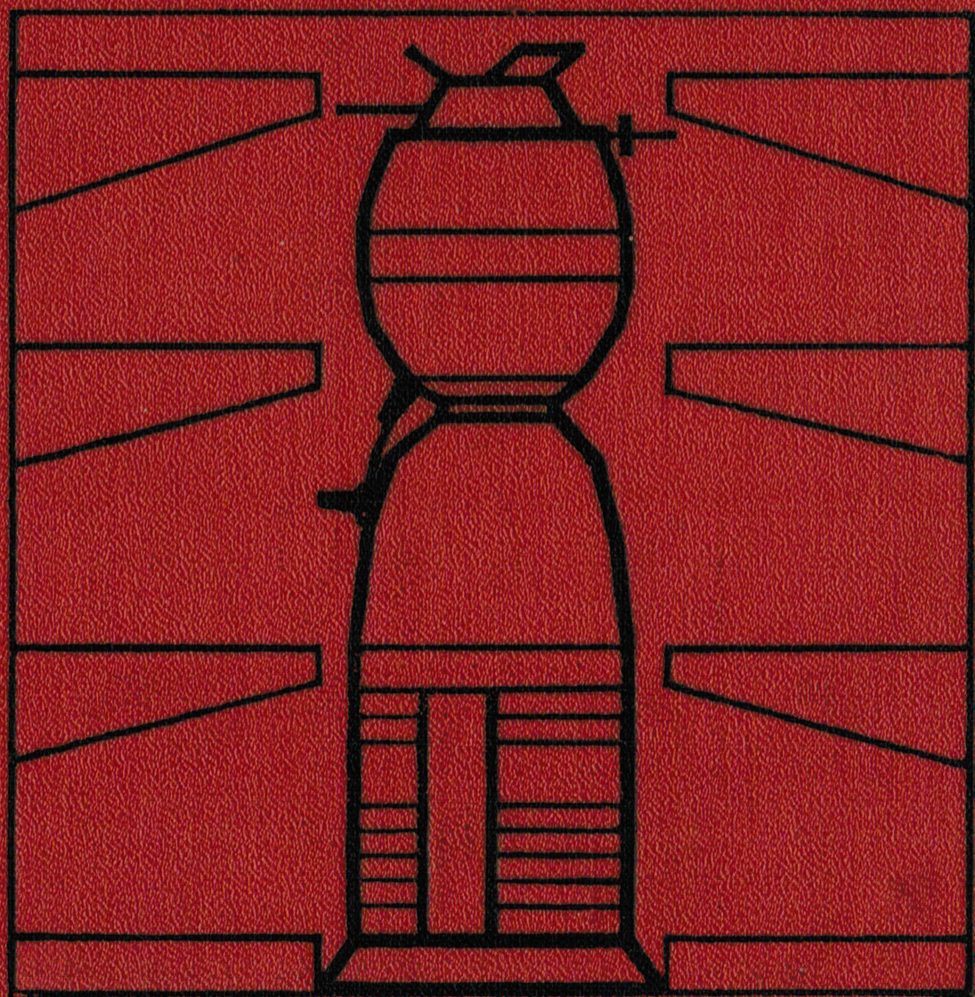


*В. С. Камалов*

# ПРОИЗВОДСТВО КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ



*В. С. Камалов*

# ПРОИЗВОДСТВО КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Допущено  
Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших технических  
учебных заведений



Москва · Машиностроение · 1982



ББК 39.62  
К18  
УДК 629.78(07)

Рецензенты: *Ю. Д. БОРИСОВ, И. А. ЗЕРНОВ*

**Камалов В. С.**  
К18 **Производство космических аппаратов. — М.:  
Машиностроение, 1982.— 280 с., ил.**

В пер.: 1 руб.

В книге изложены основы технологии производства космических аппаратов (КА), физическая сущность и технологические возможности процессов формообразования, обработки и соединения деталей, а также конструктивно-технологическая характеристика деталей, узлов и агрегатов КА и типовые процессы их изготовления, сборки и испытаний.

Книга предназначена для студентов вузов.

К 3607000000-407  
038(01)-82

По подписке КБ-48-48-81

**ББК.39.62**  
**6Т6**

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В решениях XXVI съезда КПСС и последующих пленумов ЦК КПСС уделяется большое внимание повышению эффективности производства, качества и надежности выпускаемых изделий, научной обоснованности и оптимизации принимаемых решений. Производство является конечным и главным этапом создания изделия. Именно здесь происходит окончательное конструктивно-технологическое и экономическое его формирование. Производство в значительной степени влияет на такие показатели изделия, как надежность, качество, себестоимость, соответствие эксплуатационным требованиям, уровню развития техники и др. Эти вопросы, важные для всех областей техники, особенно актуальны для ракетно-космической, отличающейся чрезвычайной сложностью и трудоемкостью производства, высокой стоимостью и частой сменяемостью объектов производства и т. д. Уровень производства, а также технический уровень выпускаемых изделий в большой степени определяются технологической подготовкой специалистов, работающих в области проектирования, конструирования и производства космических аппаратов (КА).

Учебное пособие написано для студентов конструкторских специальностей в соответствии с программой соответствующего курса, являющегося единственным курсом по технологии космических аппаратов, аналогичным курсу «Технология машиностроения» для общемашиностроительных специальностей. В книге не представлена часть курса, посвященная процессам формообразования и методам обработки и соединения, применяемым в производстве КА, а также не выделен в отдельный раздел вопрос о механизации и автоматизации технологических процессов, так как есть специальные работы по этому вопросу.

Первая часть книги посвящена научным основам технологии производства космических аппаратов.

Вторая часть посвящена конкретным технологическим процессам КА, изготовления и сборки типовых деталей и узлов, испытаний. Построение этой части пособия основано на предметном принципе (по объектам производства) в отличие от известного подхода к изложению подобных разделов по принципу заготовительных процессов.

Автор считает, что такое построение книги наиболее эффективно служит формированию технологической подготовки будущего специалиста — конструктора КА, которому при разработке конкретной детали или сборочной единицы необходимо учитывать все технологические особенности и условия производства данного типа объекта (детали или сборочной единицы). Книга является отражением опыта преподавания в течение многих лет курса технологии будущим конструкторам.

В учебное пособие автор не включал методики расчета отдель-



**ных технологических показателей, режимов, характеристик и подробных описаний отдельных приборов, установок и методик работы на них и т. д., так как этот материал можно найти в специальной литературе или в методических разработках.**

**В ряде случаев сделаны ссылки или приведены примеры из ракетного производства, что объясняется сходством по конструктивно-технологическим признакам ряда КА с ракетами.**

**Соответствие учебного пособия программе технологического курса должно способствовать внедрению новых методов обучения студентов, предусматривающих расширение самостоятельных работ отдельных разделов курса.**

**Автор приносит глубокую благодарность рецензентам д-ру техн. наук, проф. И. А. Зернову, канд. техн. наук, проф. Ю. Д. Борисову за все высказанные замечания и пожелания.**

**Автор с благодарностью примет любые замечания по содержанию книги, которые следует направлять по адресу: 107076, Москва, Стромынский пер., д. 4, издательство «Машиностроение».**

# ЧАСТЬ I

## Общие основы технологии производства космических аппаратов

### Глава 1. ОСОБЕННОСТИ И ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ КАК РАЗНОВИДНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

#### 1.1. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ — НАУКА О ПРОИЗВОДСТВЕ (ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ КУРСА)

Технология машиностроения, конкретной разновидностью которой является и технология производства космических аппаратов, — это наука о сущности процессов производства машин, о взаимосвязи и законах развития этих процессов. Она обладает всеми особенностями и признаками, присущими каждой науке: в технологии имеются свои определения, законы, правила, решаемые задачи, терминология, своя методология и т. д. Предметом технологии машиностроения являются процессы подготовки производства, изготовления, сборки и испытания машин, а также выявление объективных законов этих процессов, их взаимосвязи, развития и связи с конструкцией машин с тем, чтобы на основе этих законов строить наиболее рациональные, экономичные и эффективные процессы изготовления, сборки и испытания машин. Так как производство является конечной стадией материального процесса создания машины, то технология машиностроения в значительной степени диктует свои требования к конструкции изделий. В этом смысле можно говорить о конструктивно-технологическом формировании изделий как о едином процессе их создания. Это единство конструкции и технологии находит выражение и в их взаимосвязанном развитии: новые конструкции изделий вызывают появление новых методов их производства, т. е. развитие технологии, а новые технологические возможности обуславливают появление новых, более прогрессивных конструкций изделий, которые, в свою очередь, стимулируют еще более высокое развитие технологии. Это единое взаимосвязанное развитие конструкции машин и технологии производства составляет основу прогресса современной техники.

Исходя из вышеизложенного можно выделить две задачи технологии машиностроения: во-первых, разработка теории проектирования прогрессивных, научно обоснованных технологических процессов, методов и средств создания машин; во-вторых, разработка требований технологичности к создаваемым машинам, которые обеспечивают возможность применения в производстве наиболее эффективных и экономичных технологических процессов. Успешное решение этих взаимосвязанных задач в конечном счете определяет развитие техники.



Технология машиностроения, в том числе и технология производства КА, относится к тем наукам, которые основаны в значительной степени на синтезе различных естественных, социально-экономических и других наук и дисциплин. Используя, с одной стороны, достижения этих наук, она, с другой стороны, способствует их развитию. Однако это не означает, что технология машиностроения является результатом механического синтеза этих наук: синтезируя достижения разных наук, она изучает собственные, свойственные только ей, законы, зависимости и задачи, наряду с задачами, возникающими при синтезе отдельных наук в таком сложном многостороннем процессе, каким является производство машин. В этом плане можно говорить о технологии машиностроения как о методологической основе производства машин.

Исходя из объектов (предметов) производства, можно рассматривать отдельные, так называемые, предметные, или конкретные, технологии, например, технология самолетостроения, технология автотракторостроения, технология двигателестроения и т. д. К таким предметным технологиям относится и технология производства КА, или технология космического аппаратостроения, которая рассматривает применение общих законов технологии машиностроения в производстве КА. Естественно, что особенности конструкции объектов обуславливают и особенности их производства, но тем не менее общие закономерности и законы технологии машиностроения справедливы и в конкретных технологиях.

Технология производства летательных аппаратов среди других конкретных технологий занимает особое место и является наиболее высокоразвитой и прогрессивной отраслью общей технологии, что объясняется, во-первых, сложностью и новизной самих объектов производства — современных КА и ракет, что стимулирует более быстрое развитие технологии, во-вторых, в производстве КА находят широкое применение новые конструкционные материалы, методы и формы производства, для него характерна оснащенность наиболее прогрессивными и новыми средствами производства — все это обуславливает прогрессирующий характер развития технологии производства КА, а она в свою очередь способствует развитию общей технологии машиностроения.

Технология машиностроения относится к молодым наукам о производстве, она сейчас находится в стадии становления и в преддверии бурного развития, что объясняется усложнением производства и производимых машин, когда для выполнения новых задач требуется глубокое теоретическое и экспериментальное изучение законов производства, научное обоснование и оптимизация принимаемых конструктивно-технологических и технико-экономических решений.

В развитие технологии машиностроения как науки о производстве наибольший вклад внесли русские, особенно советские ученые. Основы технологии машиностроения еще в 30-е годы были заложены такими учеными, как А. И. Каширин, В. П. Соколовский и др. Современная технология машиностроения, как теория и практика

производства, развивается благодаря трудам таких ученых, как Э. А. Сател, А. Б. Яхин, В. М. Кован, Б. С. Балакшин, Н. А. Бородачев, А. Н. Малов, Н. Н. Рубцов, Г. А. Апарин, О. Е. Патон, Г. А. Николаев и значительного отряда современных ученых технологов, работающих как над разработкой отдельных теоретических вопросов, так и над развитием общих научных основ технологии машиностроения.

## **1.2. ПОНЯТИЕ О ПРОИЗВОДСТВЕННОМ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССАХ И ИХ ЭЛЕМЕНТАХ**

Совокупность всех действий людей и орудий производства, необходимых для изготовления КА и периодической плановой замены определенных сборочных единиц при дальнейшем хранении в течение установленного срока, называется производственным процессом космического завода.

Производственный процесс включает в себя технологическую подготовку производства (ТПП), материальное обеспечение, процесс получения заготовок, обработку деталей, сборку, контроль и испытания, транспортировку, хранение, периодическое плановое изготовление и замену некоторых сборочных единиц и агрегатов.

Изготовление основной продукции завода является основным процессом. Все остальные процессы, обеспечивающие его, называются вспомогательными. Сюда относятся изготовление приспособлений, инструментов, обеспечение различными материалами, снабжение, служба уборки, транспортировки и т. д.

Главной составляющей частью производственного процесса является технологический процесс. Технологическим процессом называется часть производственного процесса, содержащая действия по изменению и последующему определению состояния предмета производства, т. е. в общем случае это процесс преобразования исходных сырых материалов (заготовок, полуфабрикатов) в готовые изделия с контролем на каждом этапе.

Для обеспечения подобной переработки необходимо осуществить комплекс разнообразных физико-химических процессов, в результате которых изменяются размеры, форма, физико-механические и другие свойства заготовок и полуфабрикатов. Эти процессы осуществляются рабочими при помощи машин и инструментов (орудий труда). Таким образом, технологический процесс имеет двойственный, комплексный характер: с одной стороны — это физико-химический процесс, с другой — процесс труда человека.

Общий технологический процесс изготовления аппаратов складывается из частных, конкретных технологических процессов изготовления отдельных деталей, сборки отдельных сборочных единиц, агрегатов и всего аппарата, а также испытаний и контроля.

Технологический процесс сборки аппаратов складывается из технологических процессов сборки сборочных единиц (нервюр, шпангоутов, лонжеронов, панелей, камер сгорания, форсуночных головок, днищ и т. д.), агрегатов (отсеков, баков, двигателей, посадочных блоков, спускаемых аппаратов и т. д.) и общей сборки.



Сборочный процесс, являясь конечным этапом изготовления аппарата, имеет определяющее значение для всего производства завода. Это выражается в том, что применяемые физико-химические методы обработки деталей должны обеспечить технологические требования сборки и контроля в отношении точности форм, размеров, качества поверхностей, взаимозаменяемости, свойств материалов и т. д. А это, в свою очередь, обуславливает определенные требования к заготовкам, полуфабрикатам и комплектующему оборудованию и аппаратуре. Таким образом, требования к исходным заготовкам и полуфабрикатам в конечном счете определяются процессом сборки.

Технологический процесс имеет определенную структуру и состоит из отдельных элементов, каждый из которых характеризуется единством (постоянством) ряда факторов. Важнейшим элементом технологического процесса является операция.

Технологической операцией называется законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте. Это определение подразумевает постоянство трех факторов: рабочего места, заготовки (или группы деталей при сборке) и рабочего (или группы рабочих при сборке). Изменение какого-либо из этих трех факторов определяет новую операцию.

Различаются основные и вспомогательные операции. Основные — это те операции, которые связаны с изменением геометрических форм, размеров, внутренней структуры и свойств обрабатываемых объектов или изменением положения одних деталей по отношению к другим (применительно к сборочным операциям). К основным операциям, кроме формоизменяющих, относятся и термообработка, окраска, сушка, старение и т. д. К вспомогательным относятся операции контроля качества, комплектования, маркировки, складирования и т. д.

Технологическая операция состоит из ряда элементов.

Технологическим переходом называется законченная часть операции, характеризуемая постоянством применяемого инструмента и поверхностей, образуемых обработкой или соединяемых при сборке. Переход, таким образом, характеризуется постоянством пяти факторов (с учетом трех факторов, присущих операции).

Проходом называется часть перехода, связанная со снятием одного слоя металла, т. е. он имеет шесть постоянных факторов.

Приемом называется законченное действие рабочего, которое характеризуется своим частным целевым назначением и неизменностью участвующих материальных факторов, например, взять инструмент, установить инструмент на станке, взять ключ, закрепить инструмент, затянув гайки ключом, и т. д. Этот элемент операции весьма важен при нормировании работ.

Установ — часть технологической операции, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемых заготовок или собираемой сборочной единицы.

Позиция — фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной обрабатываемой заготовкой или собираемой сбороч-

ной единицей совместно с приспособлением относительно инструмента (траектории инструмента) или неподвижной части оборудования для выполнения определенной части операции. Этот элемент широко применяется при проектировании автоматных и агрегатных операций.

Для обеспечения четкого взаимодействия всех составляющих элементов технологического процесса последний предварительно разрабатывается и фиксируется в определенных документах.

