки.....	30
3.5. Экономическая точность обработки.....	50
Глава 4. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей.....	53
4.1. Поверхностный слой детали.....	53
4.2. Шероховатость и волнистость поверхности.....	54
4.3. Физико-химическое состояние поверхностного слоя.....	58
4.4. Остаточные напряжения.....	62
4.5. Классификация параметров поверхностного слоя деталей.....	66
4.6. Влияние методов и режимов обработки на параметры поверхностного слоя деталей.....	68
4.7. Влияние поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей.....	72
4.8. Выбор параметров поверхностного слоя детали с учетом заданных условий эксплуатации и их технологического обеспечения.....	83
Глава 5. Технологические методы повышения надежности и долговечности работы деталей машин.....	85
5.1. Упрочнение поверхностным пластическим деформированием.....	85
5.2. Поверхностная термическая и термомеханическая обработки.....	90
5.3. Защитно-упрочняющие покрытия.....	91
5.4. Химико-термическая обработка.....	105
5.5. Лазерная обработка.....	111
5.6. Ионное легирование.....	113
5.7. Оптимизация методов и режимов обработки.....	117
Глава 6. Технологичность конструкций деталей, узлов, изделия.....	120

6.1. Общие понятия.....	120
6.2. Критерии оценки технологичности.....	121
6.3. Этапы отработки технологичности конструкции.....	122
6.4. Технологичность деталей из штампованных заготовок.....	123
6.5. Технологичность конструкции литых деталей.....	124
6.6. Технологичность деталей из листовых материалов.....	125
6.7. Технологичность деталей, обрабатываемых резанием.....	126
Глава 7. Проектирование технологических процессов механической обработки деталей.....	130
7.1. Исходные данные для проектирования технологических процессов.....	130
7.2. Изучение и анализ чертежа детали.....	130
7.3. Установление типа и организационной формы производства.....	131
7.4. Выбор вида заготовки и метода ее получения.....	131
7.5. Построение плана обработки детали.....	132
7.6. Разработка операций технологического процесса.....	134
7.7. Техническое нормирование операций.....	139
7.8. Экономический анализ вариантов операций технологического процесса.....	141
7.9. Технологическая документация.....	142
7.10. Методы повышения производительности и снижения себестоимости изготовления деталей ГТД.....	144
Глава 8. Автоматизированное проектирование технологических процессов.....	146
8.1. Основные задачи и особенности развития САПР технологии производства воздушно-реактивных двигателей.....	146
8.2. Методы типизации.....	148
8.3. Методы синтеза.....	151
8.4. Повышение надежности и ресурса деталей и узлов двигателей летательных аппаратов при проектировании их технологии с применением специальных математических моделей САПР.....	155
Раздел II. Методы обработки поверхностей.....	158
Глава 9. Обработка наружных поверхностей тел вращения.....	159
9.1. Точение, фрезерование, протягивание и шлифование наружных поверхностей тел вращения.....	159
9.2. Отделка наружных поверхностей тел вращения.....	164
Глава 10. Обработка отверстий.....	166
10.1. Виды отверстий и методы их обработки.....	166
10.2. Обработка отверстий лезвийным инструментом.....	166
10.3. Обработка отверстий абразивным инструментом.....	173
10.4. Обработка отверстий поверхностным пластическим деформированием (ППД).....	177
10.5. Обработка глубоких отверстий.....	178
10.6. Обработка отверстий малых диаметров.....	180
Глава 11. Обработка плоских поверхностей.....	181
11.1. Обработка плоских поверхностей строганием и долблением.....	181
11.2. Обработка плоских поверхностей фрезерованием.....	182
11.3. Обработка плоских поверхностей протягиванием.....	184
11.4. Обработка плоских поверхностей шлифованием.....	185
11.5. Обработка плоских поверхностей притиркой, полированием и шабрением.....	187

