

Троицкий авиационный технический колледж — филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА)

Автор:

Бердышев А. С.



**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

# **ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

специальность 25.02.06 «Производство и обслуживание авиационной техники»

Троицк 2026

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора  
Филиала по учебной работе

В.А. Хомуткова



«24» 03 2026 г.

Рассмотрено на заседании ЦК КТЭЛА

Протокол № 11

От «25» марта 2026 г.

Председатель ЦК  С. М. Локтионов

Рецензент

 С. М. Локтионов

Методическое пособие посвящено основам авиастроительного производства и предназначено для студентов, осваивающих программы подготовки специалистов среднего звена по направлению «Производство и обслуживание авиационной техники»

Пособие охватывает полный цикл создания летательного аппарата: от этапов жизненного цикла и конструктивных элементов до технологий изготовления деталей, сборки узлов и агрегатов, испытаний и современных тенденций в отрасли. Материал изложен в логической последовательности, что способствует формированию у обучающихся целостного представления о производственном процессе в авиастроении. Практическая направленность пособия подтверждается наличием вопросов для самопроверки, позволяющих обучающимся самостоятельно контролировать степень усвоения материала.

## Оглавление

### Раздел 1: Основы авиастроительного производства

#### 1 Введение в авиастроительное производство

- 1.1. Самолет как объект производства ..... 2
- 1.2. Конструктивные элементы ..... 5

#### 2 Производственный процесс и структура предприятия

- 2.1 Производственный и технологический процессы ..... 6
- 2.2. Типы производства в авиации..... 7
- 2.3 Производственная структура предприятия ..... 8

#### 3. Технологическая подготовка и точность

- 3.1 Взаимозаменяемость ..... 11
- 3.2. Методы увязки размеров ..... 13

#### 4 Материалы и заготовки

- 4.1. Краткий обзор основных материалов ..... 16
- 4.2. Способы получения заготовок ..... 18

### Раздел 2 Технология изготовления и сборки

#### 5 Изготовление деталей планера

- 5.1. Классификация деталей планера ..... 21
- 5.2. Особенности механической обработки силовых элементов и обшивки ..... 22

#### 6 Изготовление деталей гтд

- 6.1. Особенности деталей ГТД..... 26
- 6.2. Технологии изготовления ключевых деталей ГТД ..... 27

#### 7 Сборка узлов и агрегатов

- 7.1. Иерархия и методы сборки..... 30
- 7.2. Особенности стапельной сборки планера..... 31
- 7.3. Особенности сборки модулей газотурбинного двигателя ..... 33

#### 8 Общая сборка ВС

- 8.1. Общая сборка ВС: стыковка агрегатов ..... 36
- 8.2. Монтаж бортовых систем..... 40

#### 9 Испытания авиационной техники

- 9.1. Испытания планера и систем ..... 44
- 9.2. Испытания ГТД на контрольно-испытательной станции ..... 46

#### 10. Современные тенденции в авиационном производстве..... 49

# Раздел 1: Основы авиастроительного производства

## 1 Введение в авиастроительное производство

### 1.1. Самолет как объект производства

Современное воздушное судно представляет собой не просто летательный аппарат, а сложную инженерную систему с полным жизненным циклом. Этот цикл включает следующие этапы:

- проектирование
- производство
- испытания
- эксплуатация
- ТОиР
- модернизация
- утилизация.

Жизненный цикл ВС - это совокупность процессов последовательного изменения его состояния, начиная от возникновения идеи и заканчивая утилизацией.

#### Проектирование

Это фундаментальный этап, на котором закладываются все ключевые характеристики будущего самолета. Работы ведутся от общего к частному.

- Содержание: Разработка аэродинамической схемы, компоновки, конструктивно-силовой схемы планера, систем. Создается полный комплект конструкторской документации (чертежи, 3D-модели, спецификации). На этом этапе формируются принципы безопасности назначаются проектные ресурсы и закладывается технологичность будущего производства и ремонта.
- Результат: Готовый проект, полностью описанный документацией, и макет самолета. Получение предварительных одобрений регулирующих органов.

## **Производство**

Этап материализации проекта, где на первый план выходят вопросы технологии, точности и контроля качества.

- Содержание: Изготовление деталей, узлов и агрегатов на специализированных заводах. Сборка на финальной сборочной линии: стыковка секций планера, установка систем, двигателей, интерьера, покраска. Работа строится по иерархическому принципу «деталь → узел → агрегат → самолет».
- Результат: Физически построенный летательный аппарат, готовый к испытаниям. Качество должно строго соответствовать конструкторской документации.

## **Испытания**

Комплекс проверок, подтверждающих, что построенный самолет соответствует проекту и абсолютно безопасен.

- Содержание: Проводятся наземные (статиспытания планера, опробование систем, проверка герметичности) и летные испытания. В них участвуют опытные и первые серийные образцы. Испытания проводятся как производителем, так и сертификационными центрами.
- Результат: Подтверждение летно-технических характеристик, прочности, надежности всех систем. Сбор данных для получения сертификата типа.

## **Эксплуатация**

Основной и самый длительный этап, в течение которого самолет выполняет свою прямую функцию - перевозки.

- Содержание: Регулярные полеты в составе парка эксплуатанта. Этап напрямую управляется. Работа организуется с учетом экономической эффективности, расписания и норм безопасности.
- Результат: Транспортная работа (пассажиры- и тонно-километры). Накопление наработки (летных часов, циклов).

## **ТОиР**

Неразрывно сопровождает этап эксплуатации. Без ТОиР безопасная эксплуатация невозможна.

- Содержание: Регламентированный комплекс работ по поддержанию и восстановлению летной годности: ежедневные осмотры, периодическое ТО, устранение неисправностей, капитальный ремонт. Работы выполняются строго по Руководству по техническому обслуживанию (АММ, РТО). Основан на агрегатном методе и ресурсной концепции.
- Результат: Гарантированное безопасное техническое состояние. Продление назначенных ресурсов. Документальное подтверждение всех выполненных работ.

### **Модернизация**

Процедуры, направленные на улучшение характеристик или соответствие новым стандартам в течение срока службы.

- Содержание: Установка нового оборудования, обновление салонов, доработки по предписаниям от органов сертификации). Может проводиться как одновременно с формами тяжелого ТО, так и отдельно.
- Результат: Повышение экономичности, безопасности, комфорта или рыночной стоимости ВС. Фактическое продление его технологического и экономического жизненного цикла.

### **Утилизация**

Завершающий этап, на котором самолет выводится из эксплуатации и перерабатывается.

- Содержание: Окончательное снятие с крыла, демонтаж и дефектация узлов и агрегатов для вторичного использования или продажи. Разборка планера с последующей сортировкой и переработкой материалов (алюминия, титана, композитов). Обезвреживание опасных веществ.
- Результат: Экологически ответственная ликвидация ВС, возврат материалов в хозяйственный оборот.

### **Специфика самолета как объекта профессиональной деятельности:**

**Культура безопасности и надежности:** Все процессы регламентированы. Любое действие на производстве или в ангаре выполняется по утвержденной документации (технологическим картам, руководствам).

**Ресурсная концепция:** Планеру, двигателям, основным агрегатам устанавливаются назначенные ресурсы (часы налета, циклы, календарный срок). Задача специалиста - контролировать выработку ресурса и выполнять работы для его безопасного использования и продления.

**Системная взаимосвязка:** Замена или регулировка одного элемента часто требует проведения дополнительных операций со смежными системами (например, замена двигателя влечет за собой проверку управления, гидравлики, электрожгутов).

## 1.2. Конструктивные элементы

**Деталь** - изделие, изготовленное из однородного материала без применения сборочных операций. Например: болт, гайка (стандартные). Лопатка компрессора, лист обшивки (специальные).

Деталь, как правило, является неремонтопригодным элементом. При износе, повреждении или выработке ресурса она подлежит замене. Это ключевая единица в системе учета материально-технического снабжения (чертежный номер, серийный номер для важных деталей).

**Узел (сборочная единица)** - изделие, составные части которого соединены между собой на предприятии-изготовителе с помощью сборочных операций (клепка, сварка, свинчивание, склеивание). Например: Заклепочное соединение панели обшивки со стрингером, шарнир руля высоты, топливный клапан в сборе, блок гидронасоса.

Узел может быть как сменным (заменяется целиком), так и ремонтируемым на месте (например, замена втулки в шарнире). Часто после установки узла требуется регулировка или тарировка.

**Агрегат** - крупный, конструктивно и функционально законченный узел, который можно собирать, испытывать и ремонтировать независимо от всего изделия. **В производстве:** Кессон крыла, отсек фюзеляжа. **В ТОиР:** Двигатель в сборе, стойка шасси в сборе, рулевой привод, топливный насос высокого давления, гидроагрегат.

Агрегат – основа агрегатного метода ремонта, который является основным в современной авиации. Неисправный агрегат демонтируется с ВС, на его место устанавливается исправный, что обеспечивает минимальное время простоя. Снятый агрегат отправляется в ремонтный цех или на завод-изготовитель. Каждый агрегат имеет собственный формуляр, где фиксируется его наработка и история ремонтов.

**Иерархия в действии как итог:**

- **Производство:** Детали → Узлы → Агрегаты → Сборка самолета.
- **Обслуживание:** Самолет → Демонтаж агрегата (двигателя) → Ремонт/замена узлов и деталей в агрегате → Испытание агрегата → Установка на самолет.

## **2 Производственный процесс и структура предприятия**

### **2.1 Производственный и технологический процессы**

**Производственный процесс** – это совокупность всех действий людей и орудий труда, осуществляемых на предприятии для изготовления конкретных видов продукции. Он охватывает не только непосредственно обработку и сборку, но и все обеспечивающие виды деятельности:

- Основные процессы: Непосредственное изменение состояния предмета труда (заготовительные, обрабатывающие, сборочные, испытательные).
- Вспомогательные процессы: Обеспечение бесперебойной работы основных (изготовление оснастки, ремонт оборудования, энергоснабжение).
- Обслуживающие процессы: Логистика, складирование, транспорт, контроль качества.
- Процессы управления: Планирование, координация, финансирование.

**Технологический процесс** - это центральная, преобразующая часть производственного процесса. ТП представляет собой последовательность технологических операций по целенаправленному изменению состояния предмета труда (его формы, размеров, свойств) для получения изделия или выполнения ремонта.

Ключевая особенность авиационного ТП - его ориентация на обеспечение максимальной надежности и безопасности при минимальной массе конструкции. Это достигается за счет:

- Высоких требований к качеству изготовления и применения новейших методов контроля.
- Использования многочисленной и сложной технологической оснастки для компенсации малой жесткости крупногабаритных деталей.
- Строгой регламентации всех операций и обеспечения полной прослеживаемости.

Технологический процесс сборки планера самолета делится на:

- **Узловую сборку** (лонжероны, нервюры, шпангоуты).
- **Агрегатную сборку** (отсеки, секции фюзеляжа, крыла).
- **Общую (стапельную) сборку** - стыковку агрегатов в целое изделие.

## 2.2. Типы производства в авиации

Тип производства определяет всю организацию работы и технологию. В авиастроении классификация базируется на стабильности номенклатуры, объеме выпуска и повторяемости операций.