### 1.3. ТИПЫ ПРОИЗВОДСТВА И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

Объем, содержание, степень разработки технологических процессов определяются производственными и организационными факторами и категориями, среди которых важнейшим является тип производства.

*Типом производства* называется классификационная категория производства, выделяемая по признакам широты номенклатуры, регулярности, стабильности и объема выпуска изделий. В производстве КА, как и вообще в машиностроении, различают три типа производства: единичное, серийное и массовое.

По ГОСТу 14.004—74 одной из основных характеристик типа производства является коэффициент закрепления операций  $k_{з.о.}$

Коэффициентом закрепления операций называется отношение числа всех различных технологических операций, подлежащих выполнению в течение месяца, к числу рабочих мест.

*Единичным* называется производство, характеризующееся широкой номенклатурой и малым объемом выпуска изготавливаемых изделий. Для него коэффициент закрепления операций имеет значение больше 40. Продукцией заводов единичного производства являются изделия, не имеющие широкого применения и изготавливаемые по индивидуальному заказу с отработкой каждой машины по специальным требованиям.

Характерными признаками единичного производства являются: неповторяемость производства данного изделия или повторяемость через неопределенные промежутки времени; преимущественное применение оборудования и оснастки универсального характера; расположение оборудования в цехах группами по типам; преимущественное применение стандартного или нормализованного рабочего и измерительного инструмента и стандартных методов контроля; наличие высококвалифицированных рабочих.

В единичном производстве технологические процессы детально не разрабатываются, они проектируются лишь до стадии маршрутной технологии, т. е. перечня операций в порядке их выполнения. Нормирование производится укрупненно по нормативным справочникам или на основании статистических данных подобных работ.

В производстве КА заводы единичного производства широко распространены.

*Серийным* называется производство, характеризующееся ограниченной номенклатурой изделий, изготавливаемых периодически пов-



торящимися партиями, и значительным объемом выпуска. В зависимости от количества изделий в серии или партии и значения коэффициента закрепления операций различают мелкосерийное, среднесерийное и крупносерийное производство. Коэффициент закрепления операций принимают равным: для мелкосерийного — свыше 20 до 40 включительно; для среднесерийного — свыше 10 до 20 включительно; для крупносерийного — свыше 1 до 10 включительно.

Организационные формы серийного производства зависят от величины объема выпуска изделий. При большой номенклатуре и незначительных объемах выпуска (мелкосерийное производство) они приближаются к формам единичного производства. При ограниченной номенклатуре и значительном объеме выпуска (крупносерийное производство) они приближаются к организационным формам массового производства.

Характерными признаками серийного производства являются цикличность производства, т. е. повторяемость изготовления отдельных изделий через планируемые промежутки времени, что отражается в планировании и организации производства; превышение количества операций над числом рабочих мест, что ограничивает возможность специализации рабочих мест и оборудования.

Серийное производство по сравнению с единичным имеет ряд экономических преимуществ и является более рентабельным: себестоимость изделий в серийном производстве значительно ниже, чем в единичном производстве, что объясняется снижением расходов на документацию, оснастку и снабжение, так как они раскладываются на значительное количество выпускаемых изделий, снижением расходов на заработную плату в связи с широким применением приспособлений и более низкой средней квалификацией рабочей силы, снижением расходов на материалы и полуфабрикаты в связи с регулярным их приобретением в значительных количествах и повышением коэффициента использования металла.

В серийном производстве технологические процессы разрабатываются в виде операционных технологических процессов с указанием переходов и режимов обработки. Такая подробная разработка технологических процессов, будучи экономически оправданной, позволяет значительно лучше организовать и повысить качество и эффективность производства.

*Массовым* называется производство, характеризующее узкой номенклатурой и большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых в течение продолжительного времени.

Коэффициент закрепления операций для массового производства принимают равным 1, т. е. на одном рабочем месте в течение длительного периода времени выполняется одна и та же операция, что позволяет максимально специализировать каждую операцию и в полной мере применять принципы научной организации труда (НОТ). Номенклатура изделий на заводах массового производства весьма ограничена и часто выражается в одном изделии.

Постоянство выполняемых операций обеспечивает расстановку оборудования в соответствии со следованием операций технологического процесса. Такая система массового производства получила название поточного производства; синхронизацией времени на каждой операции достигается его максимальная эффективность. Поточное производство создает условия для механизации межоперационной транспортировки деталей, что позволяет резко сократить межоперационные заделы. Дальнейшим развитием поточного производства является конвейерное и автоматизированное производство.

Для массового производства весьма характерным является применение узкоспециализированного оборудования и оснастки, специальных рабочих и контрольных инструментов, высокая механизация рабочих и вспомогательных процессов, применение рабочей силы низкой квалификации, вплоть до обученных операторов, применение специальных заготовок, близких по конфигурации к готовым деталям, что сокращает объем механической обработки и повышает коэффициент использования металла.

Большие первоначальные затраты на организацию массового производства незначительно отражаются на себестоимости изделий, вследствие распределения их на большое количество изделий. Массовое производство является самым рентабельным типом производства; себестоимость изделий массового производства минимальная по сравнению с другими типами производства.

Отметим, что в последние годы, учитывая высокую рентабельность и эффективность массового производства, разрабатываются особые методы организации производства (например, групповые методы обработки), которые позволяют в серийном и даже в мелкосерийном производстве применять организационные формы массового производства.

Технологические процессы для массового производства разрабатываются досконально, до приемов, с подробнейшей дифференциацией операций, что позволяет более точно, на научной основе, проводить нормирование труда.

В производстве КА часто встречается, так называемое, опытное производство, которое по своим организационным формам аналогично или близко к единичному производству. *Опытным* называется производство образцов, партий или серий изделий для проведения исследовательских работ или разработки конструкторской и технологической документации для установившегося производства. Опытное производство предусматривает последующий серийный или массовый выпуск изделий.

#### 1.4. ОСОБЕННОСТИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Особенности производства КА определяются, во-первых, особенностями их конструкции, во-вторых, специфическим характером их производства.

1. Современные КА и ракеты обладают весьма высокими параметрами работы: высокие температуры в камере сгорания и на по-

верхностях головных частей и спускаемых аппаратов, высокие давления, высокие скорости истечения горячих газов из камер сгорания, что оказывает сильное эрозионное действие на стенки, детали жидкостных двигательных установок работают в среде активных компонентов топлива и подвержены коррозионному действию. Напряженный режим работы двигателя и узлов аппаратов вызывает необходимость применения новых материалов со специальными свойствами (высокая прочность, коррозионная стойкость, антиэрозионные свойства, жаропрочность и т. д.), которые кроме высокой стоимости имеют низкую обрабатываемость, что объясняется их высокой прочностью, жаропрочностью, вязкостью, низкой теплопроводностью и другими свойствами, а также неизученностью их.

Применение новых материалов — характерная особенность ракетно-космической техники. Это обусловило развитие на заводах большого числа технологических лабораторий и тесную связь этих заводов с научно-исследовательскими институтами и вузами. Кроме этого, применение новых материалов обусловило модернизацию, а часто и создание новых типов оборудования и освоение новых технологических методов обработки, основанных на современных достижениях физики, химии, электротехники, электроники и других наук.

2. Другой особенностью современных КА и ракет является необычайная сложность и многодетальность, например число деталей даже для средних аппаратов доходит до десятка тысяч наименований. Характерной является также большая разнотипность агрегатов, узлов, аппаратуры, приборов, производство и сборку которых на одном заводе было бы невозможно осуществить технически и организационно, это нецелесообразно и с экономической точки зрения. Поэтому характерной особенностью космического производства является широкое кооперирование. Кооперирование предполагает наличие головного завода (базовое предприятие), на котором обычно изготавливается корпус аппарата, производятся агрегатная и общая сборки, испытания и сдача готового аппарата. На головном заводе должно происходить определение всех размеров, увязка их (разбивка теоретического плаза), хранение и выдача всей документации на производство деталей и узлов кооперирующимся предприятиям-поставщикам.

3. Развитие современной техники и смена объектов производства происходят быстрыми темпами и непрерывно, что особенно типично для ракетно-космической техники. Следовательно, и производство должно успевать осваивать и выпускать необходимое количество быстросменяющихся конструкций, для чего необходимо обеспечивать возможность быстрой переналадки его. Для этого необходимо применять быстропереналаживаемое оборудование, нормализованную оснастку, типовые технологические процессы и групповые методы обработки. С целью сокращения сроков подготовки производства, последнее по времени совмещают с периодом проектирования аппарата. Несмотря на все эти меры сокращение сроков технической подготовки производства КА остается до сих пор одной

из самых острых проблем, что вызвало необходимость изучения научных основ и разработки единой системы технологической подготовки производства.

4. Уменьшение массы летательных аппаратов является важнейшей проблемой. Уменьшение запасов прочности, облегчение конструкции во многих случаях обуславливает применение в КА и ракетах листовых элементов. Летательный аппарат представляет собой жесткую силовую конструкцию, состоящую из нежестких исходных элементов и обладающую, вместе с тем, сложными обводами и сопряжениями и достаточно крупными габаритными размерами, что в условиях широкой кооперации обуславливает совершенно отличное от других производств решение вопросов точности и взаимозаменяемости: применение особого метода производства, называемого плазово-шаблонным методом.

5. Применение листовых элементов в конструкции аппаратов отражается в производстве развитием цехов листовой холодной штамповки. Применение листовых конструкций обуславливает некоторые особенности и сборочных процессов: широкое развитие получили сборка клепкой, сваркой, пайкой, склеиванием, что отражается в структуре и оснащенности сборочных цехов.

6. К летательным аппаратам предъявляются очень высокие требования по надежности, обеспечение которых усложнено тем, что каждая выпускаемая машина не может быть проверена и испытана запуском. Поэтому высокая надежность КА обеспечивается системой имитационных испытаний на специальных стендах, в результате которых должны быть проверены все приборы и узлы, как в автономном, так и в комплексном действии. Необходимая высокая надежность обуславливает очень большой процент контрольно-испытательных работ в цикле производства и сборки: до 40% и более.

7. Миниатюризация оборудования и аппаратуры КА и высокая насыщенность и наполненность внутреннего пространства аппарата заставляют применять при сборке и монтаже приборных отсеков, аппаратуры, коммуникаций и разъемов макеты этих узлов и предварительно исследовать способы размещения всех элементов, что обуславливает высокую трудоемкость и увеличивает стоимость аппарата.

Эти и другие особенности производства КА обуславливают выделение его в отдельную отрасль машиностроения.

## **Глава 2. КАЧЕСТВО И НАДЕЖНОСТЬ АППАРАТОВ И МЕТОДЫ ИХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Качество изделия — совокупность свойств, определяющих его соответствие потребностям и требованиям, вытекающим из его назначения и условий производства. Уровень этого соответствия определяется совокупностью показателей, характеризующих эти

свойства: точности и качества поверхности, взаимозаменяемости, надежности, технологичности и экономичности, долговечности, технической эстетики, эргономики, патентной чистоты и т. д. Показатели качества могут быть единичными, комплексными и удельными. Определением номенклатуры показателей качества, а также их базовых значений и уровня (отношения действительных значений показателей к базовым) занимается научная дисциплина — квалиметрия.

В настоящее время разработана единая система управления качеством продукции, охватывающая как научные основы, так и организационно-технические и производственные принципы обеспечения качества. Эта система включает в себя единую систему аттестации качества продукции (ЕСАКП), которая оценивает уровень качества выпускаемых изделий в соответствии с тремя установленными категориями: высшей, первой и второй. Изделиям высшей категории присваивается Государственный знак качества сроком на 1 ... 3 года. Отметим, что многие комплектующие изделия КА также изготавливаются в соответствии с ЕСАКП.

Важнейшими конструктивно-технологическими факторами, определяющими качество изделия, являются взаимосвязанные между собой факторы: точность, качество поверхности, взаимозаменяемость, надежность изделий. Наряду со взаимосвязанностью эти факторы имеют большое самостоятельное значение в обеспечении качества, что и обусловило выделение их в отдельные проблемы общей технологии.

## 2.1. ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ

В изучении проблемы точности можно выделить четыре направления: конструкторское (установление необходимой точности исходя из условий правильного функционирования изделий); технологическое (технологические методы обеспечения заданной точности); метрологическое (методы и средства определения точности и разработка критериев оценки точности); организационно-экономическое (решение организационных и экономических задач обеспечения и контроля точности). Все эти направления взаимосвязаны и взаимозависимы.

Вопросы точности в технологии производства КА занимают большое место, так как, с одной стороны, многие детали, узлы и агрегаты должны изготавливаться и собираться с чрезвычайно высокой степенью точности (например, точность угловых размеров при сборке может достигать до нескольких минут, часто размеры должны соответствовать 1—2 классу точности, значения выходных параметров могут отличаться не более чем на  $\pm (0,01 \dots 0,05) \%$  от заданного номинального значения и т. д.), с другой стороны, заданная высокая степень надежности и точности, так же как и оснащенность уникальной аппаратурой и применение дефицитных материалов, обуславливают чрезвычайно высокую стоимость каждого аппарата.

Точность деталей — это степень соответствия действительных

значений геометрических, физических, химических, механических и других установленных параметров реальной детали значениям этих параметров, заданных номинально чертежом и техническими условиями.

При изготовлении и сборке в первую очередь стоит задача обеспечения точности геометрических параметров деталей, сборочных единиц и агрегатов, которая определяется, кроме точности соотношений (параллельность, соосность, перпендикулярность и т. д.), линейных и угловых размеров, также и степенью шероховатости поверхности; последняя ввиду большого влияния на многие эксплуатационные свойства деталей имеет самостоятельное значение и рассматривается отдельно.

В производственных условиях постановка и решение проблемы точности обработки выражаются в решении ряда технологических задач, связанных с различными категориями точности: 1) определение соответствия изготовленных деталей или изделий чертежам, техническим условиям и требованиям различными методами контроля, что связано с понятием заданной конструктором точности, определяемой допусками, и действительной точности, определяемой или вычисляемой после обработки; 2) прогнозирование точности, что связано с понятием расчетной (ожидаемой) точности, вычисляемой до обработки на основе различных методов расчета; 3) контроль и управление точностью в процессе производства, что связано с различными методами слежения за мгновенной точностью обработки; 4) определение расчетом границ поля допусков на различные размеры, что связано с проведением проектных расчетов различными методами (проектная точность) и некоторых других задач, встречающихся реже (например, определение процента исправимого брака, определение однородности технологического процесса и т. д.).

### 2.1.1. Погрешности и их причины

При оценке точности обычно говорят не о соответствии реальной и заданной деталей, а об их различии. Отступление параметров реальной детали от их номинальных, заданных чертежом значений называется погрешностью:  $\Delta = A_d - A_n$ , где  $\Delta$  — погрешность по данному параметру;  $A_d$  — действительное значение параметров;  $A_n$  — заданное номинальное значение параметра.