Глава 12. Обработка фасонных поверхностей.....	189
12.1. Обработка конических поверхностей.....	189
12.2. Обработка сферических поверхностей.....	190
12.3. Обработка поверхностей вращения произвольного профиля.....	190
12.4. Обработка линейчатых фасонных поверхностей.....	192
12.5. Обработка сложных пространственных поверхностей.....	195
Глава 13. Обработка резьбы.....	199
13.1. Нарезание резьбы резцами и гребенками.....	199
13.2. Нарезание резьбы метчиками, плашками и рез-бонарезными головками.....	200
13.3. Фрезерование резьбы.....	201
13.4. Накатывание резьбы.....	202
13.5. Шлифование резьбы.....	204
Глава 14. Физико-химическая обработка поверхностей.....	206
14.1. Электроэрозионная обработка.....	206
14.2. Электрохимическая размерная обработка.....	209
14.3. Электрохимическое полирование.....	212
14.4. Химическое травление.....	213
14.5. Ультразвуковая обработка.....	214
14.6. Электронно-лучевая и светолучевая обработки.....	215
Раздел III. Изготовление основных деталей ГТД.....	217
Глава 15. Изготовление дисков.....	217
15.1. Конструкция, технические условия и материалы.....	217
15.2. Построение технологических процессов изготовления дисков.....	221
15.3. Выполнение основных операций обработки дисков.....	223
15.4. Повышение ресурса и надежности работы дисков технологическими методами.....	226
15.5. Технический контроль дисков.....	228
Глава 16. Изготовление лопаток.....	230
16.1. Конструкция, технические условия и материалы лопаток турбины.....	231
16.2. Построение технологических процессов изготовления лопаток турбины.....	234
16.3. Выполнение основных операций технологического процесса изготовления лопаток турбины.....	244
16.4. Повышение ресурса и надежности работы лопаток турбины технологическими методами.....	249
16.5. Конструкция, технические условия и материалы лопаток компрессора. Классификация лопаток.....	251
16.6. Построение технологического процесса изготовления лопаток компрессора.....	255
16.7. Выполнение основных операций технологического процесса изготовления лопаток компрессора.....	259
16.8. Повышение ресурса и надежности работы лопаток компрессора технологическими методами.....	268
16.9. Технический контроль лопаток ГТД.....	272
Глава 17. Изготовление деталей из листовых материалов.....	277
17.1. Конструкция, технические условия и материалы.....	277
17.2. Построение технологических процессов изготовления деталей и узлов из листового материала.....	278

17.3. Выполнение основных операций технологического процесса изготовления деталей из листа.....	281
17.4. Повышение ресурса и надежности работы деталей и узлов из листовых материалов технологическими методами.....	295
17.5. Технический контроль деталей и узлов из листового материала.....	296
Глава 18. Изготовление корпусных деталей.....	
18.1. Конструкция, технические условия и материалы.....	
18.2. Построение технологического процесса.....	299
18.3. Выполнение основных операций.....	301
18.4. Особенности изготовления корпусных деталей из композиционных материалов.....	302
Приложение.....	305
Список литературы.....	306
Предметный указатель.....	307

Учебное издание

**Сулима Андрей Михайлович,
Носков Анатолий Алексеевич,
Подзей Анатолий Владимирович,
Серебрянников Геннадий Зиновьевич**

**Основы технологии производства воздушно-реактивных
двигателей**

Редактор *Н. В. Корженевская*
Художественный редактор *В. В. Лебедев*
Технический редактор *Р. Д. Гольдштейн*
Корректоры *Е. В. Артамонова, И. В. Горлова*

ИБ № 6683

Сдано в набор 26.12.91.

Подписано в печать 27.11.92.

Формат 60x88¹/₁₆. Бумага газетная.

Гарнитура Тиде. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 19.11. Усл. кр.-отт. 19.11. Уч.-изд. л. 20,66.

Тираж 900 экз. Заказ 2510. «с»

Ордена Трудового Красного Знамени издательство „Машиностроение”,
107076, Москва, Стромынский пер., 4.

Барановичи, типография, Советская, 80.