Основной классификационный признак по ГОСТ - коэффициент закрепления операций (Кзо) - отношение всех различных технологических операций, выполненных за месяц, к числу рабочих мест.

таблица 1 типы производства

Тип производства	КЗО	Годовая программа	Характеристика
Единичное/ опытное	>40	До 10 шт.	Изготовление одного или малой серии уникальных изделий. Широкая номенклатура, универсальное оборудование, высокая доля ручного труда. <b>Пример:</b> Опытные образцы новых самолетов, спецзаказы (летающие лаборатории)
мелкосерийное	20-40	10-50 шт.	Периодический выпуск небольших партий. Оборудование специализированное, но возможны переналадки. <b>Пример:</b> Производство вертолетов, региональных самолетов, некоторых типов военных самолетов.

Среднесерийное	10-20	50-200 шт.	Устойчивый выпуск значимых партий. Оборудование и оснастка специализированы, высокая степень механизации.
крупносерийное	1-10	200-500 шт.	Непрерывный выпуск больших партий однотипной продукции. Строго специализированное оборудование, поточные линии, высокая автоматизация. <b>Пример:</b> Производство массовых узлов и агрегатов (двигатели для БПЛА, шасси).
<b>Массовое</b>	1	>500 шт.	Выпуск однотипной продукции в очень больших объемах непрерывно. Жестко специализированные поточные линии, полная автоматизация. В чистом виде для конечных ЛА встречается редко.

## 2.3 Производственная структура предприятия

Производственная структура – это состав цехов, участков, служб и формы их взаимосвязи. В авиастроении она сложна и определяется рядом факторов:

- Конструкция и технология изготовления продукции.
- Масштаб (объем) и тип производства.
- Уровень специализации и кооперации.

Для понимания организации производства на авиастроительном предприятии необходимо разобрать его базовые структурные единицы. Они образуют четкую иерархию, где каждая последующая является частью предыдущей.

Рабочее место → Производственный участок → Цех → Отдел (функциональный).

**Рабочее место** – это элементарная, неделимая единица производственного процесса, закрепленная за одним рабочим (или бригадой), оснащенная средствами для выполнения конкретной производственной операции.

Ключевые признаки рабочего места:

- Зона труда одного исполнителя.
- Оснащено необходимым оборудованием, оснасткой, инструментом и документацией.
- Имеет четко определенную и документально закрепленную производственную задачу (операцию).
- Его организация напрямую влияет на производительность, качество и безопасность труда.

**Производственный участок** – это структурное подразделение цеха, объединяющее ряд рабочих мест, сгруппированных по определенному признаку, и возглавляемое мастером.

Ключевые признаки участка:

- Выполняет часть общего технологического процесса цеха.
- Объединяет однородные рабочие места.
- Имеет четко определенную производственную задачу (например, изготовление определенных деталей).
- Возглавляется мастером – руководителем низшего звена.

**Цех** – это основная структурная производственная единица предприятия, административно и территориально обособленная, специализирующаяся на выполнении определенных производственных процессов или выпуске конкретной продукции (изделий, деталей, агрегатов). Ключевые признаки цеха:

- Имеет собственное замкнутое производственное задание (план).
- Располагает закрепленными за ним средствами производства (здания, оборудование) и персоналом во главе с начальником цеха.
- Обладает внутренней организационной структурой (участки, бригады, отделения).
- Имеет прямую административную подчиненность руководству предприятия.

**Отдел** – это структурное подразделение аппарата управления предприятием, созданное для выполнения определенных управленческих функций в масштабах всего завода. В отличие от цеха, отдел, как правило, не является производственным (не выпускает продукцию), а обеспечивает подготовку, сопровождение, контроль и обслуживание основной деятельности. Ключевые признаки отдела:

- Выполняет управленческую, инженерную или обслуживающую функцию для всего предприятия.
- Состоит из сотрудников (специалистов, инженеров, служащих), а не рабочих.
- Работает на основе положения об отделе, определяющего его задачи и права.
- Возглавляется начальником отдела – руководителем среднего звена.

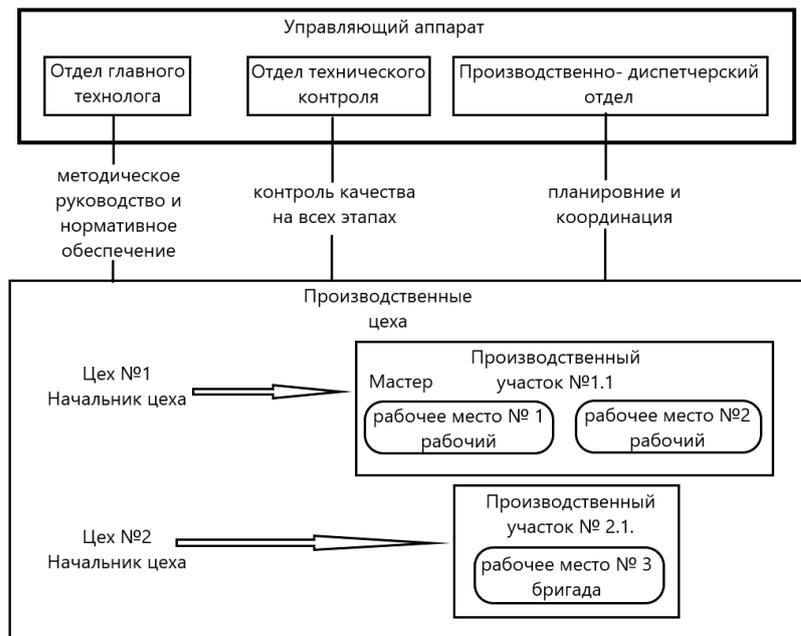


Рис. 1 Схема структуры производства

### Типы производственной структуры:

- **Технологическая:** Цехи и участки сгруппированы по однородности технологических процессов (литейный, механообрабатывающий, сборочный цех). Характерна для единичного и опытного производства.
- **Предметная:** Подразделения ориентированы на выпуск определенного изделия или агрегата (цех крыла, цех фюзеляжа, цех окончательной сборки). Характерна для серийного и массового производства, повышает эффективность.
- **Смешанная (предметно-технологическая):** Наиболее распространена в авиации. Например, заготовительные цеха имеют технологическую структуру, а сборочные - предметную.

### Основные элементы структуры авиастроительного предприятия:

1. **Основные производственные цехи:** Выполняют процессы по непосредственному изготовлению продукции:
  - **Заготовительные** (штамповочные, литейные).
  - **Обрабатывающие** (механообрабатывающие, цеха обработки композитов)
  - **Сборочные** (цеха узловой, агрегатной и общей сборки) - наиболее трудоемкие, составляют 30-56% всех трудозатрат.

- **Испытательные** (цех контрольных испытаний, лётно-испытательная станция).
2. **Вспомогательные и обслуживающие цехи и хозяйства:** Инструментальный, ремонтный, энергетический, транспортный, складское хозяйство.
  3. **Производственная инфраструктура:** Отделы главного технолога, главного металлурга, главного сварщика, отделы технического контроля (ОТК, БТК).

**Ключевая особенность авиапредприятия** - глубокая кооперация. Головной завод часто выполняет проектирование, изготовление наиболее сложных узлов, окончательную сборку и испытания.

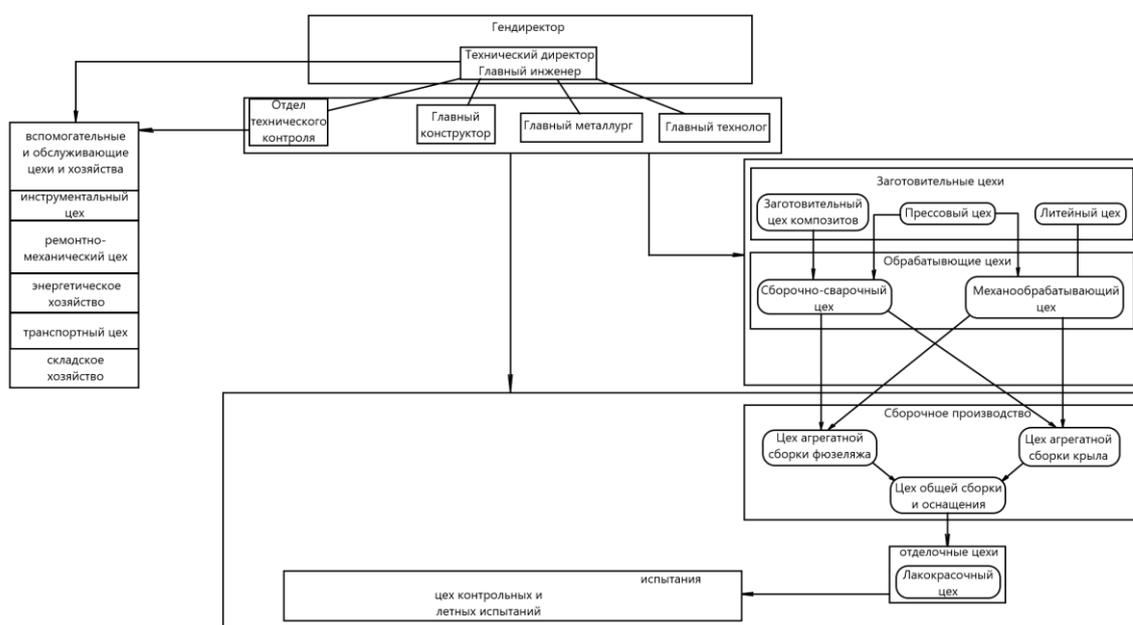


Рис. 2 Структура авиапредприятия

### 3. Технологическая подготовка и точность

#### 3.1 Взаимозаменяемость

Взаимозаменяемость – это фундаментальный организационно-технологический принцип, позволяющий создавать сложные изделия из деталей, изготовленных независимо друг от друга, в разное время и в разных местах, с гарантией их совместного функционирования.

Различают следующие виды взаимозаменяемости:

- полная – замена производится без пригонки (болты, заклепки, подшипники, трубопроводы);
- неполная (частичная) – при сборке требуется использование пригоночных работ (гидронасосы, генераторы, блоки управления);
- внутренняя – взаимозаменяемость деталей и узлов, входящих в более крупные сборочные единицы;
- внешняя – взаимозаменяемость по эксплуатационным стыкам, например, отсеки фюзеляжа. Внешняя взаимозаменяемость всегда полная.



Рис. 3 Страны – поставщики комплектующих к МС-21

Исторически переход к взаимозаменяемости стал ответом на вызовы массового производства. В авиации это выражается в следующем:

- Параллелизация производства: Возможность одновременного изготовления частей ВС на различных заводах с последующей стыковкой на финальной сборке.
- Сокращение цикла сборки и ремонта: Замена неисправного двигателя на готовый модуль занимает часы, а не недели.

- Создание глобальной кооперации: Производитель (например, Airbus или Boeing) выступает как системный интегратор, координирующий тысячи поставщиков по всему миру, чья продукция должна стыковаться с микронной точностью.