Одним из основополагающих исходных положений технологии машиностроения является положение о том, что она должна обеспечивать ту и только ту степень точности, которая задана конструктором. Исходя из этого проектируется технологический процесс обработки деталей, предусматривающий определенное количество и сочетание методов обработки каждой поверхности. Сущность и цель обработки каждой поверхности заключается в последовательном уточнении детали по заданному параметру до достижения заданной точности. Уточнением  $\epsilon$  называется отношение погрешности заготовки  $\Delta_{заг}$  к погрешности детали  $\Delta_{дет}$  (условимся называть объект,



Вид обработки	Шероховатость в зависимости от вида обработки (классы по ГОСТ 2789-73), мк														Среднеэкономические показатели точности по станд. СЭВ (ка. точн.)		
	Rz				Ra											Rs	
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14					
	80...40	40...20	20...10	2,5... 1,25	1,25... 0,63	0,63... 0,32	0,32... 0,16	0,16... 0,08	0,08... 0,04	0,04... 0,02	0,02... 0,01	0,01... 0,005	0,1... 0,05	0,05... 0,025			
Наружное точение	получистовое	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12...14 (5...7)		
	чистовое тонкое алмаз.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7...12 (2...5) 7 (2)		
Растачивание	получистовое	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12...14 (5...7)		
	чистовое тонкое алмаз.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12...14 (5...7) 7 (2)		
Подрезка торца	получистовая	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4...5		
	чистовая тонкая	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6...7 (1...2) 8...9 (3)		
Сверление	∅ < 15 мм	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11...14 (4...7)		
	∅ > 15 мм	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11...14 (4...7)		



Вид обработки		Шероховатость в зависимости от вида обработки (классы по ГОСТ 2780-73), мк														Среднеквадратичные отклонения по станд. СЭВ 144-75 (кл. точн.)
		Rz			Ra							Rs				
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
Прошваивание	чистовое	80...40	40...20	20...10	2,5... 1,25	1,25... 0,63	0,63... 0,32	0,32... 0,16	0,16... 0,08	0,08... 0,04	0,04... 0,02	0,1... 0,05	0,05... 0,025	7...9 (2...3) 7 (2)		
	тонкое															
Нарезание резьбы	наружное													7...9 (2...3)		
														6...7 (1...2) 8 (2...3)		
внутреннее	метчиком													6...7 (1...2)		
														9...7 (2...3) 7...9 (2...3)		
Обработка зубьев колес	строгание конч. колес													7...11 (2...4) 7...11 (2...4)		
														6...7 (1...2) 7...9 (2...3)		
Обработка зубьев колес	шлифование													7...11 (2...4) 7...11 (2...4)		
														6...7 (1...2) 7...9 (2...3)		
Обработка зубьев колес	шевингование													7...11 (2...4) 7...11 (2...4)		
														6...7 (1...2) 7...9 (2...3)		



Вид обработки	Шероховатость в зависимости от вида обработки (класс по ГОСТ 2783—73), мк													Среднеэкономические показатели точности по станд. СЭВ. 144—75 (кл. точн.)
	Rz			Ra						Rs				
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
	80...40	40...20	20...10	2,5... 1,25	1,25... 0,63	0,63... 0,32	0,32... 0,16	0,16... 0,08	0,08... 0,04	0,04... 0,02	0,1... 0,05	0,05... 0,025		
Хонингование	среднее						—	—	—	—	—	—	7 (2)	
	тонкое						—	—	—	—	—	—	6 (1)	
Суперфинишрование	чистовое						—	—	—	—	—	—	6 (1)	
	тонкое						—	—	—	—	—	—	6...5 (1)	
	двукратное						—	—	—	—	—	—	5...4 (1)	
Полирование	обычное						—	—	—	—	—	—	7 (2)	
	тонкое						—	—	—	—	—	—	6 (1)	
Калевка шариками	после сверления						—	—	—	—	—	—	7...9 (2...3)	
	после растачивания						—	—	—	—	—	—	7...9 (2...3)	
	после развертывания						—	—	—	—	—	—	7 (2)	

поступающий на обработку, заготовкой, а объект после обработки — деталью):  $\varepsilon = \Delta_{\text{зар}}/\Delta_{\text{дет}}$ .

Каждая обработка данной поверхности должна иметь уточнения больше 1. Если уточнение равно или меньше 1, то такая операция является излишней, т. е. каждая последующая операция технологического процесса должна обеспечивать более высокую точность исполнения, чем предыдущая. При проектировании технологических процессов и определении количества и методов обработки каждой поверхности детали целесообразно пользоваться таблицей экономической точности и шероховатости (табл. 1), которая показывает средние, достижимые экономически целесообразными способами, классы точности и шероховатости для различных методов обработки (сплошными линиями показаны надежно получающиеся значения шероховатости, пунктиром — предельно возможные). Такие таблицы — результат большого производственного опыта и исследовательских работ. Недостатком их является то, что в них указываются приближенные, средние значения точности без указания условий обработки, оказывающих большое влияние на получаемую точность. Отметим, что экономически целесообразная точность существенно отличается от достижимой данным методом обработки точности, соответствующей предельным возможностям данной операции.

Размер  $A$ , образующийся в результате выполнения операции и определяющий точность изделия, является функцией многих факторов обработки  $x_i$  (режимы обработки, характеристики операции, характеристики системы станок—приспособление—инструмент—деталь (СПИД), материалы, квалификация рабочих и т. д.):

$$A = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n). \quad (1)$$

Факторы обработки всегда реализуются с некоторыми отклонениями от заданных значений. Они называются первичными погрешностями. Первичные погрешности обуславливают появление в результате обработки погрешности  $\Delta A$  размера  $A$ , называемой операционной погрешностью:

$$A + \Delta A = f[(x_1 + \Delta x_1), (x_2 + \Delta x_2), (x_3 + \Delta x_3), \dots, (x_i + \Delta x_i), \dots, (x_n + \Delta x_n)]. \quad (2)$$

Считая первичные погрешности и операционную погрешность малыми приращениями соответствующих величин, можно получить, разложив выражение (2) в ряд Тейлора и ограничившись членами первого порядка, линейную зависимость  $\Delta A$  от  $\Delta x_i$ , предложенную академиком Н. Г. Бруевичем:

$$\Delta A = \sum \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i, \quad (3)$$

или, подставив

$$\partial f / \partial x_i = \xi_i \quad (4)$$

и упростив,

$$\Delta = \sum \xi_i \Delta_i. \quad (5)$$



Приведенная линейная зависимость позволяет решать многие практические задачи точности технологических процессов, необходимо только помнить, что она выражает лишь линейную часть погрешности. Коэффициенты  $\xi_i$  называются коэффициентами влияния или передаточными отношениями факторов  $x_i$ . Они являются постоянными характеристиками данной операции и зависят от механизма протекания процесса или механизма влияния данного фактора на размер  $A$ . Уравнение (5) обычно представляет собой алгебраическую или векторную сумму, так как коэффициенты влияния могут быть и отрицательными, а первичные погрешности в некоторых случаях представляют собой векторы.

Первичные погрешности, так же как и результирующие операционные погрешности, могут быть систематическими и случайными. Систематические погрешности делятся на постоянные, сохраняющие своё значение в процессе обработки, и переменные (закономерно изменяющиеся), которые в процессе обработки изменяются по определенному закону, определяемому механизмом действия рассматриваемого фактора. Систематические погрешности, обычно детерминированные, лежат в основе расчетно-аналитического подхода к прогнозированию точности, когда изучается механизм действия данного фактора с целью получения аналитических зависимостей для расчета погрешностей. Случайные погрешности, являющиеся результатом действия большого числа трудно учитываемых случайных факторов, лежат в основе вероятностного подхода к расчету ожидаемой точности.

Расчетно-аналитический метод изучения точности применяется при определении влияния одного или нескольких факторов на операционную погрешность. При определении влияния большого числа различных факторов, когда механизм действия некоторых из них даже не изучен, целесообразно применять вероятностный метод, учитывающий интегральное влияние всех факторов процесса. Однако для многих физико-химических методов формообразования и сборки основные причины появления систематических погрешностей от отдельных факторов изучены и получены аналитические зависимости для их расчета.

Для механической обработки, как наиболее распространенного метода формообразования и окончательной обработки, основными причинами (первичными погрешностями) появления систематических операционных погрешностей являются следующие: погрешности станка; погрешности изготовления инструмента и приспособлений; износ инструментов; неточности настройки станков и установки инструмента; деформации технологической системы СПИД; тепловые деформации станков, инструмента и детали; деформации под действием внутренних напряжений; погрешности измерительного инструмента и измерений; погрешности базирования и закрепления; ошибки исполнителя работ системы станок—рабочий и др.

*Погрешности станков* делятся на: а) геометрические погрешности (регламентируемые ГОСТом), зависящие от точности их изготовления, а также от изношенности и состояния станков; б) дина-

мические погрешности, проявляющиеся в процессе работы станка, под нагрузкой.

К геометрическим погрешностям можно отнести радиальные и торцовые биения шпинделей, прямолинейность и параллельность направляющих станин, параллельность осей шпинделей к направлению движения инструмента, извернутость вследствие износа станин, износ направляющих, погрешность (например, прогиб станин) от установки станков, зазоры в узлах станка и т. д. К динамическим погрешностям можно отнести деформации шпинделей, суппортов от усилий резания вследствие недостаточной их жесткости, деформации от инерционных нагрузок, вибрации, вызываемые механизмами работающего станка и т. д.

Необходимо учесть, что при расчете точности погрешности станков нужно суммировать векторно, приводя их к направлению, нормальному к обработанной поверхности.

*Погрешности изготовления инструмента* непосредственно влияют на точность обработки в случае обработки мерным инструментом (сверла, развертки, метчики, канавочные резцы, шпоночные фрезы и т. д.) и фасонным профильным инструментом (фасонные резцы, фрезы, шлифовальные круги и т. д.), так как их размеры с погрешностями непосредственно переносятся на деталь. Как мерные, так и немерные инструменты оказывают и косвенное влияние на точность при увеличении их износа, когда вследствие увеличения усилия резания увеличиваются деформации системы СПИД.

*Погрешности изготовления приспособления*, определяющие точность установки обрабатываемых деталей, влияют на точность обработки как геометрические первичные погрешности. При проектировании приспособлений необходимо предусматривать более высокую точность их, чем точность выполняемой операции.

*Износ инструмента* в процессе резания определяется так называемыми кривыми износа, определяющими зависимость величины износа от пути (времени) резания и имеющими три зоны: приработки (1 ... 3% пути), нормального износа (95 ... 99%) и катастрофического износа (менее 1%). Точность определяется обычно размерным износом инструмента — износом в направлении нормали к обработанной поверхности. Темп нормального износа до заданного критерия стойкости инструмента определяется удельным износом инструмента (износом, отнесенным к пути в 1000 м), зависящим от очень большого числа факторов и обычно для данных условий обработки определяемым экспериментально.

*Погрешность настройки станка* на размер может оказать существенное влияние на точность обработки.

Существуют два метода установки инструмента на размер: *пробных проходов* (пробных стружек), когда сам рабочий пробными проходами и промерами настраивает станок на размер, иногда пользуясь предварительной разметкой, и *автоматического получения размера*, когда наладчик предварительно настраивает инструмент на размер, базируясь на установочные поверхности станка или приспособления, а рабочий осуществляет только обработку.

Преимуществами метода пробных проходов являются: возможность получения достаточно высокой точности на неточном оборудовании, при неточных заготовках; он исключает влияние износа режущего инструмента на точность обработки; позволяет обойтись без различных, иногда сложных, приспособлений, что сокращает подготовку производства. Недостатками этого метода являются наличие субъективных ошибок рабочего при обработке различных деталей (пробная настройка повторяется для каждой детали), низкая производительность обработки, высокая себестоимость, потребность в рабочих высокой квалификации. Преимуществами автоматического получения размеров являются повышение точности обработки и снижение брака, повышение производительности обработки, часто снижение себестоимости, потребность в рабочих-операторах низкой квалификации. Недостатками этого метода являются длительность подготовки производства (разработка и изготовление оснастки), необходимость предварительной и периодической настройки оборудования, потребность в более точных заготовках, потребность в высококвалифицированных наладчиках. Первый метод применяется в единичном и мелкосерийном производстве, второй метод — в массовом и крупносерийном производстве. Погрешность настройки определяется в первом случае как систематическая погрешность при обработке одной данной детали, а во втором случае как систематическая погрешность при обработке партии деталей.

*Упругие деформации системы СПИД* являются одними из основных первичных погрешностей, влияющих на точность обработки. Каждый входящий в технологическую упругую систему, или систему СПИД, элемент обладает своей жесткостью, которая может характеризоваться коэффициентами жесткости  $j_{nm}$ , представляющими отношение усилия  $P_m$  некоторого направления  $m$  к перемещению  $\delta_n$  точки приложения силы (или другой точки) в том же или другом направлении  $n$

$$j_{nm} = P_m / \delta_n. \quad (6)$$

Технологическая система СПИД в целом характеризуется технологической жесткостью ( $J$ ) — отношением составляющей  $P_y$  усилия резания, направленной по нормали к обрабатываемой поверхности, к смещению лезвия инструмента относительно детали в том же направлении  $y$

$$J = P_y / y. \quad (7)$$

Заметим, что  $y$  является деформацией, образующейся под действием всех трех составляющих усилия резания, а не только составляющей  $P_y$ , что приводит к тому, что технологическая жесткость может быть положительной, отрицательной и бесконечно большой. В последнем случае в процессе резания суммарное влияние всех составляющих сил резания создает нулевое смещение вершины резца, т. е. точность обработки не изменяется. При отрицательной жесткости резец врезается в деталь. Величина, обратная жесткости, называется податливостью упругой системы  $\omega = 1/J$ .

Технологическая жесткость зависит не только от упругих свойств и жесткости элементов системы, но и от условий резания, влияющих в конечном счете на знак и величину деформации  $y$ .

Жесткость системы СПИД оказывает влияние на точность обработки, с одной стороны, через деформации системы, с другой — через возникающие вибрации системы.

В настоящее время жесткость системы СПИД определяется почти всегда экспериментально. При статическом методе с помощью динамометров ступенчато нагружают систему, а деформации фиксируются индикаторами, после чего строят кривые жесткости в координатах усилие — деформация. Такой метод чаще применяется для определения жесткости отдельных узлов станка и инструмента. При производственном (динамическом) методе определения жесткости всего станка производят обработку жесткой ступенчатой заготовки жестким инструментом. Уступ заготовки, принимаемый за  $\Delta_{\text{заг}}$ , копируется в процессе обработки и получается уступ детали  $\Delta_{\text{дет}}$ , отношение которых есть уточнение  $\varepsilon = \Delta_{\text{заг}}/\Delta_{\text{дет}}$ . Тогда жесткость станка подсчитывается по формуле:  $J_{\text{см}} = \lambda c_p s_0^{0,75} \varepsilon$ , где  $\lambda = P_y/P_z$ ;  $c_p$  — коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала и материала инструмента;  $s_0$  — подача на оборот детали.

Для уменьшения влияния жесткости системы СПИД на точность увеличивают жесткость отдельных звеньев системы СПИД, устанавливают дополнительные опоры для мало жестких звеньев в виде различных люнетов, кронштейнов, увеличивают массу вибрирующих звеньев, устанавливают виброгасители различного типа, изменяют геометрию режущего инструмента и режимы резания и т. д.

*Тепловые деформации* станков, инструмента и детали оказывают на точность обработки существенное влияние. Источниками тепла при механической обработке являются как зона резания, так и все трущиеся пары в конструкции станка (подшипники скольжения, подвижные соединения, электродвигатели, передачи и т. д.). Наиболее часто учитывают тепловые удлинения резцов, непосредственно влияющие на исполняемый размер. После достижения теплового баланса для данных условий обработки тепловые деформации инструмента учитываются как постоянные систематические погрешности. Часто при расчетах точности возникает необходимость учета тепловых деформаций детали, теоретическое определение которых весьма сложно, поэтому они уточняются экспериментально. Учет температурных деформаций особенно важен для мало жестких деталей при обработке с большими тепловыделениями. Не рекомендуется обрабатывать неостывшие заготовки.

Тепловые деформации инструмента и детали, главным образом, зависят от режимов резания и условий обработки, изменяя которые можно влиять на тепловыделение, например, применением смазочно-охлаждающих жидкостей и сред.

Тепловые деформации станков, возникающие вследствие нагрева как от внутренних теплоисточников конструкции станка, так и

от внешних (смазочно-охлаждающая жидкость, нагрев солнечными лучами и т. д.), протекают хотя и медленно, но длительно (в течение нескольких часов) и могут достигать довольно значительных величин. Определение тепловых деформаций станков обычно производится экспериментально. Тепловые погрешности станка учитывают как систематическую погрешность, приводя ее к направлению, нормальному к обрабатываемой поверхности.

*Деформации от действия внутренних напряжений* оказывают большое влияние на точность обработки, особенно маложестких деталей. Внутренними называются напряжения в материале детали, существующие при отсутствии внешних нагрузок. Особенностями их являются отсутствие какого-либо внешнего проявления, даже когда они могут достигать почти пределов прочности, взаимная уравновешенность их в напряженной детали, постепенное успокоение и исчезновение со временем с образованием значительных деформаций (коробления). Внутренние напряжения существенно влияют и на надежность: если не принять мер для их устранения, то погрешности от внутренних напряжений могут проявиться со временем в процессе эксплуатации изделия. Причиной внутренних напряжений является неравномерное охлаждение детали в процессах, связанных с сильным нагревом (литье, сварка, горячая штамповка и прокатка, термообработка и др.), сопровождающееся термическим или механическим торможением усадки материала, или неравномерное или поверхностное (местное) пластическое деформирование (наклеп) металла в таких процессах, как холодная штамповка, прокатка, волочение, холодная правка, резание и т. д.

Для уменьшения влияния внутренних напряжений на точность детали подвергают или естественному старению («вылеживание» заготовок после обдирки), когда внутренние напряжения постепенно успокаиваются, или искусственному старению (различные виды термообработки на снятие внутренних напряжений).