Реализация принципа основывается на строгой иерархии стандартов и методов:

1. Техническое нормирование: Разработка Единой системы допусков и посадок (ЕСДП), авиационных правил (АП) и отраслевых стандартов (ОСТ), регламентирующих не только размеры, но и материалы, покрытия, методы контроля.

2. Унификация и агрегатирование: Сознательное сокращение типоразмеров применяемых деталей и создание конструкции из стандартизированных модулей. Например, единая платформа для семейства самолетов или модульная конструкция двигателя, где замене подлежит не весь двигатель, а отдельный его модуль.

3. Технологическое обеспечение: Применение методов и оснастки, гарантирующих стабильность геометрических параметров в серийном производстве. Это прецизионное оборудование с ЧПУ, специализированная стапельная оснастка и, что критически важно, единая система увязки размеров для крупногабаритных элементов.

### **3.2. Методы увязки размеров**

В авиастроении часто употребляется такое понятие, как увязка. Увязка размеров – это процесс согласования рабочих размеров и допусков всех деталей и сборочных единиц, входящих в общую конструкцию, с целью обеспечения их правильного сопряжения и функционирования.

Производственный пример: Необходимо изготовить секцию фюзеляжа из 15 стрингеров и 5 шпангоутов. Конструктор выдает 20 отдельных чертежей. Если один цех будет точить «в минус» от номинала (в рамках своего допуска), а другой «в плюс», в итоге стрингер может не войти в паз шпангоута.

**Задача увязки:** Рассчитать и указать на чертежах такие конечные размеры и допуски для каждой детали, чтобы их суммарная погрешность не превысила зазор, необходимый для сборки.

В процессе изготовления ВС, как правило, применяется одновременно несколько методов увязки. Наиболее известными являются: – плазово-шаблонный метод (ПШМ); – эталонно-шаблонный метод (ЭШМ); – метод объемной увязки (МОУ); – метод бесплазовой увязки (МБУ).

В основе плазово-шаблонного метода лежит создание единого натурального эталона (плаза) и изготовление по нему рабочих лекал (шаблонов) для всех цехов. В самолетостроении плаз (англ. place) – это теоретический чертеж агрегата, выполненный в масштабе 1:1. Он является эталоном формы, с которого изготавливают шаблоны формы, а по ним, в свою очередь, собирают стапелы для изготовления агрегатов самолета: крыла, фюзеляжа, оперения, мотогондол.

Теоретический плаз – единый эталон формы и размеров, которым является чертёж изделия в натуральную величину с проекциями и сечениями. Основными элементами металлического плаза (рис. 4) являются плазовый стол и панели плаза.

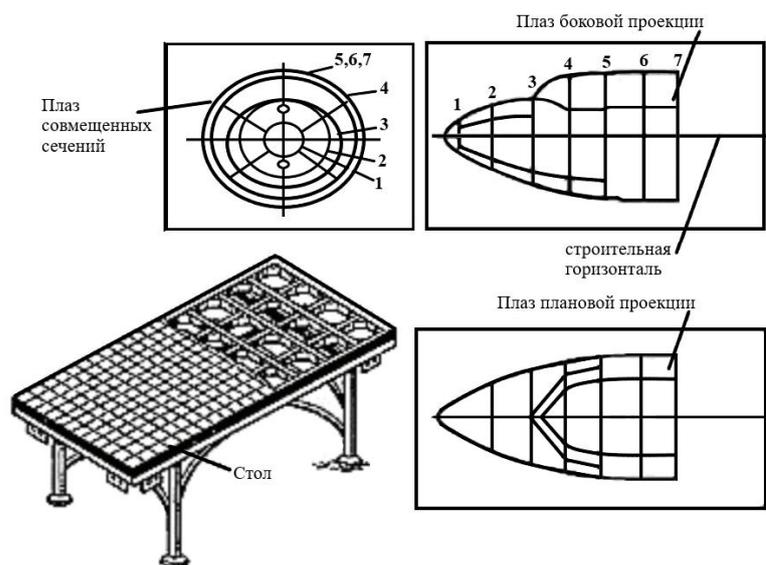


Рис. 4 Элементы теоретического плаза

Шаблон – плоский носитель формы и размеров деталей и других сборочных единиц (рис. 5). Изготавливается из листовой стали 1,5 мм. В них сверлят отверстия: базовые, сборочные, направляющие, шпилечные, инструментальные и другие. На шаблонах наносят всю информацию для производства.

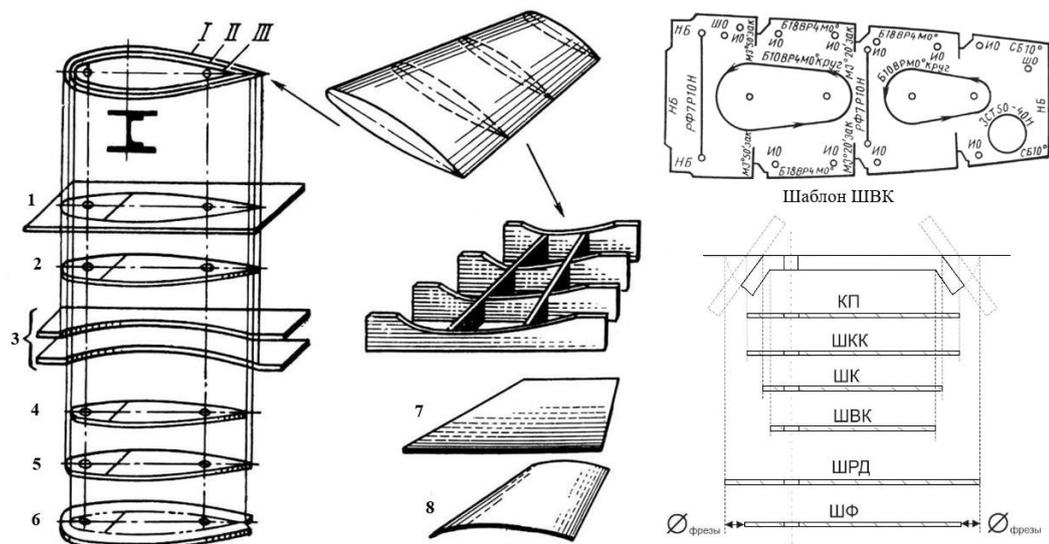


Рис. 6 Схема перенесения формы и размеров с теоретического плаза на ШКК и производственные шаблоны: I – теоретический контур сечения поверхности агрегата; II – внешний контур каркаса крыла; III – внутренний контур каркаса; 1 – теоретический плаз; 2 – ШКК; 3 – ШКС поверхности крыла; 4 – ШКС детали каркаса; 5 – ШВК; 6 – ШК; 7 – ШРД; 8 – ШЗ; 9 – ШОК; 10 – КРС

Различают следующую классификацию шаблонов: КП – конструктивный плаз; ШКК – шаблон контрольно-контурный; ШРД – шаблон развертки детали; ШВК – шаблон внутреннего контура; ШОК – шаблон обрезки и кондуктор для сверления; ШКС – шаблон контура сечения; ШМФ - шаблон монтажно-фиксирующий; ТП – теоретический плаз; ШК – шаблон контурный; ШГ – шаблон гибки; ШВК – шаблон внутреннего контура; КЭР – конструктивно – эксплуатационный разъем; СО – сборочное отверстие; БО – базовые отверстия; КРС – каркас рабочих сечений.

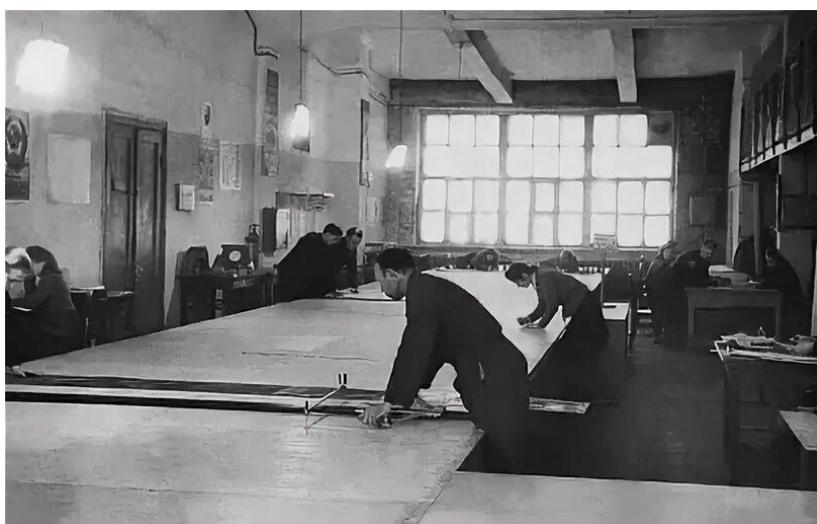


Рис. 5 Плазово-шаблонный цех (1950г.)

Последовательность работ в ПШМ следующая:

1. Проектирование агрегата.
2. Изготовление плаза: Перенос теоретических чертежей в натуральную величину с внесением технологических поправок (на пружинение металла при гибке, утяжку при формовке).
3. Изготовление шаблонов: С плаза снимают рабочие копии для цехов.
4. Изготовление оснастки и деталей: По шаблонам делают стапели, формовочные болваны и, наконец, сами детали.
5. Сборка: Все детали, сделанные по шаблонам от одного плаза, гарантированно стыкуются.

Простейшие стапели для изготовления крыльев и фюзеляжей применяются и в настоящее время на предприятиях по производству серийных ВС (рисунок 1.2.4).



Рис. 7 Стапель сборки фюзеляжа, изготовленный с помощью ПШМ

## 4 Материалы и заготовки

### 4.1. Краткий обзор основных материалов

Выбор материала – это первое и главное решение конструктора. Оно определяет прочность, массу, ресурс и стоимость изделия. Рассмотрим ключевые группы.

#### Алюминиевые сплавы дуралюмины

- **Общие свойства:** Лучшее в технике соотношение прочности к массе технологичность, коррозионная стойкость.

- **Применение:** До 50-80% массы планера: обшивка, шпангоуты, лонжероны, стрингеры.
- **Основные марки и свойства:**
  - **Д16** (аналог 2024): Классический деформируемый сплав, упрочняется термообработкой. Высокая статическая прочность. Применяется для силовых элементов обшивки, лонжеронов.
  - **В95** (аналог 7075): Один из самых высокопрочных алюминиевых сплавов. Используется для наиболее нагруженных элементов планера.
  - **АК** (литейные сплавы, напр., АК5, АК7): Используются для получения сложных фасонных деталей (кронштейны, корпуса агрегатов) методами литья.

### **Титановые сплавы**

- **Общие свойства:** Исключительная удельная прочность (в 2-2.5 раза выше, чем у лучших сталей), коррозионная и хладостойкость, работоспособность до 500-600°C.
- **Применение:** Силовые шпангоуты, пилоны, элементы шасси, диски и лопатки компрессора двигателей.
- **Маркировка и основные марки:** В российской системе маркировка начинается с букв, указывающих на разработчика: **ВТ** (ВИАМ), **ОТ** (опытный), **ПТ** («Прометей»), после чего идет порядковый номер сплава.
- **Ключевые марки:**
  - **ВТ1-0, ВТ1-00:** Технически чистый титан. Высокая пластичность, хорошая свариваемость. Используется для ненагруженных деталей, трубопроводов.
  - **ВТ6:** Самый распространенный в мире аэрокосмический титановый сплав. Оптимальное сочетание прочности, пластичности и технологичности. Основа для поковок и штамповок силовых деталей.
  - **ВТ20, ВТ22:** Высокопрочные и жаропрочные сплавы для тяжело нагруженных элементов.
  - **ВТ5Л, ВТ6Л:** Литейные модификации сплавов для получения сложных фасонных отливок.