*Погрешность измерительного инструмента* и точность процесса измерения оказывают влияние на точность контроля размеров и соотношений и подробно рассматриваются в курсе метрологии. Отметим, что на точность измерений оказывает заметное влияние и шероховатость поверхности, когда заданная точность детали не увязана с требуемой шероховатостью.

*Погрешности базирования и закрепления*, а также неточности установки возникают при установке детали на станке или в различных приспособлениях. Погрешность базирования возникает при автоматическом получении размеров вследствие несовпадения установочной и измерительной (конструкторской) баз, как геометрическая погрешность предыдущей операции. Погрешность закрепления возникает вследствие деформации детали при закреплении. Погрешности неточности установки возникают при небрежной установке детали в приспособлении или на станке независимо от выбранной установочной базы и условий закрепления.

*Ошибки исполнителя*, имеющие субъективный характер, рассматриваются как случайные погрешности. Но в последнее время

они изучаются как ошибки в функционировании системы человек—машина и в некоторых случаях рассматриваются как систематические.

Рассмотренные систематические погрешности должны при определении операционной погрешности суммироваться геометрически и приводиться к направлению, нормальному к обрабатываемой поверхности. Кроме рассмотренных, могут быть и другие систематические погрешности.

### 2.1.2. Задачи, решаемые статистическим методом

Для изучения влияния на точность обработки всех первичных факторов, в том числе и тех, которые не выделены отдельно и механизм действия которых неизвестен, применяется статистический (вероятностный) метод анализа точности, в основе которого лежит подход к погрешностям как к независимым непрерывным случайным величинам. Математические основы и методика статистического подхода к расчету точности подробно изложены в специальной литературе [4, 11]. Кратко рассмотрим сущность этого метода.

Статистический метод с использованием кривых распределения погрешностей находит широкое применение в промышленности как для самостоятельных исследований точности различных технологических процессов (физико-химическая обработка, сборка, правка, термообработка и т. д.), так и для экспериментальной проверки результатов, полученных расчетно-аналитическим методом.

Расчеты точности технологических процессов так или иначе связаны с определением величины суммарной операционной погрешности. Можно отметить две различные постановки задачи точности: прямая задача заключается в том, чтобы по характеристикам первичных погрешностей и коэффициентам влияния рассчитать суммарную операционную погрешность и сравнить с заданным полем допуска (поверочный расчет); обратная — в определении по известным коэффициентам влияния и заданному допуску предельных допустимых значений первичных погрешностей, так чтобы получающаяся суммарная операционная погрешность была меньше заданного допуска.

Одной из распространенных задач статистического метода является определение предельного поля рассеивания размеров. Если задана кривая распределения погрешности, то вероятность попадания значения величины в симметричный интервал  $(-x_1, x_1)$  можно найти с помощью табличной функции Лапласа  $\Phi^*(x)$  (таблицу можно найти во многих справочниках и учебниках).

Если отложить от центра рассеивания  $x_0$  последовательные отрезки длиной  $\sigma$  (среднеквадратичное отклонение) в обе стороны и вычислить вероятность попадания величины  $x$  в каждый симметричный отрезок, то, как известно, вероятность попадания случайной величины за границы  $\pm 3\sigma$  (вероятность риска) будет равна 0,0027. Эта вероятность практически настолько мала, что интервал рассеивания случайной величины, равный  $3\sigma$ , называют практиче-



ским предельным полем рассеивания операционной погрешности:

$$\Delta_2 = 6\sigma.$$

Нижняя и верхняя границы поля рассеивания есть наименьшие и наибольшие значения погрешности. Величину полученной таким образом погрешности сравнивают с заданным значением допуска  $\pm \delta$ :

$$\Delta_2 \leq 2\delta.$$

Отметим, что чем меньше значение  $\sigma$ , тем точнее исследуемый процесс, т. е. тем меньше интервал  $\Delta_2$ , равный  $6\sigma$ .

Распространенной задачей является также определение центра группирования или центра рассеивания погрешности, которая равна математическому ожиданию  $M_x$ , или среднему арифметическому значению действительных размеров. Сравнивая полученное значение центра группирования с серединой поля допуска, заданной на чертеже, оценивают это смещение; оно должно быть равным нулю или наименьшим.

Существуют различные методы поверочного расчета: вероятностный метод по числовым характеристикам распределения первичных погрешностей: математическому ожиданию, средне-квадратичному отклонению, виду функции распределения операционной погрешности и значениям коэффициентов влияния  $\xi_i$ ; метод Н. А. Бородачева, когда в систему исходных данных вводятся специальные относительные коэффициенты, отражающие влияние на расчет отступлений от Гауссова распределения; известный метод максимума—минимума. Методики расчетов этими методами приведены в справочной литературе. Несмотря на достаточно широкое использование их в практике точностных расчетов, они носят приближенный характер: в первых двух методах нужно задавать функцию распределения операционной погрешности и коэффициенты влияния, что связано с большими расчетными и экспериментальными работами; третий метод дает завышенные результаты.

Методы проектного расчета, когда по заданному полю допуска на исполняемый размер необходимо назначить допустимые поля всех первичных погрешностей, основаны по существу на тех же зависимостях, что и методы поверочного расчета, поэтому имеют также приближенный характер. В настоящее время для уменьшения этих недостатков применяются различные математические методы (например, метод Монте-Карло для обоснования функции распределения, различные методы оптимизации, моделирования процессов обработки и т. д.), позволяющие успешно применять для расчетов ЭВМ, что увеличивает эффективность методов прогнозирования и расчета точности обработки статистическими методами.

Кроме расчетов суммарной погрешности обработки статистический метод используется также для сравнительного исследования различных технологических процессов методом получения кривых распределения и сравнения, например, величин  $\sigma$ ; для исследования точности процессов при применении тех или иных усовершенствований; для расчета процента брака при изготовлении (процент

риска) и других точностных задач. Важной особенностью метода кривых распределения является возможность выявления систематической погрешности процесса.

Статистический метод имеет ряд существенных недостатков, которые необходимо учитывать при назначении метода расчета точности: он не может выделить влияние отдельной погрешности; не определяет физической сущности и механизма влияния первичных факторов на точность обработки, более того, во многих случаях он даже не определяет этих факторов; используется или после обработки или требует проведения значительного числа (для набора статистики) предварительных экспериментов в идентичных условиях; не позволяет учитывать последовательность появления погрешностей, что бывает важно для фиксирования каких-то изменяющихся в процессе обработки факторов.

### 2.1.3. Методы контроля устойчивости технологических процессов

Устойчивостью (стабильностью) технологического процесса (или технологической операции) обычно называют способность его сохранять во времени первоначальную точность, признанную достаточной при проверке настройки. Это понятие введено в связи с тем, что с течением времени при обработке вследствие влияния различных, особенно закономерно изменяющихся факторов, точность технологического процесса может изменяться и оказаться ниже заданной. Для выявления этих изменений в процессе обработки производится контроль точности с целью принятия необходимых мер (новая подналадка, подналадка в процессе работы и т. д.). Контроль устойчивости процесса обработки называют иногда управлением точностью технологического процесса. В настоящее время существуют различные методы контроля устойчивости процессов обработки.

*Метод выборочного статистического контроля* находит достаточно широкое применение в промышленности, особенно в крупносерийном и массовом производстве. Сущность его состоит в том, что периодически из массы изготавливаемых деталей делается небольшая выборка, которая подвергается обмеру и статистической обработке — вычисляется ряд числовых характеристик: действительные размеры, погрешности, наибольший и наименьший размеры, средние значения их, относительные коэффициенты точности и стабильности технологических процессов, представляющие собой отношения действительных и номинальных значений характеристик, предельные значения которых заданы, и др.

*Метод точечных диаграмм* является еще более наглядным и действенным методом контроля устойчивости. При этом методе на диаграммной ленте по горизонтальной оси откладываются номера деталей в порядке их обработки  $n$ , а по вертикальной — значения измеряемого размера  $p$  (рис. 1, а). Для сокращения длины диаграммы иногда по горизонтальной оси откладываются номера групп

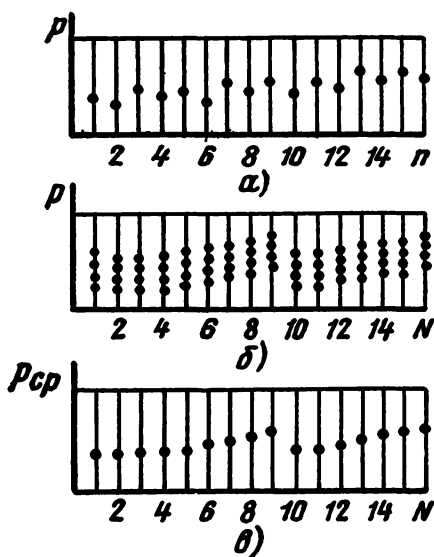


Рис. 1. Точечные диаграммы

вые статистические характеристики ( $x_{\text{ср}}$ ,  $\sigma_x$ ,  $x_{\text{max}}$ ,  $x_{\text{min}}$ , после рассеяния  $\Delta_x$  и т. д.), соединяя которые на диаграмме получают более объективные характеристики исследуемого процесса.

Точечные диаграммы составляются по результатам измерения не всех обработанных деталей, а периодических выборок, поэтому число контролеров при статистических методах контроля уменьшается.

**Метод активного контроля** (прямого) отличается еще большей степенью механизации и автоматизации управления точностью обработки и большей гибкостью и реакцией на появление погрешностей.

Сущность метода активного контроля заключается в постоянном контроле рассматриваемого размера в процессе обработки (например, контроль диаметра при круглом шлифовании) и в случае выхода размера за пределы допуска (например, вследствие износа шлифовального круга), автоматической подналадке системы (например, компенсирующей подаче шлифовального круга). В последние годы метод активного контроля, относящийся к методам сплошного контроля, находит значительное применение.

**Методы косвенного активного контроля** заключаются в том, что контролируемым параметром является не исполняемый размер, а один из первичных факторов, определяющий его, например глубина резания, усилие резания, положение инструмента относительно базовых поверхностей и т. д. Методы и средства активного контроля относятся к системам автоматического управления процессами обработки с обратной связью, отличаются достаточной сложностью и высокой стоимостью, поэтому их применение должно быть экономически обосновано.

деталей  $N$ , а по вертикальной оси — или сами размеры  $p$  (рис. 1, б) или средние арифметические значения размеров в группах  $p_{\text{ср}}$  (рис. 1, в). На диаграмме нанесены линии предельных значений отклонений размеров. По расположению точек измерений относительно линии допусков судят о настроенности оборудования. Преимуществами точечных диаграмм являются возможность учета последовательности обработки, появления и развития погрешностей (например, износа инструмента), определение момента необходимой подналадки оборудования.

Развитием этого метода является метод точностных диаграмм, когда для каждой группы измеряемых величин находят число-

Меры по повышению точности обработки направлены или на уменьшение первичных погрешностей, или на уменьшение коэффициентов влияния, или на уменьшение количества первичных погрешностей, влияющих на операционную погрешность.

### 2.1.4. Точность технологических процессов

С точки зрения достижения конечной точности исполняемых размеров или параметров, обеспечиваемых совокупностью операций технологического процесса, можно различать технологические процессы двух типов. В процессах первого типа окончательная точность обеспечивается только на последней операции и при правильно спроектированном технологическом процессе от операционных погрешностей предыдущих операций не зависит, а роль каждой предыдущей операции заключается в уточнении заготовки до определенной степени и подготовке к последующей операции, потому что финишная операция сразу после заготовительной невыполнима.

В технологических процессах второго типа погрешности предыдущих операций входят в конечную погрешность, она накапливается от операции к операции; подобное суммирование операционных погрешностей происходит в том случае, когда выполняемая в предыдущей операции поверхность принимается за базу в последующей операции, например, при сборке ряда деталей, когда суммируются размеры со своими погрешностями. В этом случае окончательную точность можно определить, используя методы расчета размеров цепей.

Размерной цепью называется замкнутая цепочка последовательных связанных размеров, относящихся к одной (при обработке) или нескольким (при сборке) деталям. Размерные цепи могут быть сложными и простыми, в зависимости от количества размеров (звеньев), плоскими или пространственными и т. д. Размерная цепь обычно содержит две ветви: основную и замыкающую. Звено, которое получается в процессе осуществления технологического процесса последним, называется замыкающим звеном. Отметим, что ряд звеньев может входить в несколько различных цепей. Основное исходное уравнение размерного анализа: погрешность замыкающего звена равна сумме погрешностей остальных звеньев цепи.

$$\delta_{\text{зам}} = \sum_{i=1}^{n-1} \delta_i,$$

где  $\delta_{\text{зам}}$  — величина допуска замыкающего звена;  $\delta_i$  — величина допуска  $i$ -го звена;  $n$  — количество звеньев цепи. В зависимости от того, к какой стадии процесса производства относится размерная цепь, она может быть операционной, поддетальной, сборочной или полной, объединяющей поддетальные и сборочные цепи [9]. Эти цепи позволяют на различных стадиях изготовления решать задачи о допусках на изготовление и сборку [7, 9]. При решении прямой задачи размерных цепей по допускам составляющих звеньев рассчитывают

допуск замыкающего звена; при решении обратной задачи по допуску замыкающего звена рассчитывают допуски составляющих звеньев. Наиболее распространенным методом решения является метод расчета на максимум — минимум, когда определяются предельные отклонения замыкающего звена.

Пути повышения окончательной точности при втором типе технологических процессов являются: уменьшение составляющих операционных погрешностей; выбор в качестве замыкающего звена с наибольшим значением допуска; уменьшение числа звеньев размерной цепи.

Помимо этих путей повышения точности технологических процессов второго типа, высокая конечная точность размерных цепей для сборочных процессов обеспечивается методами сборки — методами обеспечения взаимозаменяемости: полной; неполной или частичной; селективной и групповой сборки (подбора); пригонки; сборки с компенсаторами.

Метод полной взаимозаменяемости предусматривает изготовление всех размеров, входящих в размерную цепь, в полном соответствии с их расчетными значениями, без расширения полей допусков звеньев цепи, что обеспечивает взаимозаменяемость всех изготовленных деталей сборочной размерной цепи. Этот способ обеспечивает максимальную производительность на сборке, считается наиболее прогрессивным методом сборки, позволяет легко организовать поточную сборку, легко осуществлять изготовление запасных деталей и узлов; находит широкое применение в массовом и крупносерийном производстве.

Метод неполной (частичной) взаимозаменяемости заключается в том, что допуски на изготовление некоторых или всех звеньев размерной цепи расширяются по сравнению с расчетным значением, вследствие чего облегчается и удешевляется изготовление этих деталей, но в результате этого часть сочетаний деталей приводит к браку, т. е. конечная погрешность оказывается больше допуска. Процент неисправимого брака можно рассчитать вероятностными методами. Метод применяется в серийном и мелкосерийном производстве.

Метод селективной сборки заключается в том, что детали, размеры которых входят в цепь, сортируются по нескольким строго нумерованным группам, имеющим размеры в определенном заранее рассчитанном интервале. В сборке участвуют детали одноименных групп. Этот метод позволяет значительно расширить поля допусков первичных размеров (звеньев), но при сборке получить высокую конечную точность замыкающего звена. Метод более эффективен в серийном и массовом производстве при небольшом числе звеньев цепи.

Метод пригонки заключается в механической доработке одной из деталей при сборке, в результате чего обеспечивается заданная точность замыкающего звена. Дорабатываемая деталь называется компенсирующим звеном и имеет заранее предусмотренный припуск на доработку. Метод, несмотря на свою неэкономичность, и

потребность в высококвалифицированных рабочих, в мелкосерийном и единичном (опытном) производстве находит широкое применение, особенно для размерных цепей с большим количеством звеньев.

Метод сборки с компенсацией (или с регулированием) является развитием метода пригонки, т. е. окончательная точность замыкающего звена достигается или перемещением, или добавлением новой детали. В зависимости от способа изменения размера компенсирующего звена могут быть различные способы компенсации: удалением припуска (доработка); заполнением зазора (безусадочным цементом, полимерными материалами и т. д.); постановкой прокладок (втулок, шайб, пластин и т. д.) (рис. 2); упругим деформированием, когда менее жесткая деталь при сборке деформируется и присоединяется к более жесткой; перемещением деталей в необходимое положение и последующим закреплением, для чего установочные отверстия могут быть выполнены в виде овалов или пазов; постановкой компенсирующих регулируемых механизмов винтового, клинового или другого типа, обеспечивающих необходимую точность замыкающего звена и т. д. Все способы компенсации позволяют достигать высокой конечной точности сборки при изготовлении собираемых деталей с расширенными полями допусков. Применение компенсации обеспечивает поддержание необходимой точности соединения при эксплуатации.