## Магниевые сплавы

- **Общие свойства:** Самая низкая плотность ( $1.74 \text{ г/см}^3$ ) среди конструкционных металлов, высокая удельная прочность, исключительная способность к демпфированию (поглощение вибраций в 100 раз лучше, чем у дюралюминия), отличная обрабатываемость резанием.
- **Применение:** Ненагруженные детали интерьера, корпуса приборов и агрегатов (например, картеры), детали, работающие в условиях вибрации.
- **Основные марки:**
  - **Деформируемые (марка МА):** МА2-1, МА5, МА14. Используются для изготовления пресованных профилей, листов, поковок.
  - **Литейные (марка МЛ):** МЛ5, МЛ10. Применяются для получения корпусных деталей сложной формы методами литья.

## Высокопрочные и жаропрочные стали

- **Применение:** Шасси, крепеж, высоконагруженные узлы, горячая часть двигателя (жаропрочные сплавы на никелевой основе).
- **Ключевые марки:**
  - **30ХГСНА, 40ХН2МА:** Высокопрочные стали для силовых элементов шасси, стоек.
  - **ЭИ (например, ЭИ787):** Жаропрочные стали и сплавы для турбинных дисков и лопаток.

## 4.2. Способы получения заготовок

### Литье: сложная форма, минимальные припуски

- **Сущность:** Получение заготовки путем заливки расплавленного металла в литейную форму с последующей кристаллизацией.

### Преимущества:

- Возможность изготовления деталей любой сложности, включая внутренние полости.
- Минимальные припуски на механическую обработку, высокая материалотдача.
- Экономическая эффективность в мелко- и среднесерийном производстве.

- **Недостатки/особенности:** Возможность возникновения литейных дефектов (поры, раковины, трещины). Волокнистая структура металла менее благоприятна для усталостной прочности.

#### **Современные методы в авиации:**

- **Литье в керамические формы:** Высокая точность и чистота поверхности, применяется для алюминиевых и магниевых сплавов.
- **Литье по выплавляемым моделям:** Для сложнейших деталей (турбинные лопатки). Используется компьютерное моделирование для оптимизации процесса и исключения брака.
- **Титановое литье:** Сложный процесс, требующий вакуума или инертной среды. Позволяет получать крупногабаритные сложные отливки (например, элементы каркаса кабины).

**Область применения:** Корпусные детали (коробки агрегатов, крышки), кронштейны сложной формы, лопатки турбин, каркасы оборудования.

#### **Обработка давлением (ковка и штамповка):**

Сущность заключается в пластическом деформировании металла для придания ему требуемой формы и улучшения механических свойств. При деформации разрушается литая структура, измельчается зерно, формируется непрерывная волокнистая текстура, повторяющая контуры детали, что резко повышает прочность и усталостную выносливость.

#### • **Ковка (объемная штамповка):**

- **Открытая ковка:** Заготовку обрабатывают между плоскими или фасонными бойками. Используется для крупных поковок (валы, диски) или как подготовительная операция.
- **Закрытая (объемная) штамповка:** Металл деформируется в полости специального штампа. Высокая точность, мало отходов.
- **Преимущества:** Максимально высокие механические свойства, надежность, однородность структуры.

- **Область применения: Ключевые силовые элементы:** лонжероны, шпангоуты, диски и валы двигателей, тяги управления, детали шасси.
- **Листовая штамповка:**
  - **Сущность:** Формообразование деталей из листового материала (вырубка, гибка, вытяжка, отбортовка).
  - **Преимущества:** Высокая производительность, экономичность при массовом производстве, возможность получения тонкостенных жестких деталей.
  - **Область применения:** Обшивка планера, нервюры, косынки, различные панели и кожухи.

Главный вывод: В авиастроении, где безопасность и надежность абсолютны, для силовых, ответственных деталей выбор часто останавливается на ковке, несмотря на более высокую стоимость. Литье доминирует там, где важна сложная форма и умеренные нагрузки.

### Вопросы для самопроверки

1. Почему сплав Д16 нельзя использовать для литья, а сплав АК7 - для изготовления лонжерона?
2. Расшифруйте маркировку ВТ6. К какому классу титановых сплавов он относится и где применяется?
3. Какое уникальное эксплуатационное свойство магниевых сплавов определяет их применение в авиационной технике, несмотря на низкую коррозионную стойкость?
4. Объясните, почему поковка прочнее отливки из одного и того же сплава, с точки зрения внутренней структуры металла.
5. Для изготовления крупного силового шпангоута выбран титановый сплав. Почему технологи, скорее всего, выберут ковку, а не литье?
6. Перечислите три преимущества литья в керамические формы перед другими литейными методами при производстве авиационных деталей.
7. Опишите разницу между открытой и закрытой (объемной) ковкой. В каких производственных ситуациях применяется каждая?

8. Назовите не менее трех типов деталей планера, которые изготавливаются преимущественно методом листовой штамповки, и обоснуйте свой выбор.
9. Вам необходимо изготовить партию в 50 кронштейнов сложной формы для интерьера салона. Какой материал (Al, Mg, Ti) и способ получения заготовки вы предпочтете? Дайте краткое технико-экономическое обоснование.

## Раздел 2 Технология изготовления и сборки

### 5 Изготовление деталей планера

Планер - основа воздушного судна, его несущая конструкция. В предыдущих темах были рассмотрены планер как часть ВС, и иерархия «деталь-узел-агрегат». Начальное звено этой цепочки - деталь. Качество, точность и надежность каждой детали напрямую определяют безопасность и летные характеристики всего самолета. Данная тема посвящена классификации деталей планера и ключевым технологическим особенностям их изготовления.

#### 5.1. Классификация деталей планера

Детали планера можно систематизировать по различным признакам, что имеет принципиальное значение для организации их производства. Наиболее значимы две группы классификаций: по конструктивно-силовому назначению и по технологическим признакам.

Таблица 2: Классификация по конструктивно-силовому назначению

Группа деталей	Назначение и функции	Характерные примеры
Каркасные (силовые)	Воспринимают основные нагрузки (изгиб, кручение, сдвиг), формируют геометрию агрегата.	Лонжероны, нервюры и шпангоуты, стрингеры
Обшивочные	Формируют внешнюю обтекаемую поверхность, работают совместно с каркасом.	Панели и листы обшивки (работают на сдвиг, передавая нагрузки)
Детали соединений и усиления	Обеспечивают стыковку силовых элементов, перераспределение и концентрацию нагрузок.	Кронштейны, узлы навески, накладки, уголки.

Детали механизации и люков	Формируют подвижные и съемные элементы планера.	Лонжероны и нервюры закрылков, предкрылков, спойлеров, окантовки люков.
----------------------------	---	---

### Классификация по технологическим признакам:

Эта классификация определяет выбор метода изготовления и типа производства.

- **По типу исходной заготовки:**

- **Простые детали из сортового проката:** Прутки, полосы, листы (кронштейны, накладки).
- **Детали из штамповок и поковок:** Силовые кронштейны, узлы навески, которые получают объемной штамповкой или ковкой для обеспечения высокой прочности волокон металла.
- **Детали из пресованных профилей:** Длинномерные элементы (стрингеры, лонжеронные пояса) сложного постоянного или переменного сечения.
- **Литые детали:** Применяются ограниченно для несилowych, сложных по форме элементов (кронштейны, корпуса агрегатов) из алюминиевых или магниевых сплавов.
- **Детали из композиционных материалов (КМ):** Современное направление. Изготавливаются методами автоклавного или безавтоклавного формования (панели обшивки, нервюры, шпангоуты).

- **По характеру производства:**

- **Детали общего применения** (болты, гайки, стандартные профили) – крупносерийное производство.
- **Детали специальные** (силовые элементы конкретной модели самолета) – серийное или мелкосерийное производство.

### 5.2. Особенности механической обработки силовых элементов и обшивки

Механическая обработка - ключевой этап придания детали окончательных размеров, формы и качества поверхности. Обработка деталей планера имеет ряд принципиальных особенностей, обусловленных их конструкцией, материалами и требованиями авиации.

Ключевой принцип в авиастроении - последовательное приближение к точной форме детали через ряд технологических переходов. Логическая цепочка изготовления большинства силовых деталей планера выглядит следующим образом:

1. Получение исходной заготовки (литьё, резка проката)
2. Предварительное формообразование (штамповка, гибка, вытяжка)
3. Механическая обработка (фрезеровка, сверление)
4. Финишная обработка и контроль.

Этап 1: Предварительное формообразование (создание приближённой геометрии). Цель этого этапа - получить из заготовки деталь, близкую по конфигурации к окончательной, с припуском для последующей обработки и оптимальным расположением волокон материала для прочности.

Таблица 3 – типичные методы формообразования

Процесс	Суть процесса	материалы	Типовые детали
Вытяжка	Формообразование полых детали из плоской заготовки (листа) путем втягивания ее краев в полость штампа пуансоном	Алюминиевые сплавы (Д16АМ, АМг6), Нержавеющие стали.	Обтекатели, закрытые профили, корпуса воздухозаборников, глубокие кожухи.
Гибка	Пластическое формообразование заготовки путем изгиба под действием момента сил. Осуществляется в штампах или на гибочных станках.	Алюминиевые сплавы, Титановые сплавы, Листовая сталь.	Уголки, зиги, элементы шпангоутов из профиля (Z-образные, П-образные).
Штамповка	Формообразование детали в закрытом штампе под высоким давлением. <b>Холодная</b> – без нагрева, <b>горячая</b> – с нагревом заготовки до ковочной температуры.	<b>Холодная:</b> Алюминиевые сплавы, малоуглеродистые стали. <b>Горячая:</b> Высокопрочные алюминиевые (В95, Д16), титановые (ВТ6) и стальные сплавы.	Профили лонжеронов, нервюры, шпангоуты.
Прокатка	Обжатие заготовки между вращающимися валками для изменения сечения, вытяжки или профилирования.	Алюминиевые, титановые и магниевые сплавы.	Листы обшивки, монолитные панели, стрингеры, лонжеронные пояса.
Вальцовка	Постепенная гибка листовой заготовки в цилиндрическую или коническую форму многократным прокатом между тремя валками.	Алюминиевые сплавы (АМг6, Д16), композиты (препрег)	Цилиндрические и конические секции фюзеляжа, обшивка хвостовой части.