Необходимо отметить, что приведенные рассуждения справедливы для операций любых типов: механическая обработка, сварка, электрофизическая или электрохимическая обработка и т. д. При расчетах точности изготовления нас интересуют независимо от типа операций получающиеся в данной операции погрешности и их влияние на рассчитываемую точность.

## 2.2. ПОНЯТИЕ О БАЗАХ И БАЗИРОВАНИИ

Выбор баз и способ базирования и установки при обработке оказывают существенное влияние на точность обработки, являясь источником специфических первичных погрешностей. Но выбор баз имеет в технологии и большое самостоятельное значение: технологический процесс с точки зрения базирования есть порядок смены баз, и каждая предыдущая обработка должна создавать базу обработки для последующих операций, что важно не только для обеспечения точности, но и для минимизации маршрута обработки, оснащенности и стоимости. Выбор базы и метода установки и закрепления является важнейшей частью проектирования операции и технологического процесса.

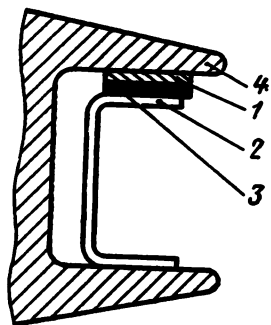


Рис. 2. Сборка с компенсацией прокладкой:

1—деталь; 2—сопрягаемый профиль; 3—прокладка; 4—приспособление

Установка заготовки состоит из двух последовательных и ясно выраженных этапов: базирования — ориентирования детали в заданном положении относительно станка или траектории инструмента; закрепления в этом положении заданным способом.

### 2.2.1. Виды установки заготовок

В зависимости от способа базирования различают три вида установки заготовок для обработки: с выверкой; по разметке; в приспособлении.

При установке с выверкой базирование заготовки производят на станке, выверяя положение заготовки относительно инструмента или края стола или выверяя биение медленно вращающейся заготовки в патроне по неподготовленным поверхностям. Этот вид установки имеет низкие производительность и точность, зависящие от квалификации рабочего и от применяемых измерительных средств. Преимуществом его является отсутствие каких-либо предварительных работ и минимальная подготовка производства. Метод распространен в единичном, опытном и мелкосерийном производстве.

При установке по разметке базирование производят, выверяя с помощью различных средств (чертилка, индикаторы) положение заготовки по заранее нанесенным на нее линиям и точкам, определяющим положение обрабатываемых поверхностей. Наличие этих линий существенно повышает точность и производительность базирования. Несмотря на очевидные недостатки этого вида установки: недостаточные производительность и точность, наличие дополнительной квалифицированной операции — он достаточно широко распространен в опытно-единичном, мелкосерийном и даже серийном производстве для обработки особенно крупных и сложных заготовок.

При установке деталей в приспособлениях, имеющих установочные поверхности, заранее согласованные с траекторией инструмента, базирование заготовки обеспечивается установкой заготовки на опорные поверхности, прижатием и закреплением ее в этом положении, однозначно определяемом самой конструкцией приспособления. Разметка и выверка не нужны. Производительность и точность базирования и установки наибольшие и зависят от точности приспособления. Этот вид установки широко применяется в массовом и серийном производстве, а также в мелкосерийном, особенно в случае применения переналаживаемых и универсально-сборных приспособлений (УСП), значительно уменьшающих такие недостатки этого вида установки, как длительная подготовка производства и значительные дополнительные затраты на оснастку.

### 2.2.2. Классификация баз и базирование

Базой называют поверхность или совокупность поверхностей, линий, точек детали или сборочной единицы, по отношению к которым определяется (задается) положение рассматриваемых по-

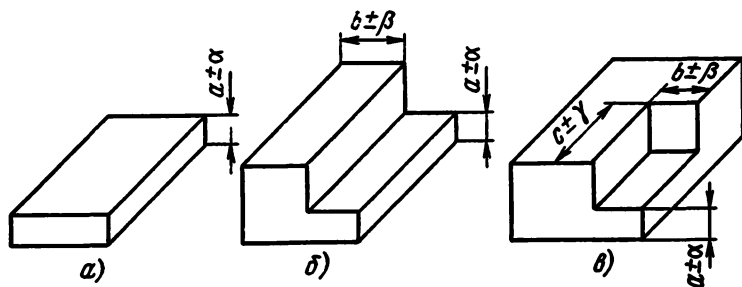


Рис. 3. Основной принцип базирования

верхностей, линий или точек. Базы связаны с рассматриваемыми элементами размерами и соотношениями, поэтому они взаимно обратимы.

По назначению базы подразделяются на конструкторские, технологические, измерительные. *Конструкторские* базы определяют положение детали в сборке и всех поверхностей в конструкции детали, могут быть сопрягаемыми и несопрягаемыми с другими деталями. В зависимости от этого требования к их изготовлению могут существенно различаться. *Технологическими* называются базы, используемые при изготовлении: они могут быть *установочными*, используемыми при установке — базировании заготовки, и *измерительными*, используемыми при измерении исполняемых размеров. При изготовлении и сборке часто не удается обеспечить совпадение конструкторских и технологических баз, что приводит к появлению дополнительной погрешности.

В процессе установки главным этапом является базирование заготовки. Для обеспечения однозначного базирования заготовки необходимо лишить ее всех шести степеней свободы шестью связями. Если каждую связь представить в виде точечной опоры, то они в трех плоскостях координат будут расположены следующим образом: в первой плоскости — три (не на одной линии), во второй — две, в третьей — одна. Это правило получило название «правила шести точек» и применяется при проектировании приспособлений. Правильно спроектированное приспособление можно привести к шести точечным опорам. Принцип однозначности базирования — важный принцип теории базирования. Однако с целью упрощения приспособлений иногда при базировании заготовку лишают лишь тех степеней свободы, которые влияют на размеры, выполняемые в данном приспособлении. Например, при обработке плоскости (рис. 3, а) заготовку можно лишить трех степеней свободы, при обработке ступени (2 размера) — пяти степеней свободы (рис. 3, б), при обработке паза (3 размера) — всех шести степеней свободы (рис. 3, в). Это означает, что остальные степени свободы можно или вообще не связывать, или же эти опорные поверхности изготовить менее точно. Этот принцип иногда называют основным принципом базирования.



### 2.2.3. Погрешности обработки, базирования, установки

Все погрешности возникают при обработке (сборке), и с этой точки зрения все они являются погрешностями обработки. Погрешность обработки состоит из погрешностей, вызванных различными причинами. Погрешности базирования и установки выделяются и изучаются отдельно.

Погрешность установки  $\Delta_{уст}$  возникает вследствие неточностей при установке заготовок. Она состоит из погрешности, вызванной неточностями процесса базирования заготовки (выверки, разметки, настройки и т. д.), которую назовем погрешностью неточности базирования  $\Delta_{нет}$ , и погрешности, вызванной деформациями или сдвигом при закреплении заготовки, которую назовем погрешностью закрепления  $\Delta_{зак}$ ; таким образом  $\Delta_{уст} = \Delta_{нет} + \Delta_{зак}$ .

При расчетах точности обработки эти погрешности нужно суммировать векторно. Обе они возникают во всех случаях и принципиально не могут быть равными нулю; появляются при выбранной базе и не зависят от ее выбора.

В отличие от погрешности установки погрешность базирования  $\Delta_{баз}$  связана только с выбором базы. Она возникает при нарушении принципа единства баз, под которым понимается требование принимать за технологическую базу поверхности, являющиеся конструкторскими базами, т. е. погрешность базирования обусловлена несовпадением установочной базы, по которой производится обработка, с базой, относительно которой проставлены размеры на чертеже. Погрешность базирования возникает только при методе автоматического получения размеров, при методе пробных проходов рабочих при настройке станка компенсирует погрешность базирования как таковую, а погрешность настройки есть  $\Delta_{нет}$  данной операции. Если технологическая база не совпадает с конструкторской (измерительной), то технологу приходится вводить новые размеры и рассчитывать допуски на них, а так как количество размеров в цепи увеличивается, то допуски заданных размеров распределяются между допусками новых размеров, вследствие чего новые допуски резко ужесточаются, что ведет к росту стоимости обработки или к невыполнимости операции. Например, при обработке плоскости  $CC'$  на размер  $a_{\pm\alpha}$  (рис. 4) при установке заготовки на плоскость  $BB'$  (конструкторская и технологическая базы совпадают) операционная погрешность, равная погрешности обработки, должна быть не более допуска  $\pm\alpha$  на размер  $a$ , т. е.  $\Delta_{оп} = \Delta_{обр} \leq 2\alpha$ . Погрешность размера  $b$  не участвует в получении плоскости  $CC'$ . При установке заготовки на плоскость  $AA'$  (конструкторская и технологическая базы не совпадают) в операционную погрешность исполняемого действительного размера  $a$  кроме погрешности обработки  $\Delta_{обр}$  войдет погрешность размера  $b$ , которая в предельном значении равна допуску  $\pm\beta$ , тогда  $\Delta_{оп} = \Delta_{обр} + 2\beta \leq 2\alpha$ , т. е. в получении плоскости  $CC'$  (размер  $a$ ) участвует погрешность размера  $b$ , возникшая на предыдущей операции при обработке поверхности  $BB'$  и участвующая в рассматриваемой операции как геометрическая, уже имеющаяся погрешность. Эта

погрешность, равная в пределе  $2\beta$ , и есть погрешность базирования. Она появилась в связи с нарушением принципа единства баз в случае автоматического получения размеров. Очевидно, что если  $\alpha \leq \beta$ , то обработка с базой по  $AA'$  недопустима. Если  $\alpha > \beta$ , то необходимо учесть, что погрешность обработки не может быть равна нулю. В этом случае придется ввести размер  $c$  между плоскостями  $AA'$  и  $CC'$  и провести перерасчет допусков, так как нас интересует точность размера  $a$ .

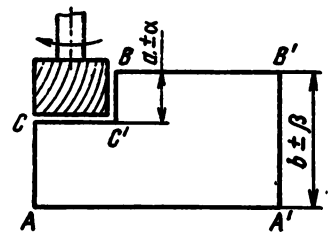


Рис. 4. Обработка заготовки по различным базам

При обработке цилиндрических поверхностей заготовки (рис. 5, а), когда необходимо обеспечить соосность поверхностей 1 и 2 с заданным допуском, может быть два варианта обработки. Первый вариант (рис. 5, б): вначале с базой по поверхности 3 обрабатывается поверхность 2, в следующей операции — по базе 3 обрабатывается поверхность 1; второй вариант (рис. 5, в): вначале также по базе 3 обрабатывается поверхность 2, а потом по базе 2 обрабатывается поверхность 1.

Учитывая, что в связи с заданным условием нас интересует соосность поверхностей 1 и 2 ( $\Delta_{1-2}$ ), получим для первого варианта изготовления  $\Delta_{1-2} = \Delta_{обр\ 3-2} + \Delta_{обр\ 3-1}$ , а для второго  $\Delta_{1-2} = \Delta_{обр\ 2-1}$ .

Если положить, что погрешности обработки одинаковы, то в первом случае погрешность  $\Delta_{1-2}$  будет в два раза больше. В этом случае  $\Delta_{обр\ 3-2}$  и есть погрешность базирования, как геометрическая погрешность с предыдущей операции, возникшая в данной операции вследствие неправильного выбора технологической базы.

Таким образом, погрешность базирования есть погрешность обработки предыдущей операции, в пределе равная допуску в предыдущей операции. В рассматриваемой операции она выступает как геометрическая погрешность. Если рассматривать технологический процесс в целом, то никаких погрешностей базирования нет, есть только погрешности обработки на каждой операции. Выбо-

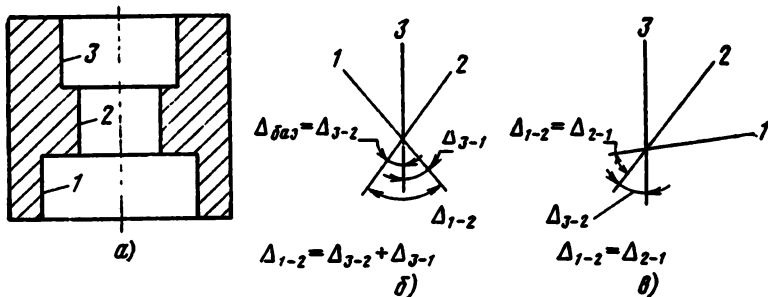


Рис. 5. Два варианта обработки цилиндрической заготовки

ром баз мы только перераспределяем эти погрешности между отдельными поверхностями. Часто при изготовлении бывает невозможно соблюсти принцип единства баз вследствие неудачного задания конструкторской базы, поэтому простановка размеров (выбор конструкторской системы координат) определяет технологичность конструкции, точность, надежность и качество аппарата.

#### 2.2.4. Выбор черновых и чистовых баз

Черновыми называются технологические базы, применяемые при черновой обработке. Базы, применяемые при обработке уже обработанных поверхностей, называются чистовыми.

Кроме принципа единства баз и положения, что каждая обработка создает базу для последующей обработки, есть ряд принципов и положений, которые необходимо учитывать при назначении черновых баз: 1) если деталь не обрабатывается кругом, то черновыми базами назначают те поверхности, которые остаются черными (необработанными), так как в этом случае они получают наименьшие смещения относительно обработанных поверхностей; 2) если деталь обрабатывается кругом, то черновыми базами назначают поверхности, имеющие наименьшие припуски, так как они будут обрабатываться по уже обработанным базам; 3) черновые базы могут употребляться только один раз, далее они должны заменяться на чистовые; 4) черновые базы должны быть по возможности ровными, чистыми, надежно и точно получаться в заготовках.

При выборе чистовых баз учитываются следующие положения: 1) соблюдать принцип единства баз, особенно при точной обработке; 2) за чистовые базы принимать только обработанные поверхности; 3) базы должны обеспечивать при закреплении и при обработке минимальные деформации заготовки; 4) необходимо стараться соблюсти принцип постоянства баз, который заключается в том, чтобы одни и те же поверхности обрабатывались от одних и тех же баз; каждая последующая обработка данной поверхности должна производиться от повторно обработанной базы: не рекомендуется применять чистовую базу дважды для уточняющей обработки одной и той же поверхности; 5) при точной обработке двух взаимосвязанных поверхностей рекомендуется попеременно обрабатывать их, принимая за базу другую поверхность (принцип перекидки баз); 6) при выборе чистовых баз необходимо учитывать стоимость, надежность и производительность оснастки.

В заключение отметим, что даже при правильно выбранных базах каждая переустановка заготовки вносит дополнительные погрешности и снижает точность обработки, поэтому, проектируя технологический процесс, необходимо стремиться к минимуму переустановок заготовок (минимум операций).

## 2.3.1. Общие понятия о качестве поверхности

Качество поверхности характеризует состояние обработанного поверхностного слоя и включает в себя как геометрические показатели поверхности (макрогеометрия, микрогеометрия, волнистость), так и физико-механические характеристики поверхностного слоя. Важность проблемы качества поверхности определяется тем, что в процессе работы детали наибольшие нагрузки приходится на поверхностные слои металла, они подвержены воздействию окружающей среды, и поверхностные слои в процессе изготовления претерпевают наибольшее воздействие формообразующих факторов, в результате чего они отличаются по физико-химическим характеристикам от основного металла.

Геометрическое состояние поверхности характеризуется следующими параметрами. *Макрогеометрия* определяется единичными отклонениями поверхности от теоретической (номинальной) формы, характеризующимися большим отношением длины шага их к высоте ( $L/H > 1000$ ). К таким отклонениям относятся овальность, конусность, бочкообразность и т. д. Их часто называют погрешностями формы.

*Волнистость* — совокупность периодически чередующихся возвышений и впадин с относительно большим шагом ( $L/H \approx 50 \dots 1000$ ). Причиной ее являются вибрации системы СПИД или другие периодические изменения в формообразующей системе.

*Микрогеометрия (шероховатость)* — совокупность микронеровностей с малыми шагами, образующих микрорельеф поверхности ( $L/H < 50$ ). Кроме высоты и формы микронеровностей на эксплуатационные свойства деталей может оказывать влияние и их направление.