Формовка	Укладка слоев армирующего материала (углеткань, стеклоткань) в матрицу с последующим отверждением полимерной матрицы под нагревом и давлением.	Полимерные композиционные материалы (ПКМ): угле- и стеклопластики.	Панели обшивки, нервюры, шпангоуты, оперение.
----------	--	--	---

## Этап 2: Механическая обработка (точное формообразование)

Это ключевой этап придания детали окончательных размеров, формы и качества поверхности. Обработка ведётся на станках с ЧПУ по заранее запрограммированному маршруту, который учитывает особенности деталей планера:

- **Крупногабаритность и низкая жёсткость:** используются мощные порталные или продольно-фрезерные станки со специальными системами поддержки.
- **Труднообрабатываемые материалы:** применяется специальный стойкий инструмент с точным подводом охлаждающей жидкости.
- **Высокие требования к точности и усталостной прочности:** обеспечиваются чистовыми режимами резания, контролем каждого перехода.

### Основные операции этого этапа:

- **Фрезерование:** Формирование точных контуров, пазов, посадочных плоскостей.
- **Сверление и развёртывание:** Создание высокоточных отверстий под крепёж.
- **Токарная обработка:** для деталей типа втулок, валов.

## Этап 3: Финишная обработка и контроль

После механической обработки деталь проходит завершающие операции, которые напрямую влияют на её долговечность и надёжность в конструкции.

Таблица 4: виды финишной обработки и контроля

Операция	Цель	Методы и примеры
Упрочняющая обработка	Снятие остаточных напряжений, повышение усталостной прочности.	Дробеструйная обработка, виброупрочнение. Обязательна для силовых деталей.
Защитно-декоративная обработка	Защита от коррозии, подготовка поверхности для окраски или склеивания.	Анодирование (для алюминия), химическое оксидирование, нанесение грунтов.

Операция	Цель	Методы и примеры
Финальный контроль	Подтверждение соответствия детали всем требованиям чертежа.	Координатно-измерительные машины (КИМ), контроль твёрдости, ультразвуковой или вихретоковый контроль на предмет скрытых дефектов.

Результатом всей цепочки является готовая к отправке на сборку деталь, имеющая точную геометрию, заданные физико-механические свойства и гарантированное качество.

Таким образом, изготовление детали планера - это не разрозненные операции, а единый, логически выстроенный процесс. Каждый предыдущий этап готовит условия для последующего: формообразование создаёт базу для мехобработки, а мехобработка подготавливает идеальную поверхность для финишного упрочнения и защиты. Понимание этой технологической последовательности и взаимного влияния этапов является основой для грамотного планирования производства и обеспечения высочайшего качества авиационной конструкции.

### Вопросы для самоподготовки:

1. Назовите четыре основные группы деталей планера по их конструктивно-силовому назначению. Приведите по одному примеру для каждой группы.
2. Чем отличается деталь, изготовленная из штамповки, от детали, полученной из листа методом вытяжки?
3. Какие технологические признаки лежат в основе классификации деталей планера? Поясните на примере, как тип исходной заготовки влияет на выбор метода производства.
4. Опишите логическую цепочку изготовления большинства силовых деталей планера. Из каких основных этапов она состоит?
5. В чем заключается цель этапа предварительного формообразования? Какие задачи решаются на этом этапе перед передачей детали на механическую обработку?

6. Перечислите три основных операции механической обработки, применяемые для придания деталям планера окончательных размеров. Для чего на этом этапе используются станки с ЧПУ?
7. Какие особенности конструкции и материала деталей планера необходимо учитывать при разработке технологии механической обработки?
8. Для чего на финишном этапе применяется упрочняющая обработка? Какое влияние она оказывает на ресурс детали?
9. Какие методы финального контроля используются для подтверждения соответствия готовой детали требованиям чертежа?
10. Почему изготовление детали планера рассматривается как единый процесс, а не набор разрозненных операций? К чему может привести нарушение последовательности этапов?

## **6 Изготовление деталей гтд**

Если детали планера работают в условиях механических нагрузок, то компоненты ГТД подвергаются комплексному термосиловому воздействию: сочетанию сверхвысоких температур, гигантских механических нагрузок и агрессивной среды. Это предопределяет использование уникальных материалов и специальных, зачастую уникальных, технологий их обработки.

### **6.1. Особенности деталей ГТД**

Детали ГТД функционируют в экстремальных условиях, что формирует особые требования на всех этапах их жизненного цикла - от выбора материала до финального контроля.

#### **Ключевые эксплуатационные факторы и технологические следствия:**

- **Высокие температуры** (до 1500°C в газовом потоке):
  - **Следствие:** Применение жаростойких никелевых и кобальтовых сплавов (например, Inconel 718), обладающих стойкостью к ползучести и окислению.
  - **Следствие:** Необходимость создания сложных систем внутреннего охлаждения деталей и нанесения теплозащитных покрытий (ТВС).

- **Механические и циклические нагрузки:**
  - **Следствие:** Требования к чистоте металла (вакуумный переплав), высокой усталостной прочности и безупречной микроструктуре.
  - **Следствие:** Использование прецизионных методов формообразования (изотермическая штамповка, точное литьё), исключающих внутренние дефекты.
- **Агрессивная химическая среда продуктов сгорания:**
  - **Следствие:** Применение коррозионностойких и окалиностойких защитных покрытий.

Таблица 5: Основные группы деталей, материалы и методы получения заготовок:

Группа деталей	Типичные материалы	Преобладающий метод получения заготовки
Лопатки турбины	Монокристаллические никелевые сплавы	Точное литьё по выплавляемым моделям (ЛВМ)
Диски и валы ротора	Высокопрочные титановые сплавы, никелевые сплавы	Горячая объёмная штамповка (ковка), в т.ч. изотермическая
Корпус камеры сгорания	Жаропрочные сплавы на основе никеля и кобальта	Сварка-пайка секций, листовые штамповка и сварка

## 6.2. Технологии изготовления ключевых деталей ГТД

### Изготовление дисков и валов

Диски и валы - наиболее нагруженные силовые компоненты, воспринимающие центробежные силы.

- **Основной процесс:** Горячая объёмная штамповка (ковка). Изотермическая ковка обеспечивает формирование оптимальной мелкозернистой структуры, повышающей усталостную долговечность.
- **Механическая обработка:** Токарная и фрезерная обработка на станках с ЧПУ, протягивание шлицев, шлифование.
- **Финишное упрочнение:** Обязательный дробеструйный наклёп для создания на поверхности сжимающих остаточных напряжений, подавляющих развитие усталостных трещин.

- **Контроль:** 100% ультразвуковой или вихретоковый контроль для обнаружения внутренних дефектов.

## **Изготовление лопаток турбины**

Лопатки являются наиболее наукоёмкими компонентами.

- **Литьё по выплавляемым моделям (ЛВМ):** Позволяет получить детали со сложнейшей внутренней системой охлаждающих каналов, формируемых с помощью керамических сердечников. Применение монокристаллических (ЖС) сплавов резко повышает жаропрочность.

- **Финальные высокотехнологичные операции:**

1. **Лазерное сверление:** Формирование сотен микроотверстий на поверхности и кромках для выхода охлаждающего воздуха и создания защитной теплоизолирующей воздушной плёнки.

2. **Нанесение покрытий:** Методами газотермического напыления (плазменного, электронно-лучевого) наносятся:

- Внутреннее жаростойкое покрытие.
- Внешнее керамическое теплозащитное покрытие (ТВС).

- **Контроль:** Рентгеновский контроль для проверки целостности внутренних каналов, контроль геометрии профиля.

## **Специальные и современные методы обработки**

Для доводки деталей из жаропрочных сплавов применяются технологии, минимизирующие механические и тепловые воздействия.

**Электрофизико-химические методы:** Электроэрозионная обработка применяется для создания сложных отверстий, пазов в закалённых материалах. Электрохимическая обработка - для полировки поверхностей и снятия деформированного слоя без наведения остаточных напряжений.

**Аддитивные технологии (3D-печать):** Используются для быстрого прототипирования и изготовления экспериментальных деталей; Производства сложноконтурных компонентов с интегрированными каналами (например, форсунок, элементов); Восстановления изношенных или повреждённых деталей (наплавка).

## **Контроль качества и диагностика**

Система контроля в производстве ГТД носит всеобъемлющий характер.

- **Неразрушающий контроль:** Ультразвуковой, рентгеновский, капиллярный, вихретоковый - на всех критичных этапах.
- **Контроль покрытий:** Измерение толщины, адгезии, пористости.
- **Автоматизация:** Внедрение роботизированных комплексов и систем компьютерного анализа данных для минимизации человеческого фактора.

Изготовление деталей ГТД - это область концентрации самых передовых достижений в области материаловедения, металлообработки и метрологии. Технологический процесс для каждой детали представляет собой строго регламентированную цепочку операций, где обеспечение абсолютной надёжности является приоритетом над всеми другими показателями. Постоянное развитие технологий (аддитивные, новые покрытия) направлено на повышение эффективности, снижение массы и увеличение ресурса двигателей.

## **Вопросы для самопроверки**

1. Перечислите три основных экстремальных фактора, воздействующих на детали ГТД в процессе работы.
2. Почему для изготовления лопаток турбины преимущественно используют литьё, а для дисков - ковку? Дайте технологическое обоснование.
3. Какую функцию выполняет керамический сердечник в процессе литья охлаждаемой лопатки турбины?
4. Назовите две основные функции теплозащитного покрытия (ТВС) на лопатке турбины.
5. В чём заключается принципиальное преимущество монокристаллической структуры лопатки перед поликристаллической?
6. Для чего проводится операция дробеструйного наклёпа дисков и валов?
7. Какой метод неразрушающего контроля является основным для проверки внутренних дефектов в дисках послековки?

8. Каковы основные области применения аддитивных технологий (3D-печати) в современном производстве ГТД?
9. При ультразвуковом контроле диска компрессора выявлено небольшое внутреннее включение (нерастворимая примесь) в зоне, подверженной максимальным растягивающим напряжениям. Какое решение должен принять инженер по качеству: допустить диск к дальнейшей обработке или забраковать? Аргументируйте свой ответ, опираясь на особенности работы детали.
10. Необходимо выбрать метод обработки для партии жаростойких деталей сложной формы из сплава Inconel 718. Стандартное фрезерование приводит к деформации и высокому износу инструмента. Какой альтернативный метод обработки вы бы предложили и почему?

## 7 Сборка узлов и агрегатов

Сборка является заключительным и наиболее ответственным этапом производства летательного аппарата. Это возведение целостной конструкции, обладающей заданными эксплуатационными свойствами. Трудоемкость сборочных работ в авиастроении составляет от 30% до 50% общей трудоемкости изготовления планера.

В процессе сборки детали соединяются в узлы, узлы – в агрегаты, а агрегаты – в готовое изделие. Каждый уровень требует своих методов, оснастки и контроля.

### 7.1. Иерархия и методы сборки

В авиастроении принята четкая классификация сборочных единиц по уровням входимости:

Таблица 6: классификация сборочных единиц

Уровень	Сборочная единица	Определение	Примеры
I	Узел	Составная часть, состоящая из нескольких деталей, соединенных между собой. Обладает конструктивной и технологической завершенностью.	Нервюра, шпангоут, лонжерон, кронштейн, створка люка.
II	Агрегат	Крупная составная часть планера, состоящая из нескольких узлов.	Крыло, киль, стабилизатор
III	Изделие	Готовый летательный аппарат, прошедший все виды сборки и испытаний.	Самолет, вертолет в сборе.

Такая иерархия позволяет параллельно вести сборку различных узлов и агрегатов на разных производственных участках, что значительно сокращает общий цикл производства.

Различают два основных метода организации сборочных работ:

1. **Стационарная сборка:** Собираемое изделие (узел или агрегат) неподвижно закреплено на рабочем месте, а бригада сборщиков последовательно выполняет все операции. Применяется в единичном и мелкосерийном производстве.
2. **Поточная сборка:** Собираемое изделие перемещается от одного рабочего поста к другому. Каждый пост оснащен для выполнения строго определенной операции. Является основным методом серийного производства. Перемещение может быть: Свободным (на тележках, рольгангах) и принудительным (конвейером).

Выбор метода определяется программой выпуска, трудоемкостью и конструкцией изделия. Для серийного производства характерна поточная сборка с перемещением агрегатов по цеху на специальных транспортных средствах.

## 7.2. Особенности стапельной сборки планера

Сборка крупногабаритных агрегатов планера ведется в специальных приспособлениях – стапелях. Стапель – это сложное пространственное сооружение, обеспечивающее точное положение всех собираемых узлов и деталей согласно требованиям чертежа.



Рис. 8 Стапель

К стапельной оснастке предъявляются жесткие требования:

- **Жесткость и стабильность:** Стапель не должен деформироваться под весом собираемого изделия или под действием усилий клепки.
- **Точность фиксации:** Все фиксирующие элементы должны устанавливаться с высокой точностью и сохранять ее в процессе эксплуатации.
- **Доступность:** Конструкция стапеля должна обеспечивать свободный доступ к зонам соединения для работы инструментом.
- **Быстрая переналаживаемость (для универсальных стапелей):** возможность перестройки для сборки разных типоразмеров агрегатов.

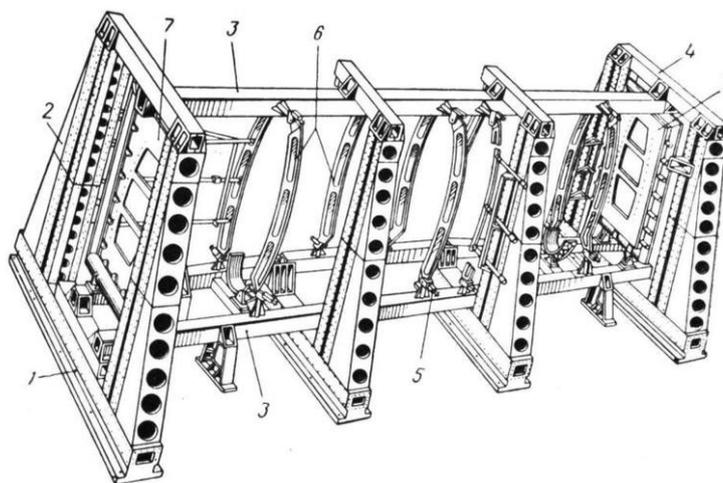


Рис. 9 Стапель сборки крыла:

1 – основание; 2 – колонна; 3 – балка; 4 – поперечная балка; 5 – зажим; 6 – рубильники; 7 – стапельные плиты.

### Типы стапелей

По степени специализации различают:

- **Специализированные (жесткие):** Предназначены для сборки одного типоразмера агрегата. Обеспечивают максимальную точность и производительность, но требуют длительного изготовления и дороги.
- **Универсально–сборные (переналаживаемые):** Построены на основе системы базовых элементов (плит, балок, колонн с координатными отверстиями). Позволяют путем перестановки фиксаторов настраиваться на сборку различных агрегатов. Экономически эффективны в условиях частой смены объектов производства.

Современные стапелы оснащаются:

- **Лазерными трекерами и сканерами** для контроля пространственного положения узлов и точной установки фиксаторов при монтаже оснастки.
- **Автоматизированными приводами** для позиционирования элементов.
- **Системами автоматизированного контроля** процессов сверления и клепки.

Важнейшим этапом является **стыковка** готовых агрегатов (например, стыковка крыла с фюзеляжем), которая также часто выполняется в специализированных стыковочных стендах с применением лазерных центрирующих систем для обеспечения соосности и зазоров.



Рис. 9 Стыковка частей фюзеляжа

### **7.3. Особенности сборки модулей газотурбинного двигателя**

Сборка ГТД существенно отличается от сборки планера из-за высоких требований к точности, чистоте, балансировке и условиям работы.

#### **Модульный принцип**

Современные ГТД строятся по модульному принципу. Двигатель разделяется на крупные функционально законченные модули (вентилятор, компрессор, камера сгорания, турбина высокого и низкого давления, коробка приводов). Это позволяет:

1. **Параллельно собирать модули** в разных цехах или даже на разных заводах.

2. **Упростить ремонт и обслуживание:** Замена неисправного модуля производится непосредственно в эксплуатации без полной разборки двигателя.
3. **Обеспечить высокую технологичность** и взаимозаменяемость узлов.

### **Технология сборки роторов и балансировка**

Наиболее ответственным этапом является сборка роторов компрессора и турбины. Она включает:

- **Сборку дисков и валов:** Соединение осуществляется шлицами, болтами или электронно-лучевой сваркой (для получения неразъемных роторов-барабанов).
- **Установку лопаток:** Каждая лопатка вставляется в паз диска и фиксируется замком. Для обеспечения минимального дисбаланса применяется **селективная сборка (комплектование)** - подбор лопаток по весу и геометрическим параметрам с распределением их по окружности ротора на ЭВМ. Создаются автоматизированные рабочие места комплектовщика.
- **Балансировку роторов:** После сборки каждый ротор (а затем и ротор в сборе) проходит динамическую балансировку на специальных станках для выявления и устранения дисбаланса.

### **Сборка статоров и корпусов**

Корпуса ГТД (компрессора, камеры сгорания, турбины) представляют собой тонкостенные оболочки сложной формы. При их сборке важно:

- Обеспечить соосность всех опор ротора.
- Герметизировать соединения полукорпусов и фланцев.
- Выдержать радиальные зазоры между лопатками ротора и корпусом (в современных двигателях используются активные системы регулировки зазоров).

### **Общая сборка и контроль**

На этапе общей сборки модули стыкуются между собой, соединяются валы роторов (через шлицевые муфты), монтируются коробки приводов агрегатов, трубопроводы и электросистемы. Каждый этап сопровождается контрольными операциями:

- Проверка легкости вращения роторов.

- Контроль соосности.
- Измерение зазоров в проточной части.
- Проверка герметичности масляных и топливных полостей

Технология сборки узлов и агрегатов является одним из ключевых разделов производства авиационной техники.

1. **Иерархическая структура** (деталь → узел → агрегат → изделие) и выбор метода сборки (стационарная или подвижная) определяют организацию всего производственного процесса.
2. **Стапельная сборка** обеспечивает требуемую точность и взаимозаменяемость крупногабаритных агрегатов планера. Современные стапели оснащаются лазерными измерительными системами, позволяющими контролировать геометрию с микронной точностью.
3. **Сборка модулей ГТД** отличается высочайшими требованиями к точности, чистоте и балансировке. Модульный принцип и селективная сборка лопаток являются основой обеспечения ресурса и надежности современных двигателей.

Таким образом, качество выполнения сборочных работ напрямую определяет надежность, безопасность и долговечность летательного аппарата в целом.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Опишите иерархическую структуру сборки летательного аппарата. Приведите примеры узлов и агрегатов.
2. В чем различие между стационарным и подвижным (поточным) методами сборки? От чего зависит выбор метода?
3. Что такое стапель? Какие основные требования предъявляются к стапельной оснастке?
4. Перечислите типы стапелей по степени специализации. Каковы области их применения?
5. Какие современные измерительные системы применяются при монтаже стапелей и стыковке агрегатов?

6. В чем суть модульного принципа конструкции газотурбинного двигателя? Какие преимущества он дает в производстве и эксплуатации?
7. Почему при сборке роторов ГТД применяется комплектование лопаток по весу?
8. Какие параметры контролируются при сборке и окончательной приемке газотурбинного двигателя?
9. Сравните требования к чистоте при сборке планера и при сборке ГТД. Чем объясняются различия?
10. Как обеспечивается взаимозаменяемость агрегатов планера при их стыковке на финальной сборке?

## 8 Общая сборка ВС

Общая сборка является завершающим этапом производства летательного аппарата, на котором ранее собранные агрегаты (крыло, фюзеляж, оперение) соединяются в единое изделие, а затем оснащаются всеми бортовыми системами. Трудоемкость этих работ составляет значительную часть производственного цикла, а качество их выполнения напрямую определяет безопасность и надежность будущего воздушного судна.

### 8.1. Общая сборка ВС: стыковка агрегатов

#### Организация общей сборки

Общая сборка летательного аппарата — это финальный аккорд производства, ради которого работали тысячи людей на десятках заводов-смежников. Это высокоорганизованный логистический и технологический процесс, который разворачивается в цехах окончательной сборки.

Процесс организуется планово-диспетчерским бюро цеха совместно с технологической службой. В цехе действует четкая иерархия:

1. **Начальник цеха** — несет полную ответственность за выполнение плана.
2. **Старший мастер** — управляет потоками на конкретном участке (например, на участке стыковки крыла).
3. **Мастера** — руководят бригадами непосредственно на рабочих местах.

4. **Технологи** — контролируют соблюдение процесса и решают возникающие технические вопросы.
5. **Слесари-сборщики** — исполнители, которые непосредственно стыкуют агрегаты и монтируют системы.

Цех окончательной сборки оснащен сложной инфраструктурой:

- **Стыковочные стапели и стенды** на которых происходит соединение агрегатов. Они оснащены ложементами, фиксаторами и домкратами. Современные стенды часто автоматизированы и управляются с пультов операторов.
- **Крановое хозяйство** — мостовые краны и специальные траверсы для подъема крупногабаритных агрегатов (крыльев, секций фюзеляжа) без их повреждения.
- **Накопители** — размеченные площадки, куда поступают готовые агрегаты со смежных заводов. Здесь они проходят входной контроль.
- **Транспортные магистрали** — широкие проезды для электрокара, тележек и тягачей, которые перемещают агрегаты по цеху.
- **Рабочие места монтажников** — многоярусные передвижные вышки и платформы, обеспечивающие доступ к разным уровням фюзеляжа.

Общую сборку ВС можно разделить на несколько этапов:

#### **Этап 1. Подготовка и входной контроль**

Агрегаты поступают в цех на специальных трейлерах или железнодорожных платформах, которые встречают представители ОТК и службы снабжения. Проверяется комплектность, сохранность, наличие паспортов.

#### **Этап 2. Внестапельная подготовка**

Агрегаты направляются в зоны подготовки. Здесь рабочие: снимают технологические заглушки; монтируют кронштейны и фитинги, которые было бы неудобно ставить в стесненных условиях уже собранного изделия; проверяют базовые отверстия под стыковку.