Физико-механические свойства поверхностного слоя характеризуются такими показателями, как твердость, микротвердость, знак и величина остаточных напряжений, глубина наклепа, структурные и фазовые превращения в поверхностном слое, иногда изменение химического состава. Достижение приемлемых отклонений в физико-механических свойствах и необходимого состояния поверхностного слоя обеспечивается правильным построением технологического процесса, оптимизацией режимов обработки и контролем.

## 2.3.2. Методы и средства оценки шероховатости поверхности

В соответствии с ГОСТ 2789—73 установлено 14 классов шероховатости поверхности: 1-й класс соответствует самой грубой, а 14-й — самой гладкой поверхности. Классы с 6 по 14 дополнительно разделяются на три разряда. Стандарт предусматривает шесть количественных критериев для оценки шероховатости поверхности на базовой длине  $l$  (рис. 6).

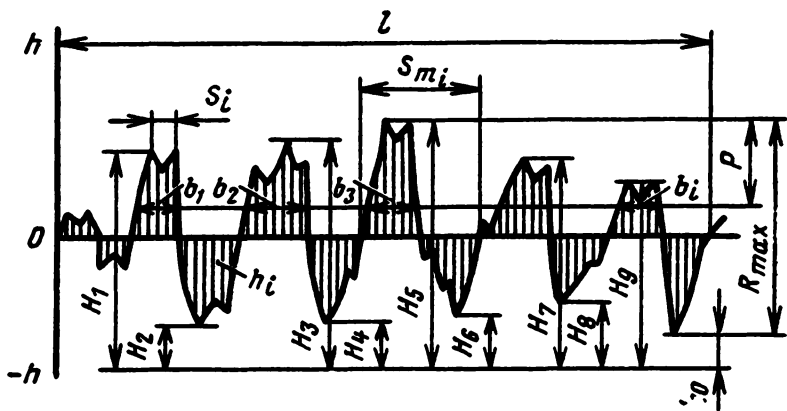


Рис. 6. Параметры шероховатости поверхности

Среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  определяется из абсолютных значений отклонения профиля  $h$  от средней линии:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |h| dx, \text{ или приближенно } R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_i|, \text{ где } n \text{ — число}$$

измеренных отклонений. Длина участка поверхности, на которой производится измерение шероховатости, называется базовой длиной  $l$ .

Высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$  — среднее расстояние между пятью высшими  $H_{\text{выст}}$  и пятью низшими  $H_{\text{вг}}$  точками профиля в пределах базовой длины

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 H_{\text{выст}} - \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 H_{\text{вг}}.$$

Наибольшая высота неровностей  $R_{\text{max}}$ .

Средний шаг неровностей  $S_m$  и средний шаг неровностей по вершинам  $S$  определяются как средние арифметические соответствующих шагов в пределах базовой длины

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi}; \quad S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i.$$

Относительная опорная длина профиля  $t_p$  — отношение опорной длины профиля  $\eta$  к базовой длине  $l$ :  $t_p = \eta/l$  100%, где  $\eta = \sum_{i=1}^n b_i$ .

ГОСТ регламентирует параметры  $R_a = 100 \dots 0,08$  мкм,  $R_z, R_{\text{max}} = 1600 \dots 0,25$  мкм,  $S_m, S = 12,5 \dots 0,002$  мкм,  $t_p = 10 \dots 90\%$ ,  $l = 0,01 \dots 25$  мм.

Стандарта на качество поверхности в целом пока нет. ГОСТ 2.309—73 регламентирует систему обозначений шероховатости поверхности.

Оценку шероховатости поверхности можно производить двумя основными методами: качественным и количественным. Качественный метод оценки шероховатости основан на сравнении оцениваемой поверхности с эталонами путем визуального их сопоставления, или сопоставления ощущений при ощупывании, или (для высоких классов) сопоставления результатов наблюдения под микроскопом или лупой. Выпускаются или изготавливаются самим предприятием наборы эталонов для различных материалов и видов обработки. Метод субъективен и не очень точен, хотя и применяется на практике.

Количественный метод оценки шероховатости заключается в измерении высоты микронеровностей с помощью различных приборов. Профилометры (Ч. Аббота, В. М. Киселева: КВ-7, КВ-6, КВ-4, КВ-7м, завода «Калибр», «Тейлор-Гобсон» и др.) основаны на принципе перемещения алмазной иглы и ощупывания ею микронеровностей поверхности, когда вертикальные колебания иглы индуцируют ЭДС, соответствующие значениям шероховатости. Они позволяют измерять шероховатость в пределах 5...12 класса. Профилографы (К. М. Аммона, Б. М. Левина: ИЗП-5, ИЗП-17, завода «Калибр», «Тейлор-Гобсон» и др.) также основаны на принципе ощупывания микронеровностей обработанной поверхности и применяются для записи микропрофиля поверхности в пределах заданной длины (трассы) в виде профилограмм (3...14 классы), для чего снабжены оптико-механическим или электромеханическим устройством. Ряд приборов является одновременно и профилографами и профилометрами.

В тех случаях, когда есть опасность повреждения обработанной поверхности алмазной иглой, можно применять оптические приборы. Двойной микроскоп (МИС-11) конструкции В. П. Линника основан на принципе светового сечения (освещения поверхности световым лучом под углом), измерения и фотографирования поверхности (3...9 классы).

Микроинтерферометры основаны на явлении интерференции света (13...14 классы) и позволяют или фотографировать, или наблюдать микронеровности, измеряя их с помощью окулярного микрометра. В производственных условиях находят применение профилометры и профилографы, остальные методы применяются при исследованиях.

Для определения шероховатости в труднодоступных местах применяют метод слепков поверхности, когда с помощью целлулоида, растворенного в ацетоне, получают слепок поверхности с микронеровностями и далее по слепку определяют высоту микронеровностей.

Шероховатость поверхности связана с точностью обработки: высоким классам точности соответствуют высокие классы шероховатости поверхности. Зависимость классов шероховатости от методов обработки приведена в табл. 1.

Волнистость поверхности стандартом пока не нормирована. Определение ее можно осуществлять на профилографах, имеющих

устройства для работы с большими трассами и иглы с большим радиусом закругления.

Физико-механические показатели поверхностного слоя также пока не нормированы ГОСТом. Разработано много методов определения отдельных характеристик поверхностного слоя (метод микрошлифов, косого среза, рентгеноструктурного анализа, электронографии, различные методы дефектоскопии, методы Н. Н. Давиденкова и Г. Закса определения величины внутренних напряжений и т. д.), которые позволяют получить объективную характеристику состояния качества обработанной поверхности.

### **2.3.3. Влияние качества поверхности на эксплуатационные свойства деталей**

Качество поверхности оказывает большое влияние на эксплуатационные характеристики деталей и всей конструкции аппарата. Оно определяет в значительной степени износостойкость поверхности, темп и равномерность износа, время приработки, проявление тех или иных механизмов износа, величину коэффициента трения, удержание смазки и т. д. Качество поверхности влияет на прочность деталей, особенно на усталостную; впадины микронеровностей часто являются концентраторами напряжений и местом зарождения и образования усталостных трещин. Наклеп и остаточные напряжения в зависимости от знака могут повышать и понижать усталостную прочность деталей. Влияние качества поверхности на прочностные характеристики и выносливость может быть и косвенным, например развитие коррозионных явлений во впадинах, усиливаемых расклинивающим действием поверхностно-активных веществ (ПАВ) из окружающей среды. Качество поверхности, особенно шероховатость и волнистость, весьма существенно влияют на контактную жесткость, определяя фактическую площадь контакта и контактные деформации.

Качество поверхности влияет и на другие, кроме рассмотренных, эксплуатационные характеристики конструкции (эрозионные свойства, отражательную и поглощательную способность, теплопроводность и герметичность стыков, сопротивление протеканию жидкостей и газов в трубопроводах, абляционные свойства и др.). Важность влияния состояния поверхности на качество и надежность конструкций вызвала развитие особого направления в технологии машиностроения — технологии специальных покрытий и методов поверхностного упрочнения деталей.

## **2.4. ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ В ПРОИЗВОДСТВЕ КА**

### **2.4.1. Понятие о взаимозаменяемости и ее обеспечении**

С целью обеспечения высокой эффективности производства детали и узлы, а также собранные агрегаты должны быть взаимозаменяемы. Общей, или функциональной, взаимозаменяемостью на-

зывается свойство одинаковых сборочных единиц заменять друг друга без дополнительной обработки и одинаково выполнять предназначенные в конструкции функции. Взаимозаменяемость включает в себя требования технологии, конструкции и эксплуатации, являясь комплексным понятием. Общую взаимозаменяемость можно подразделить в зависимости от рассматриваемых параметров конструкции на физическую и геометрическую.

Геометрическая взаимозаменяемость предполагает одинаковость (в пределах допуска) собираемых единиц по геометрическим формам и размерам. Физическая — одинаковость собираемых единиц по их физическим свойствам (весу, центровке, аэродинамическим характеристикам, прочностным свойствам, отражательной способности и т. д.).

Чем выше объем выпуска, тем выше должна быть степень взаимозаменяемости, являющейся основой массового и серийного производства.

Физическая взаимозаменяемость в производстве обеспечивается устойчивой системой испытаний и контроля физических параметров. Геометрическая взаимозаменяемость в ракетно-космической технике в зависимости от жесткости и сложности сборочных единиц обеспечивается двумя принципиально различными методами.

Для обеспечения взаимозаменяемости жестких деталей и узлов, устойчиво сохраняющих размеры и форму и не изменяющих их под действием собственного веса, не входящих в наружные аэродинамические обводы аппарата, применяется метод, принятый в общем машиностроении — единая система допусков и посадок, т. е. обеспечение точности размеров сопрягающихся деталей, указанной в чертежах, при независимом изготовлении их. Жесткость деталей позволяет обеспечить в этом случае точность увязки размеров сопрягающихся деталей.

Точностью увязки двух размеров  $a$  и  $b$  называется степень соответствия разности действительных размеров  $(a_d - b_d)$  разности их проектных значений  $(a_n - b_n)$ . Погрешность увязки  $\Delta_{ab}$  равна разности этих величин:  $\Delta_{ab} = (a_d - b_d) - (a_n - b_n) = (a_d - a_n) - (b_d - b_n) = \Delta_a - \Delta_b$ . Таким образом, точность увязки определяется точностью увязываемых размеров. Взаимозаменяемость обеспечивается увязкой (взаимным согласованием) размеров сопрягаемых деталей.

Общемашиностроительная система допусков и посадок с независимым изготовлением в производстве деталей, имеющих малую пространственную жесткость, большие габаритные размеры и сложные аэродинамические обводы, не может обеспечить требуемой взаимозаменяемости. Поэтому для обеспечения взаимозаменяемости подобных деталей, производство которых усложнено еще и широким кооперированием, приходится применять связанное изготовление этих деталей, используя специальные методы согласования размеров сопрягаемых деталей, так как прямой перенос размеров с чергежей на металл для таких деталей дает недопустимо боль-



шие погрешности. Такая система увязанного производства деталей и сборочных единиц называется плазово-шаблонным методом (ПШМ).

#### **2.4.2. Сущность плазово-шаблонного метода производства**

При ПШМ производства взаимозаменяемость сопрягаемых узлов, деталей и агрегатов обеспечивается на основе взаимной увязки их с инструментом и оснасткой с помощью жестких, плоских и пространственных носителей формы и размеров — шаблонов. Суть подобной увязки заключается в переносе размеров и форм методом совмещения с единого документа (плаза) на увязываемые объекты (инструмент, оснастка, заготовка, детали и т. д.). Комплекс работ, включающий вычерчивание общих видов агрегатов и деталей, выполнение увязки заготовительной и сборочной оснастки, контроль точности изготовления с помощью шаблонов совмещением, составляет существо плазово-шаблонного метода производства. При ПШМ проектирование изделия производится не только на бумаге, но и на плазе (специальной поверхности) в натуральную величину с большой точностью без простановки размеров. Перенос размеров в ПШМ осуществляется совмещением (без считывания и измерения размеров), потому что задание и измерение размеров, легко осуществляемое на жестких деталях, невозможно обычными методами на маложестких деталях крупных габаритов со сложными обводами.

ПШМ дает возможность сократить время конструкторской и технологической подготовки производства, упрощает документацию и резко сокращает количество чертежей в производстве, устраняет измерение размеров в производстве, сводит к минимуму объем разметочных и пригоночных работ, обеспечивая взаимозаменяемость указанных выше деталей.

#### **2.4.3. Плазы и методы их разбивки**

Плазом называется чертеж на специально подготовленной поверхности в натуральную величину теоретических контуров и конструкции аппарата. Вычерчивание плазов называют его разбивкой. Плазы разбивают на аппараты, агрегаты, узлы и детали на основании теоретического чертежа (общего вида изделия, вычерченного на бумаге в масштабе 1 : 10 или 1 : 20 с указанием входящих агрегатов и габаритных размеров) и таблицы координат теоретического обвода изделия, получаемой после продувок или задаваемой конструктором.

Для уменьшения накопления ошибок при разбивке плаза соблюдают следующие условия: 1) при разбивке симметричных обводов изображают только одну их половину; 2) все разбивки плаза изображают в натуральную величину; 3) каждый размер на измерительном инструменте устанавливают только один раз, и этот

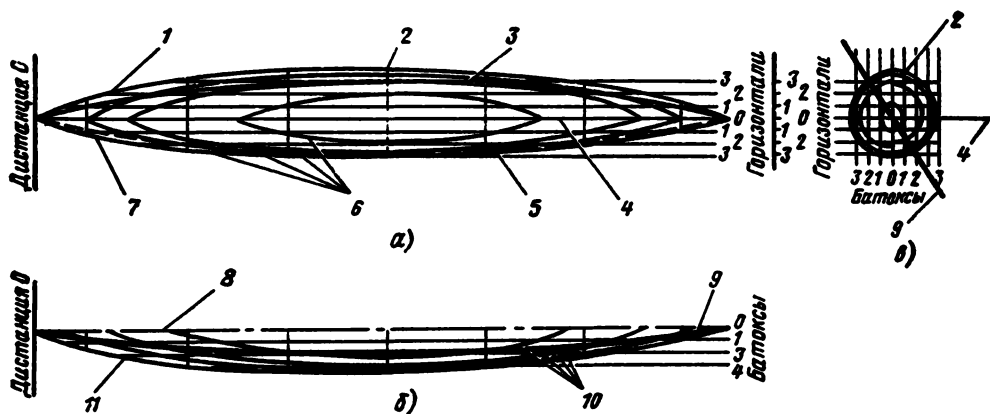


Рис. 7. План изделия:

1—батокс 0 (верхний); 2—миделево сечение; 3—рыбина верхняя; 4—строительная горизонталь; 5—рыбина нижняя; 6—линии батоксов; 7—батокс 0 (нижний); 8—главная конструкторская база (ось симметрии); 9—рыбина; 10—линии горизонталей; 11—полуширота

размер откладывают на всех проекциях; 4) плазовую разбивку теоретических обводов производят в трех проекциях; 5) проекции обводов при разбивке обязательно увязывают.

Увязкой плаза называется согласование координат обвода в трех проекциях с заданной точностью.

**Терминология ПШМ.** *Контурная линия* (теоретическая линия) — линия взаимного пересечения внешних или внутренних поверхностей детали. *Бок* (рис. 7, а) — боковая проекция — след пересечения обвода изделия вертикальной плоскостью, проходящей через ось изделия. *Полуширота* (рис. 7, б) — след пересечения обвода изделия горизонтальной плоскостью, проходящей через ту же ось изделия. *Элюра* (рис. 7, в) — плаз совмещенных сечений — проекция поперечных сечений корпуса на плоскость миделева сечения (плоскость наибольшего поперечного сечения изделия). Обводы вычерчиваются по одну сторону от оси симметрии. С одной стороны от крайнего носового шпангоута до миделева сечения, с другой стороны от миделева сечения до крайнего хвостового шпангоута. *Горизонталь* — след сечения обвода изделия горизонтальной плоскостью. *Батокс* — след сечения обвода изделия вертикальной плоскостью. *Рыбина* — след сечения обвода изделия произвольной наклонной плоскостью, различают верхнюю и нижнюю рыбины. *Дистанция* — расстояние от начала отсчета до заданного сечения. *Малка* (рис. 8) — угол между нормалью 2 к плоскости детали 1 и наружной плоскостью борта детали 3. Малки обозначаются буквой *M* и измеряются в градусах. Малки бывают нулевые ( $M=0$ ), открытые ( $+M$ ) и закрытые ( $-M$ ).