### **Этап 3. Подача и позиционирование**

Когда стапель освобождается, агрегаты (например, носовая, средняя и хвостовая секции фюзеляжа) подаются к стапелю. С помощью кранов или специальных тележек они заводятся в стапель и опускаются на ложементы. Оператор или бригада сборщиков с помощью домкратов и лазерных трекеров выставляют агрегаты, ориентируясь на базовые отверстия и нивелировочные метки.

### **Этап 4. Стыковка и фиксация**

Убедившись, что все зазоры и углы совпадают, технологи дают команду на фиксацию. Часть отверстий под стыковые болты может сверлиться прямо сейчас, через пакет деталей, специальным автоматизированным инструментом. Затем в отверстия вставляются калиброванные болты, и бригада сборщиков с помощью тарированных ключей затягивает их.

### **Этап 5. Контроль качества**

После затяжки всех болтов и снятия рубильников стапеля проводится геодезический контроль. Специалисты лаборатории с помощью лазерных сканеров проверяют геометрию конструкции. Результаты сравниваются с электронной моделью. Только после подписания акта ОТК изделие считается состыкованным.

### **Этап 6. Передача под монтаж**

Готовый планер перемещается на следующую позицию для монтажа бортовых систем. Такая организация позволяет добиться ритмичности. Пока один самолет находится на финальной стыковке в стапеле, на соседних позициях готовятся к работе следующие агрегаты.

### **Типы стыковых узлов**

В конструкции планера применяются различные типы стыковых соединений:

- **Фланцевые стыки** — используются для соединения цилиндрических отсеков фюзеляжа;
- **Вильчатые стыки** — применяются для соединения крыла с центропланом;
- **Телескопические стыки** — для соединения трубчатых элементов;
- **Накладные стыки** — для соединения панелей и листов обшивки.



Рис. 9 Цех окончательной сборки MC-21

### **Технологический процесс стыковки на примере SSJ-100**

Рассмотрим процесс стыковки отъемной части крыла с фюзеляжем пассажирского самолета SSJ-100. Этот процесс включает следующие этапы:

1. **Установка агрегатов в стыковочный стенд:** Секции фюзеляжа и консоли крыла устанавливаются на ложементы стенда. Используются автоматизированные стыковочные стенды, которые обеспечивают точное позиционирование агрегатов.
2. **Контроль взаимного положения:** С помощью лазерных трекеров и нивелировочных точек контролируется пространственное положение агрегатов. Обеспечивается заданная точность аэродинамических обводов.
3. **Фиксация:** Агрегаты фиксируются относительно друг друга с помощью временных технологических креплений.
4. **Обработка отверстий:** Выполняется сверление отверстий под болтовые соединения. В современных стендах эти операции автоматизированы, что обеспечивает высокую точность и взаимозаменяемость.

5. **Установка крепежа:** Монтируются штатные стыковочные болты с нормированным усилием затяжки.
6. **Контроль:** Проверяется качество стыковки, зазоры и соответствие геометрии техническим условиям.

### **Метод обеспечения взаимозаменяемости**

Для обеспечения взаимозаменяемости агрегатов по конструктивно-эксплуатационным разъемам и стыкам применяется метод механической обработки на разделочных стандах. Суть метода заключается в том, что базовые поверхности стыков обрабатываются с высокой точностью в специальных приспособлениях, после чего любой агрегат данного типа может быть состыкован с любым другим без подгонки.

## **8.2. Монтаж бортовых систем**

### **Общая характеристика монтажных работ**

Монтажные работы включают установку и крепление элементов бортового оборудования, прокладку коммуникаций, соединение монтажных систем между собой с последующим контролем их работы. Эти работы имеют свою специфику и отличаются от сборочных работ:

- выполняются в стесненных условиях;
- требуют высокой чистоты и защиты от загрязнений;
- предусматривают металлизацию всех элементов для обеспечения электробезопасности

Монтажные работы подразделяются на четыре этапа:

1. Подготовка к монтажу (расконсервация, комплектование, зачистка под металлизацию);
2. Установка и крепление приборов и агрегатов;
3. Прокладка и крепление коммуникаций;
4. Соединение оборудования и коммуникаций между собой.

Для сокращения цикла производства монтажные работы выполняют на панелях, в секциях, при сборке агрегатов и на этапе окончательной сборки. Наибольшая

производительность достигается при монтаже на панелях, установленных в вертикальном положении, так как это обеспечивает удобный доступ к любому месту.

### **Монтаж гидравлической и топливной систем**

При монтаже гидро- и пневмосистем необходимо соблюдать строгие технологические требования:

1. Все поступающие на монтаж трубопроводы проходят 100% входной контроль.
2. Перед установкой трубы продуваются сухим очищенным воздухом.
3. Свободные концы трубопроводов закрываются заглушками, которые снимаются непосредственно перед монтажом.

**Прокладка трубопроводов** должна обеспечивать: соосность внутренних каналов без натяга и напряжения соединяемых элементов; заданные зазоры между трубопроводами и деталями конструкции; прочность крепления и отсутствие зазоров в местах крепления; соответствующие радиусы изгибов.

Для соединения трубопроводов используются тарированные ключи, так как недотягивание приводит к негерметичности, а перетягивание — к деформации и срыву резьбы.

**Металлизация** всех элементов конструкции предназначена для соединения их в одну электрическую цепь. Она исключает возможность возникновения радиопомех и пожаров от искровых разрядов статического электричества. При установке перемычек металлизации необходимо зачищать до металлического блеска места соприкосновения наконечников.

### **Монтаж электрической системы**

Монтаж электрической системы включает заблаговременную установку крепежных элементов (кронштейнов, хомутов), изготовление и прокладку жгутов и кабелей, монтаж и проверку оборудования.

**Изготовление жгутов** включает следующие операции:

- отмеривание и отрезка проводов заданной длины;
- маркировка проводов;
- раскладка проводов на плаз-шаблоне для вязки в жгут;

- вязка проводов ниточными бандажами;
- обшивка жгутов защитными материалами;
- зачистка концов и пайка разъемов.

Современное производство использует механизированные участки, где автоматы отмеряют и отрезают провода, снимают изоляцию, надевают бирки и облуживают концы.

**Контроль качества** выполняется с помощью автоматических пультов, проверяющих отсутствие обрывов, замыканий и сопротивление изоляции.

### **Особенности монтажа силовой установки**

Монтаж двигателей и их систем выполняется на этапе окончательной сборки.

Силовая установка включает:

- двигатель с его топливной и масляной системами;
- топливную систему самолета;
- масляную систему самолета;
- входные и выходные устройства;
- систему подвески двигателей.

Система подвески (крепления) двигателей предназначена для восприятия всех массовых сил и сил тяги с передачей усилий на конструкцию, а также для уменьшения вибрации от двигателя на самолет.

Общая сборка и монтаж являются завершающими и наиболее ответственными этапами производства летательного аппарата.

1. **Стыковка агрегатов** выполняется в специализированных стендах с использованием современных лазерных измерительных систем. Применение автоматизированных стыковочных стендов (например, для SSJ-100) обеспечивает высокую точность и сокращает цикл сборки.
2. **Монтаж бортовых систем** требует строгого соблюдения технологической дисциплины: чистота, защита от загрязнений, использование тарированного инструмента, металлизация всех элементов. Значительная часть монтажных работ выполняется на панелях и в секциях до общей сборки, что повышает производительность.

3. **Контроль качества** сопровождает все этапы — от входного контроля комплектующих до испытаний смонтированных систем. Качество выполнения сборочно-монтажных работ напрямую определяет надежность, безопасность и ресурс будущего воздушного судна.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Какие типы стыковых узлов применяются в конструкции планера?
2. Опишите технологическую последовательность стыковки крыла с фюзеляжем на примере SSJ-100.
3. Какое оборудование применяется для контроля взаимного положения агрегатов при стыковке?
4. Перечислите основные этапы монтажных работ в авиастроении.
5. Какие требования предъявляются к монтажу трубопроводов гидравлических систем?
6. Почему при монтаже трубопроводов необходимо использовать тарированные ключи?
7. Для чего выполняется металлизация и как она производится?
8. Опишите технологию изготовления жгутов электропроводки.
9. Какие меры принимаются для защиты систем от загрязнений при монтаже?
10. Какие элементы входят в состав силовой установки самолета?

### **9 Испытания авиационной техники**

Испытания являются обязательным и важнейшим этапом жизненного цикла авиационной техники. Ни одно воздушное судно не может быть допущено к эксплуатации без подтверждения заявленных характеристик, надежности и безопасности. В авиастроении сложилась строгая система испытаний, включающая наземную отработку узлов, агрегатов и систем, стендовые испытания двигателей, статические и ресурсные испытания планера, а также летные испытания опытных образцов.

## 9.1. Испытания планера и систем

Прочность и надежность планера являются основой безопасности полетов. Подтверждение прочностных характеристик осуществляется путем проведения статических и ресурсных (усталостных) испытаний как натурных конструкций, так и их элементов.

### Статические испытания

Статические испытания проводятся для подтверждения способности конструкции воспринимать эксплуатационные и расчетные нагрузки без разрушения и без возникновения недопустимых остаточных деформаций. Суть метода заключается в имитации нагрузок, действующих на конструкцию на всех режимах полета, с регистрацией напряженно-деформационного состояния.

Испытания проводятся в специализированных лабораториях, оснащенных:

- гидравлическими или электромеханическими системами нагружения (гидроцилиндрами, приводами);
- маслонасосными станциями и устройствами управления;
- комплектом силового механического оборудования (рычаги, тяги, якоря).

Перед началом испытаний все элементы силового оборудования проходят проверку: они нагружаются силой, в 1,25 раза превышающей максимальную нагрузку.

Важным этапом подготовки является проверка герметичности фюзеляжа, особенно для гермокабин. Затем последовательно прикладываются нагрузки, соответствующие наиболее тяжелым случаям нагружения.

Ключевым понятием является разрушающая нагрузка. Конструкция должна выдерживать расчетную нагрузку не разрушаясь. Разрушение допускается только при нагрузке, превышающей расчетную.

**Ресурсные (усталостные) испытания** Цель ресурсных испытаний - сертификация планера по условиям усталостной прочности, отработка регламента технического обслуживания и исследование температурного и напряженно-деформированного состояния при многократном повторении нагрузок типового полета.

Испытания проводятся в лабораториях, оснащенных многоканальными автоматизированными системами управления, позволяющими одновременно управлять десятками гидроцилиндров, работающих в циклическом режиме. В процессе комплексных ресурсных испытаний циклически воспроизводятся: изменение избыточного давления в гермоотсеках (имитация каждого полетного цикла «взлет-посадка»); изменение уровня имитатора топлива в баках; переменные аэродинамические нагрузки на крыло, оперение, фюзеляж.

Периодически (через определенное количество циклов) испытания приостанавливают и проводят детальный неразрушающий контроль всей конструкции для обнаружения зарождающихся усталостных трещин. Для этого применяются методы неразрушающего контроля: токовихревой; ультразвуковой; рентгеновский; акустико-эмиссионный.

Примером таких испытаний служат работы по самолету МС-21 в ЦАГИ, где проводится статические испытания планера для подтверждения прочностных характеристик и обеспечения сертификации типа. Аналогичные работы ведутся в СибНИА по программе SSJ-NEW.



Рис. 10 Испытание крыла SSJ-100 на стенде

## **Функциональные проверки систем**

Параллельно с прочностными испытаниями проводятся функциональные проверки всех систем ВС: гидравлической, топливной, электрической, системы кондиционирования, управления и т.д. Цель таких проверок - подтверждение работоспособности, герметичности, соответствия параметров техническим условиям. Проверки выполняются на специализированных наземных испытательных стендах, имитирующих работу систем в различных режимах, с использованием контрольно-измерительной аппаратуры (манометры, расходомеры, вольтметры, частотомеры). Например, гидросистему проверяют на герметичность под давлением (опрессовка), проверяют срабатывание гидроцилиндров привода шасси, закрылков, параметры насосов.

## **9.2. Испытания ГТД на контрольно-испытательной станции**

Газотурбинные двигатели являются сложнейшими изделиями авиационной техники, работающими в экстремальных условиях высоких температур, давлений и нагрузок. Поэтому каждый серийный двигатель проходит обязательные испытания на контрольно-испытательной станции.

### **Назначение и оснащение КИС**

Контрольно-испытательная станция представляет собой специализированный комплекс, предназначенный для проведения приемо-сдаточных, периодических и специальных испытаний двигателей.

Основное оборудование КИС включает:

- **испытательные боксы** с мощной системой вентиляции и шумоглушения;
- **подвесные устройства** (стенды) для крепления двигателя;
- **топливную систему** с расходомерами высокого давления;
- **воздухозаборные устройства** (для имитации условий полета);
- **систему измерения тяги** (тензометрические устройства);



Рис. 11 Двигатель ПС-90 на испытательном стенде

### **Виды испытаний ГТД**

Испытания ГТД подразделяются на несколько категорий:

1. **Доводочные испытания:** проводятся на этапе создания двигателя для отработки конструкции и выявления слабых мест.
2. **Сертификационные испытания:** проводятся на специально выделенных образцах для подтверждения соответствия типовой конструкции требованиям норм летной годности.
3. **Приемо-сдаточные испытания (ПСИ):** проводятся на каждом серийном двигателе для проверки соответствия его характеристик техническим условиям и подтверждения качества изготовления.

### **Типовая программа приемо-сдаточных испытаний**

Программа ПСИ включает следующие этапы:

- **Холодная прокрутка:** проверка вращения роторов, отсутствия задеваний, работы маслосистемы без запуска камеры сгорания.
- **Запуск и выход на режим малого газа:** проверка устойчивости запуска, параметров топливной автоматики.
- **Выход на взлетный режим:** измерение тяги, расхода топлива, частот вращения роторов, температур газов за турбиной.

- **Снятие дроссельных характеристик:** проверка работы двигателя на всех режимах от малого газа до взлетного.
- **Проверка приемистости:** время перехода с режима малого газа на взлетный.
- **Контроль вибрации:** измерение вибрационных перегрузок опор двигателя.
- **Проверка герметичности** топливных и масляных полостей.

В процессе испытаний ведется непрерывная регистрация более сотни параметров. Современные КИС оснащены автоматизированными системами сбора и обработки данных, что исключает субъективные ошибки оператора. По результатам испытаний строится график зависимостей параметров, который сравнивается с эталонным для данного типа двигателя. По результатам испытаний двигатель либо принимается и передается заказчику, либо направляется на доработку при выявлении несоответствий.

Испытания являются неотъемлемой частью производственного цикла авиационной техники.

1. **Статические и ресурсные испытания планера** подтверждают прочность, надежность и заданный ресурс конструкции. Они проводятся в специализированных лабораториях с использованием сложных многоканальных систем нагружения и современных средств неразрушающего контроля.

2. **Функциональные проверки систем** обеспечивают уверенность в работоспособности всех бортовых комплексов.

3. **Испытания ГТД на КИС** гарантируют, что каждый серийный двигатель соответствует заявленным тяговым, экономическим и эксплуатационным характеристикам.

Только пройдя полный цикл наземных испытаний, авиационная техника допускается к летным испытаниям и, в конечном итоге, к коммерческой эксплуатации, обеспечивая главный приоритет - безопасность полетов.

## **Вопросы для самопроверки:**

1. С какой целью проводятся статические испытания планера? Какие нагрузки при этом имитируются?
2. Чем отличаются статические испытания от ресурсных (усталостных)?
3. Какое оборудование входит в состав лаборатории статических испытаний?
4. Что такое «разрушающая нагрузка» и как она соотносится с эксплуатационной?
5. Какие методы неразрушающего контроля применяются при ресурсных испытаниях для обнаружения зарождающихся дефектов?
6. Для чего предназначена контрольно-испытательная станция (КИС) в двигателестроении?
7. Перечислите основные этапы приемо-сдаточных испытаний серийного ГТД.
8. Какие параметры контролируются в процессе испытаний двигателя?
9. Какие виды испытаний ГТД существуют помимо приемо-сдаточных?
10. Почему испытания считаются обязательным этапом производства авиационной техники?

## **10. Современные тенденции в авиационном производстве**

Сегодня отрасль переживает глубокую трансформацию, вызванную необходимостью повышения экономической эффективности, сокращения сроков разработки и производства, а также ужесточением экологических требований.

### **Цифровизация производства: от чертежа к цифровому двойнику**

Главной тенденцией последних десятилетий является переход от традиционного «бумажного» производства к сквозной цифровой технологии (Digital Thread).

**Единое цифровое пространство:** Современный самолет проектируется в виде единой трехмерной модели (CAD), которая служит единственным источником геометрической информации. На ее основе автоматически генерируются управляющие программы для станков с ЧПУ (CAM), разрабатываются схемы базирования и технологическая оснастка, а также создаются программы для контрольно-измерительных машин (CAE).

**Цифровой двойник (Digital Twin):** Виртуальная копия реального изделия, которая сопровождает его на всех этапах жизненного цикла – от проектирования до эксплуатации. Цифровой двойник позволяет моделировать поведение конструкции под нагрузкой, прогнозировать ресурс и обрабатывать технологические процессы до начала реального производства, что резко сокращает сроки и затраты на опытную отработку.

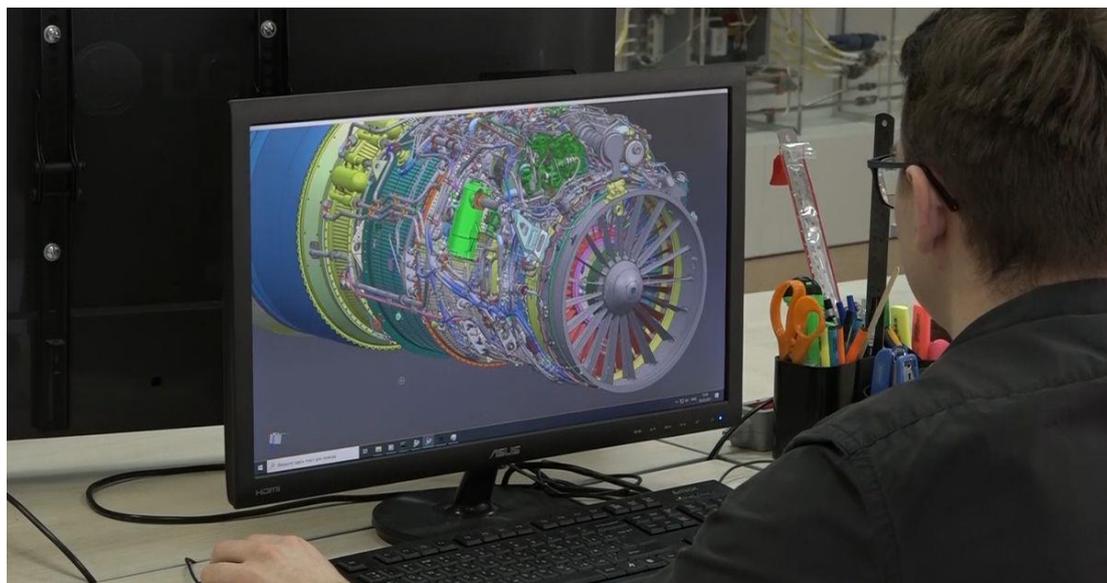


Рис. 12 Рабочее место технолога

### **Новые конструкционные материалы**

Доля полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкции современных самолетов достигла 50% и более (Boeing 787, Airbus A350, MC-21). Это позволяет снизить массу планера на 15-20% по сравнению с алюминиевыми аналогами. Композиты применяются для изготовления крыла, оперения, панелей фюзеляжа.

Наряду с композитами растет применение титановых сплавов, которые сохраняют прочность при высоких температурах и обладают высокой коррозионной стойкостью. Доля титана в современных лайнерах достигает 14-15%.

### **Аддитивные технологии (3D-печать)**

Аддитивные технологии, или послойное наращивание материала, становятся неотъемлемой частью авиационного производства. Наибольшее применение они находят в трех направлениях:

1. **Изготовление опытных образцов и оснастки:** Быстрое прототипирование позволяет в короткие сроки проверять конструктивные решения и изготавливать сложную оснастку для литья и штамповки.
2. **Производство деталей сложной геометрии:** 3D-печать металлическими порошками (титан, жаропрочные никелевые сплавы) позволяет создавать детали с внутренними охлаждающими каналами, которые невозможно получить традиционными методами. Пример - форсунки камер сгорания авиационных двигателей, которые становятся легче и эффективнее.
3. **Ремонт и восстановление:** Аддитивные технологии применяются для восстановления изношенных деталей (лопаток турбин) путем наплавки металла с последующей механической обработкой.

### **Роботизация и автоматизация**

Современные сборочные цеха оснащаются промышленными роботами, которые выполняют наиболее ответственные и трудоемкие операции:

- **Автоматизированная клепка:** Роботизированные комплексы сверлят отверстия, устанавливают и расклепывают заклепки с высокой точностью и производительностью, что особенно важно для крупносерийного производства.
- **Лазерная проекция:** Лазерные проекторы проецируют контуры деталей и места установки крепежа прямо на сборочную поверхность, исключая необходимость в физических шаблонах и разметке.
- **Автоматизированная укладка композитов:** Роботы-укладчики (AFP - Automated Fiber Placement) с высокой скоростью укладывают армирующие ленты в матрицу, формируя крупногабаритные панели сложной кривизны.

## Список используемой литературы

1. Бабушкин В.М., Буланов В.В., Ермаков А.С. Технология самолетостроения: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2008. – 448 с.
2. Баранов В.Н., Зорин В.А. Производство авиационных двигателей: Учебное пособие. – Самара: СГАУ, 2012. – 312 с.
3. Григорьев В.П., Одинцов Л.Г. Технология производства летательных аппаратов: Учебник. – М.: Высшая школа, 2016. – 512 с.
4. Ермаков А.С., Чурсин В.В. Технологическая подготовка авиастроительного производства: Учебное пособие. – М.: МАИ, 2019. – 280 с.
5. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: Учебник. – М.: МИСиС, 2005. – 432 с.
6. Романов В.И., Сироткин О.С. Сборка и монтаж летательных аппаратов: Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2011. – 368 с.