*Схема применяемости шаблонов* — технологический документ, показывающий по каким сечениям изделия потребуются шаблоны в процессе изготовления изделия. *Координатные оси и конструктив-*

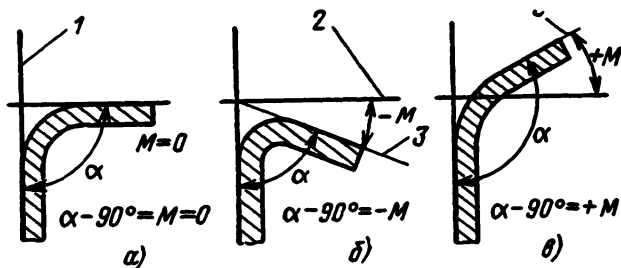


Рис. 8. Малки:

а—нулевая; б—закрытая; в—открытая; 1—плоскость детали; 2—нормаль к плоскости детали; 3—плоскость борта

**ные базовые линии** — линии, от которых производят отсчеты размеров. Базовыми линиями служат оси симметрии, хорды. **Строительная горизонталь** — след пересечения двух взаимно-перпендикулярных плоскостей продольных сечений изделия, из которых одна является плоскостью симметрии.

**Виды плазов.** Плазы делят по назначению, размерам, материалу. По назначению различают теоретические и конструктивные плазы.

**Теоретический** — плаз, на котором нанесены координатные и конструктивные оси, а также выполнен чертеж агрегата или аппарата в натуральную величину. На нем производится увязка теоретических обводов агрегатов в разных проекциях на основе геометрических построений. Разметка обводов агрегатов на теоретическом плазе производится по данным таблицы теоретических обводов, составляемой при эскизном проектировании аппарата по данным аэродинамических продувок.

**Конструктивный** — плаз, на котором нанесены координатные и конструктивные оси, теоретический контур узла и конструктивный чертеж данного узла с входящими в него деталями в натуральную величину. Конструктивный плаз служит для геометрической и конструктивной увязки деталей, входящих в данный узел, для получения шаблонов и для контроля обводов шаблонов; создается на основе теоретического плаза и сборочных чертежей и может состоять из нескольких частей (панелей).

По размерам плазы разделяются на переносные и стационарные. **Переносные плазы** выполняют на металлических панелях. **Стационарные плазы** применяют для плазовой разбивки аппаратов больших размеров. Их разделяют на разборные и неразборные. Разборные плазы представляют собой ряд состыкованных панелей, установленных на специальных столах. Они более удобны при дублировании плазовых разбивок, при хранении и транспортировке.

По материалу плазы разделяются на металлические, деревянные и плазы из пластиков. **Металлические плазы** выполняют из листового дуралюмина (3...6 мм); поверхность листа анодируют, грунтуют и покрывают нитроэмалью АГТ-7 или хлорвиниловой эмалью. В углах сверлят отверстия под установочные шпильки для

фиксации листов на плазовом столе. На металлических плазах хорошо сохраняются размеры, достигается большая точность, наносятся линии постоянной толщины до 0,1 мм; они легко собираются, разбираются и транспортируются. *Деревянные плазы*, выполненные в виде панели, изготовляют из высококачественной авиационной фанеры (10 ... 12 мм). Поверхность фанерного листа зачищают, покрывают олифой и слоем нитроэмали ДМ. Деревянные плазы применяют редко из-за быстрой загрязняемости, коробления, неотчетливости линий чертежа и потери точности со временем. *Плазы из пластика* (винипроз, астролон и др.) — прозрачные, в виде тонкого листа толщиной 0,3 мм. Одна сторона листа матовая, другая — глянцевая; плазовую разбивку производят на матовой стороне. С плазов из пластика легко получать плазы-дублеры и переносить теоретические обводы и конструктивную разбивку на заготовки для шаблонов методом фотоконтактного копирования. Недостатками плазов из пластика являются большая хрупкость, большой коэффициент линейного расширения (в 2 раза больше, чем у дуралюмина).

**Инструмент для разбивки плаза.** *Струна* — стальная проволока, сильно натянутая между двумя зажимами, для разбивки длинных прямых линий. *Линеал* — стальная линейка длиной от 1 до 5 м для вычерчивания прямых линий. *КЛ* — *контрольная линейка* для точного отсчета и контроля размеров; изготавливается из латуни, имеет шкалы с ценой деления 1 и 0,2 мм, две передвижные лупы. *Специальный микроскоп* с окулярной шкалой для контроля толщины линий. *Рулетка металлическая* с пружинным динамометром для измерения на плазе длинных отрезков. *Рейки* применяют для вычерчивания различных кривых, изготавливаются они из дерева или оргстекла. Сечения реек — 4×4, 5×5, 6×6, 5×10, иногда переменного сечения, длина до 5 м и более. *Крицы* — литые металлические грузы весом 2 кг для прижима реек к плазу. Кроме этого, при разбивке плазов применяются *перпендикулярник* для проведения линий, перпендикулярных к контуру обводов, *эллипсограф*, *координатограф* для механизации разметки координат на плазах и шаблонах, различные *штангенциркули* без делений, *чертежный инструмент*, *угломеры* и т. д.

**Разбивка плазов.** После подготовки поверхности плаза на нее наносится координатная сетка, после чего сверлятся базовые и плазово-кондукторные отверстия. *Базовые отверстия* служат для последующей проверки по плазам шаблонов. *Плазово-кондукторные отверстия* обеспечивают точную стыковку отдельных панелей разборного плаза. Разметка координатной сетки и сверление отверстий в плазе производится с помощью плаза-кондуктора.

*Плаз-кондуктор* (рис. 9) представляет собой плоскую систему прямоугольных координат, состоящую из продольных и поперечных линеек, смонтированных на специальном столе. Стол плаза-кондуктора — массивная чугунная плита, установленная на домкратах, по обеим сторонам которой установлены продольные линейки, имеющие отверстия на расстоянии 50 мм. К ним прикрепляются поперечные кондукторные линейки, имеющие такие же отверстия. На

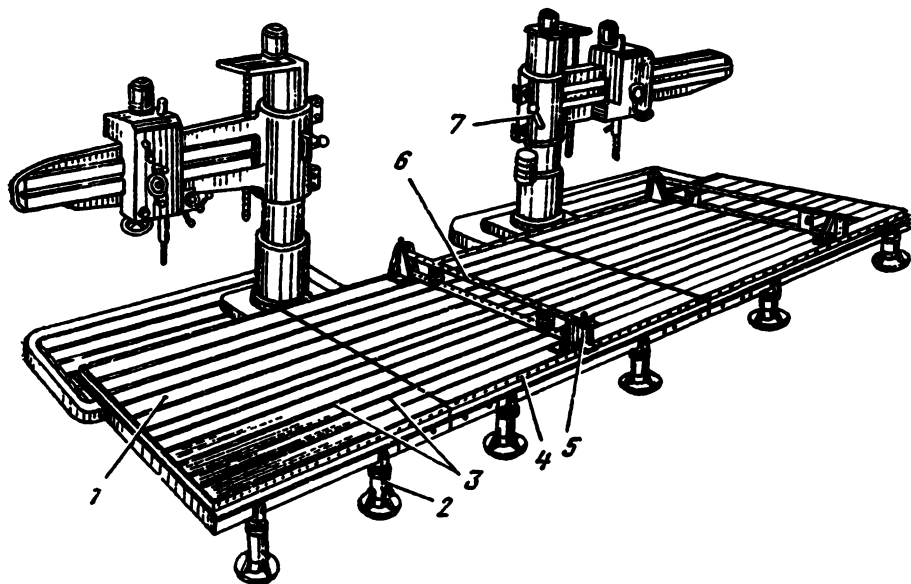


Рис. 9. Плазм-кондуктор:

1—плита; 2—домкрат; 3—продольные линейки с отверстиями; 4—продольные неподвижные линейки; 5—фиксатор; 6—кондукторная линейка; 7—радиально-сверлильный станок

кондукторные линейки с помощью фиксаторов устанавливаются в необходимом положении продольные разметочные линейки.

Для сверления базовых, плазово-кондукторных и других отверстий применяются специальные радиально-сверлильные станки, устанавливаемые рядом с плазом-кондуктором.

Разметка плаза производится в соответствии с *монтажной схемой*, вычерчиваемой на бумаге и имеющей координатные и конструктивные оси, плазово-кондукторные и базовые отверстия.

В первую очередь на панелях плаза по специальному кондуктору сверлят плазово-кондукторные отверстия, расстояния между которыми кратны 50. Панель плаза устанавливается на прокладках на кондукторные линейки стола. Отверстия в кондукторных линейках и плазово-кондукторные отверстия на панели совмещаются и фиксируются для предотвращения смещений панелей. Далее сверлятся базовые отверстия и наносятся с помощью разметочных линеек координатные и конструктивные оси. После этого приступают к вычерчиванию чертежа агрегата. Различают агрегаты с обводами одинарной кривизны (с прямолинейными образующими) и агрегаты с обводами двойной кривизны (с криволинейными образующими).

**Построение теоретических обводов агрегатов с прямолинейными образующими.** Этот метод чаще всего применяют при построении теоретических обводов на плазах агрегатов типа корпусов или крыльев. Порядок построения следующий (рис. 10). На заданном расстоянии  $L$  строим линии хорд корневой и концевой нервюры. Из

точки  $A_0$  до пересечения с линией хорд концевой нервюры в точке  $B_0$  проводим линию хорд заданным углом  $\alpha$ . Из точек  $A_0$  и  $B_0$  откладываем соответствующие длины хорд (точки  $A_k$  и  $B_k$ ). На хордах по данным таблиц координат наносим точки  $X_i$  в % от длины каждой хорды, через эти точки ( $A_i$  и  $B_i$ ) проводим горизонтальные вспомогательные линии, на которых откладываем значения  $Y_{кор i}^в$  и  $Y_{кон i}^в$  (вправо от оси) и  $Y_{кор i}^н$  и  $Y_{кон i}^н$  (влево от оси). По этим точкам строим с помощью реек обводы корневой и концевой нервюр. Соединяем точки  $A_i$  и  $B_i$  и наносим хорды промежуточных нервюр. В точках  $C_i$  промежуточной нервюры проводим горизонтальные вспомогательные линии. Из точек  $A_i$  и  $B_i$  как из центров проводим дуги до пересечения с хордами (точки  $m_i$ ,  $n_i$ ); соединяя  $m_i$  и  $n_i$ , получаем на промежуточной хорде точки  $k_i$ . Радиусом  $C_i k_i$  проводим дугу до пересечения с горизонтальной линией в точке  $S_{C_i}$ , которая и является координатой промежуточной нервюры. Аналогичным образом строятся все точки  $S_i$  и  $T_i$  всех промежуточных нервюр. Эти точки соединяем плавными линиями с помощью реек и получаем обводы всех промежуточных нервюр, при этом ряд точек (полученных построением) может выпасть.

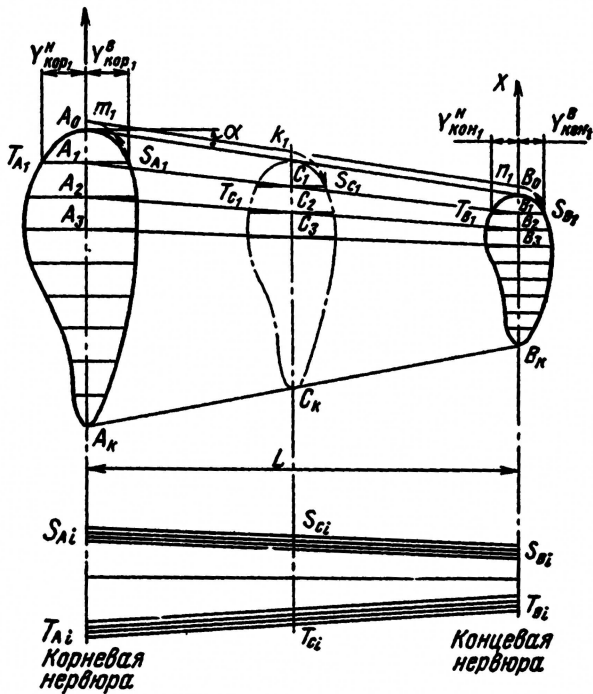


Рис. 10. Разбивка плаза агрегата с обводами одинарной кривизны

В некоторых случаях требуется более точная увязка точек контура обвода всех нервюр. Увязка проводится на второй проекции, куда сносятся все точки обвода  $S_{ji}$  и  $T_{ji}$ . Соединяя одноименные и одномерные точки, мы должны получить прямые, при этом некоторые точки могут выпасть, т. е. образуются новые значения  $Y_{ji}$  (точки  $S_{ji}$  и  $T_{ji}$ ). Эти точки переносятся на верхнюю проекцию и соединяются плавными кривыми. Такое последовательное приближение можно проводить несколько раз, повышая точность увязки. Иногда эти проекции совмещают, проводя увязку на поле построения.

После увязки и контроля правильности построения окончательные обводы нервюр обводятся более жирными линиями или вырезаются и заливаются тушью или специальным составом. Координаты окончательных обводов оформляют в плазовые таблицы.

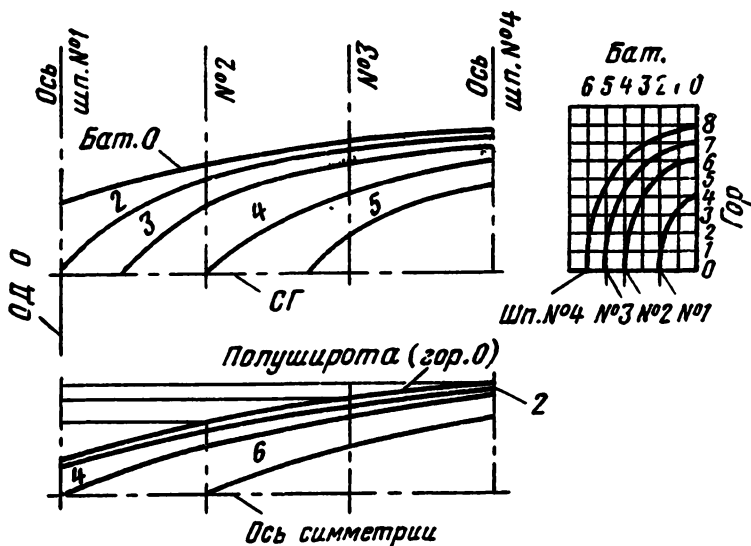


Рис. 11. Разбивка плаза методом батоксов и горизонталей

**Построение теоретических обводов агрегатов с криволинейными образующими.** Теоретические обводы агрегатов с криволинейными образующими можно строить двумя разными методами (имеющими, в свою очередь, некоторые разновидности): графическим методом батоксов и горизонталей (каркасный метод) и графоаналитическим методом кривых второго порядка (кинематический метод).

**Графический метод батоксов и горизонталей.** Он основан на методах начертательной геометрии. Плазы боковых и плановых проекций увязываются часто на плазах сжатых дистанций (сжатые плазы), которые имеют масштаб по продольной оси 1:5 или 1:10, а поперечный масштаб — 1:1. В основе увязки проекций лежит система плоскостей батоксов и горизонталей, которыми рассекают разбиваемый агрегат. Последовательность разбивки плаза укрупненно заключается в следующем (рис. 11). 1) На плазе боковой проекции разбивают главную конструкторскую базу, строительные горизонталы (СГ), ось дистанции О (ОДО), плоскости шпангоутов (ШП), оси других конструктивных элементов, плоскости горизонталей и др. Расстояния между плоскостями батоксов (бат) и горизонталей (гор) кратны 50 мм. 2) На плазе плановой проекции разбивают аналогичные координатные оси. 3) На плазе совмещенных сечений наносят координатные оси. 4) Разбивку теоретического обвода на плазе боковой проекции производят по теоретической таблице для нулевых батоксов и полушироты. От главной конструкторской базы откладывают значения нулевых батоксов. Полученные точки соединяют плавной кривой. 5) То же выполняют на плановой проекции. 6) С плаза боковой и плановой проекции переносят точки нулевого батокса и полушироты на плаз совмещенных сечений. По теоретическим таблицам на батоксах и горизонталях откладывают точки для всех поперечных сечений. Рей-

кой соединяют поперечные контуры изделия. 7) Значения батоксов и горизонталей для различных сечений переносят с плаза совмещенных сечений на боковую и плановую проекции. Рейкой проводят плавные кривые промежуточных батоксов и горизонталей.

При выпадении некоторых точек производят увязку (корректировку) сжатым плазом последовательно несколько раз до достижения заданной точности увязки проекций. С целью проверки точности увязки строят рыбины, которые должны иметь плавные обводы и пройти через 85... 90% точек. Окончательные обводы на плазе обрабатывают, снимают плазовые таблицы, которые в дальнейшем выполняют роль теоретических таблиц. Метод батоксов и горизонталей точен и нагляден и применяется тогда, когда обводы затруднительно или невозможно описать кривыми второго порядка. Недостатками этого метода являются низкая производительность, зависимость точности разбивки от квалификации исполнителей.

*Метод кривых второго порядка* является частным случаем математического задания обвода: в этом случае обвод изделия задается сочетанием нескольких кривых второго порядка (окружность, парабола, эллипс, квадратичный трехчлен и т. д.). Как известно из аналитической геометрии, для задания кривой второго порядка достаточно иметь пять геометрических условий. В зависимости от способов задания этих пяти условий различают несколько разновидностей этого метода. Наиболее известны две разновидности (рис. 12): первая — задание трех точек кривой ( $A, C, E$ ) координатами и двух касательных в крайних точках (обычно задаются точкой их пересечения  $B$ ); вторая — две крайние точки ( $A, C$ ) задаются координатами, две касательные задаются точкой пересечения  $B$ , а третья точка  $E$  задается отношением отрезка  $ED$  к  $BD$  (медиане), называемым дискриминантом кривой второго порядка:  $f = ED/BD$ .

Весь обвод изделия в этом методе делят на ряд сопрягаемых кривых второго порядка, а каждую кривую задают указанными выше пятью условиями. Построение кривой по этим условиям сводится к нахождению графическим способом необходимого числа промежуточных точек.

Порядок построения кривой имеет следующую последовательность (см. рис. 12). 1) По данным теоретической таблицы откладывают координаты точек  $A, B, C, E$  ( $E$  находят по дискриминанту построением). 2) Через точки  $A$  и  $E$  проводят луч I, через  $C$  и  $E$  — луч II. 3) Из точки  $B$  примерно в район искомой точки проводят произвольную прямую (нить 1), которая пересечет луч I в точке  $M$ , а луч II — в точке  $K$ . 4) Из точки  $A$  в точку  $K$  проводят нить 2, а из точки  $C$  в точку  $M$  нить 3. 5) В пересечении нитей 2 и 3 будет искомая промежуточная точка  $P$  кривой.

Аналогичным построением находят все необходимые точки для соединения их в плавную кривую. Построение кривых больших габаритов производят с помощью сжатого плаза. Дальнейшая увязка проекций и доработка обвода производятся так же, как в методе батоксов и горизонталей. Метод кривых второго порядка





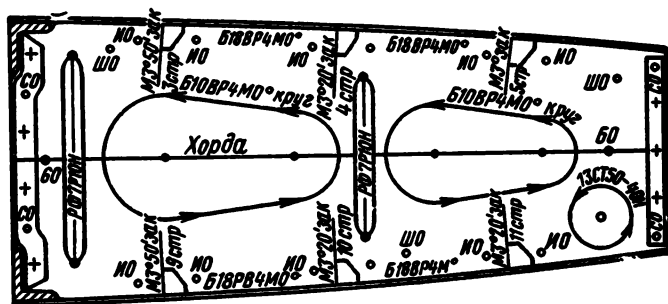


Рис. 14. Шаблон контрольно-контурный (ШКК) с нанесенной информацией

соответствующим контуром. В табл. 2 приведены для примера некоторые виды информации на шаблонах.

Таблица 2

Обозначение маркировки	Содержание информации	Обозначение маркировки	Содержание информации
ШКК	Шаблоны контрольно-контурные	ШО	Шпилечное отверстие
ШК	Шаблон контура	СО	Сборочное отверстие
ШВК	Шаблон внутреннего контура	ТК	Теоретический контур
ШКК К2000—ОПР	Условное обозначение шаблона, номер чертежа узла или детали, правый узел или деталь показаны, левый узел или деталь — отраженный вид	←←←←	Линия пересечения внешних поверхностей детали
ПОК—ЛЕВОТР		— — — — —	Средняя линия сгиба
Д16ТЛ2,5	Маркировка материала, из которого изготовляется деталь	○—○—○—	Линия или риска обреза детали
25ШП-Т Дист 12500	Двадцать пятый шпангоут, дистанция 12500 мм	Б 15,5В	Борт высотой 15,5 мм, направлен вверх (В) или вниз (Н)
ПЛАЗ Ц25	Шаблон изготовлен по плазу Ц25	НБ	Нет борта
ЭТ	Эталонный экземпляр шаблона	БАТ	Батокс
ШП-Т СГ	Шпангоут	ГОР	Горизонталь
ОСЬ СИМ БО	Ось симметрии	БАТ 0	Нулевой батокс
		ГОР 1	Горизонталь первая
	Базовое отверстие	М12°3АК	Борт с малкой 12°, малка закрытая
		М18°15' ОТК	Борт с малкой 18°15', малка открытая
		МО°	Борт с нулевой малкой

На шаблонах (рис. 14) кроме указанной информации, необходимой для использования шаблона, просверливаются отверстия БО, СО и другие, наносятся оси и т. д.

Наименование шаблона	Условные обозначения	Назначение
Контрольно-контурный	ШКК	Изготовление, увязка и контроль узлового комплекта шаблонов, а также шаблонов приспособлений
Контура	ШК	Изготовление, увязка и контроль детального комплекта шаблонов, а также заготовительно-штамповочной оснастки
Внутреннего контура	ШВК	Изготовление и контроль формблоков и оправок
Развертки детали	ШРД	Разметка и контроль разверток деталей, вырубных штампов и шаблонов фрезерования
Контура сечения	ШКС	Изготовление и контроль формблоков, оправок, болванок обтяжных пуансонов и деталей
Заготовки Фрезерования	ШЗ	Разметка заготовок деталей
	ШФ	Изготовление разверток деталей на фрезерных станках
Гибки	ШГ	Изготовление и контроль профильных и трубчатых деталей, имеющих кривизну в одной плоскости, оправок и приспособлений
Приспособления	ШП	Изготовление элементов сборочных приспособлений и их монтаж
Разный	ШР	Выполнение единичных работ, связанных с проверкой установки деталей и т. д.

По шаблонам изготавливаются детали, технологическая оснастка, сборочные приспособления, а также производится контроль деталей, собранных узлов, агрегатов и изделия. Применение шаблонов позволяет исключить трудоемкую работу по разметке контуров деталей и агрегатов, центров отверстий, а также производить сверление отверстий по специальным кондукторам.

Шаблоны изготавливают согласно схеме применяемости шаблонов из качественной конструкционной углеродистой стали Ст. 10, Ст. 20, толщиной от 1 до 3 мм. Шаблоны изготавливают в натуральную величину по конструктивным плазам или по теоретическим таблицам, определяющим обводы рабочих контуров шаблонов. Обводы шаблонов выполняются по теоретическим, наружным или внутренним обводам детали.

В производстве применяется большое количество различных шаблонов разного назначения. В табл. 3 приведены номенклатура и назначение некоторых шаблонов. Шаблоны делятся на: 1) основные (ШКК и детальный ШК) — шаблоны плазового цеха, предназначенные для изготовления, технологической увязки и контроля рабочих шаблонов, 2) производственные (рабочие), к которым относятся остальные шаблоны, предназначенные для изготовления заготовительно-штамповочной, сборочной и контрольной оснастки,

а также для изготовления и контроля деталей (ШВК, ШК, ШКС, ШРД и другие).

Основными этапами изготовления шаблонов являются раскрой заготовки, разметка заготовки, механическая обработка (фрезерование, сверление и ручная доводка), нанесение информации и маркировка, контроль и окраска.

Для облегчения изготовления и увязки шаблоны обычно выпускают комплектами. Группа шаблонов, применяемая для изготовления данной детали, называется детальным комплектом. Группа комплектов для деталей, входящих в данный узел, называется узловым комплектом шаблонов. Увязка шаблонов, входящих в один комплект, производится по конструктивным и координатным осям, базовым и технологическим отверстиям.

Способов разметки шаблонов (нанесения на заготовку контура рабочей части шаблона) существует много: по табличным данным на вертикальном разметочном стенде с помощью штанген-рейсмуса, настроенного на необходимый размер; с помощью различных механических приспособлений и устройств (копиров, пантографов); с помощью кальки и светокопий с теоретического плаза; методом прямого фотографирования; люминографическим методом, когда плазовые линии заполняются люминофорным составом, а поверхность шаблона покрывается светочувствительным слоем; электролитическим методом; методом офсетной типографской печати; с помощью копировально-фрезерных автоматов с одновременным фрезерованием контура; фотоконтактным методом, когда конструктивный плаз разбивают на прозрачном пластике, а поверхность заготовки покрывают светочувствительным слоем, и эту заготовку, с наложенным на нее плазом, помещают в светокопировальную камеру и подают на экспонирование и фотообработку. Эти методы различаются точностью, производительностью, производственными особенностями и областями применения, но наиболее широкое применение из них находит в последнее время фотоконтактный метод, а для плазов небольших размеров разметка с помощью копиров и пантографов.

Механическая обработка размеченных заготовок производится на ленточно-пильном станке, высечных или рычажных ножницах с доработкой на фрезерном станке и ручным опиливанием. Иногда обработку шаблонов ШК, ШВК, ШРД производят на специальном копировально-фрезерном станке по шаблону ШКК без предварительной разметки. Без разметки производится обработка шаблонов и на фрезерных станках с программным управлением, когда обводы могут быть заданы таблицами или формулами. Одновременно просверливаются также и все конструктивные и технологические отверстия.

После окончания обработки на шаблоны наносят всю информацию с помощью комплекта металлических шрифтов, после чего производится контроль и окраска основных шаблонов в красный цвет, стапельных — в зеленый, рабочих — в черный.

## 2.4.5. Развитие ПШМ

Для производства аппаратов необходимо большое количество шаблонов, изготовление которых удлиняет сроки освоения нового изделия в серийном производстве. Сокращения количества требующихся шаблонов можно достигнуть в результате применения следующих мероприятий: 1) замена в конструкции изделия сборных узлов и панелей монолитными панелями; 2) упрощение форм агрегатов изделия за счет более широкого применения обводов круглого сечения; 3) унификация и нормализация узлов и деталей изделия для сокращения их номенклатуры; 4) уменьшение количества шаблонов, требующихся для изготовления одной детали за счет более широкого использования шаблонов ШКК как для изготовления, так и для контроля оснастки; 5) более широкое применение оборудования с программным управлением, что позволяет отказаться от шаблонов и обрабатывать изделия сложной формы по заданной программе.

Развитие самого плазово-шаблонного метода идет по пути совершенствования точности увязки пространственных форм, для чего используются инструментальные стенды для точного монтажа сборочных приспособлений, оптические приборы, контрольные эталоны.

Монтажный эталон представляет собой жесткую единую конструкцию, собранную из отдельных шаблонов приспособлений (ШП), представляющих контуры сечений, стыковочных калибров и т. д.: он предназначен для повышения точности и производительности при монтаже сборочных приспособлений.

Дальнейшим развитием ПШМ было внедрение в производство объемных шаблонов — эталонов и макетов поверхности, контрольных эталонов, макетов стыков и т. д., которое получило название эталонно-шаблонного метода (ЭШМ). При этом методе повышается точность за счет увязки не только по некоторым сечениям, а по всей поверхности детали или агрегата, что особенно важно для заготовительно-штамповочной оснастки. В этом методе макет поверхности выполняет роль плаза в ПШМ — первичного носителя форм и размеров для всей оснастки.

*Эталоном или макетом поверхности* называется пространственный носитель формы и размеров агрегата или узла. Он воспроизводит внешние обводы и всю поверхность агрегата и служит для изготовления сборочной оснастки и слепков, по которым изготавливается заготовительно-штамповочная оснастка. Он изготавливается набором поперечных шаблонов ШКК или ШК на жестком каркасе; пространство между ними заливается легкообрабатываемым материалом (гипс, карбинольный цемент, пластмасса), который при обработке снимается до появления торцов шаблонов.

Кроме этого, эталоны поверхности могут изготавливаться по контршаблонам или на токарно-копировальных станках по специальным продольным копирам и др. Изготовленные эталоны контролируются продольными шаблонами ШКС; на их поверхности наносится различная информация.

Для обеспечения взаимозаменяемости по разъемам агрегатов и их увязки служат *макеты стыков* — жесткие носители размеров и форм стыков. Они служат для увязки координат стыковочных отверстий и поверхностей стыков. Конструктивно макеты стыков могут быть изготовлены или в виде плит (мастер-плиты), если стыки имеют плоскую форму, или в виде монтажных эталонов при пространственных стыках, когда стыковочные узлы увязываются с обводами агрегата.

На сегодняшний день плазово-шаблонный метод производства является единственным методом обеспечения взаимозаменяемости и точности аппаратов с маложесткими, крупногабаритными деталями, имеющими сложные аэродинамические обводы в условиях широкой кооперации.

## 2.5. ПОНЯТИЕ О НАДЕЖНОСТИ КА

### 2.5.1. Основные понятия и показатели надежности

Надежность — важнейшая характеристика аппаратов. Роль ее, как вполне конкретной и рассчитываемой характеристики, возрастает в связи с внедрением машинного проектирования изделий, когда создается возможность достаточно раннего прогнозирования надежности. Надежностью называется свойство объекта (аппарата, агрегата, узла, детали) выполнять заданные функции, сохраняя значения эксплуатационных показателей в заданных пределах в течение установленного промежутка времени (установленной наработки).

Надежность является самым сложным параметром качества аппарата, имеющим комплексный интегральный характер и характеризуется значительным количеством показателей, являющихся количественной характеристикой отдельных свойств объекта, входящих в общее понятие надежности.

К общим показателям надежности относятся: *работоспособность*, характеризующая состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции с параметрами, установленными техническими условиями; *безотказность*, характеризующая свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени (наработки); *долговечность*, характеризующая свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния с учетом установленной системы ремонта и обслуживания; *сохраняемость*, характеризующая свойство объекта сохранять установленные эксплуатационные показатели, соответствующие исправному и работоспособному состоянию, в течение и после хранения и транспортирования; *ремонтпригодность*, характеризующая приспособленность к предупреждению, обнаружению и устранению неисправностей путем ремонта и технического обслуживания.

Эти общие показатели характеризуются рядом более частных показателей надежности. Безотказность работы объекта: вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа, наработка на отказ, интенсивность отказов, параметр потока отказов и др. Долговечность: ресурс, гамма-процентный ресурс, средний ресурс, срок службы и др. Сохраняемость характеризуется гамма-процентным сроком сохранения. Ремонтпригодность характеризуется вероятностью восстановления, средним временем восстановления и т. д. Определения и методы расчета этих, а также других показателей можно найти в справочной и специальной литературе [3, 11].

Кроме указанных частных и общих показателей существуют комплексные, относящиеся к нескольким свойствам, составляющим надежность объекта. К ним относятся коэффициенты готовности, технического использования, оперативной готовности; средняя суммарная трудоемкость ремонтов и т. д.

Основным понятием теории надежности является понятие отказа. *Отказом* называется событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта. Существует также понятие *повреждения* — событие, заключающееся в нарушении исправности объекта или его элементов под влиянием внешних воздействий, превышающих уровни, установленные техническими условиями.

## 2.5.2. Виды и пути повышения надежности

Наука о надежности находится в развитии, появляется много исследований с различной новой терминологией или новой трактовкой имеющихся терминов. Характерным является классификация надежности по различным признакам: по предельным состояниям объекта (надежность по прочности, по устойчивости, герметичности и т. д.), по полноте отказов (полная надежность), по названию объектов (надежность аппарата, агрегата, детали) и т. д. Наиболее известной является классификация надежности по причинам и стадиям возникновения отказов: проектировочная, технологическая, эксплуатационная.

*Проектировочной надежностью* называется надежность, определяемая расчетом на этапе проектирования с учетом принятых конструктивных схем и решений, при этом исходят из некоторых моделей технологии и эксплуатации. Методы расчета надежности подразделяют на математические (формальные) методы, в основе которых лежат некоторые статистические закономерности, определяемые лишь экспериментально, и методы, учитывающие физические причины отказов или физическую картину работы конструкции. Большой трудностью в расчетах проектировочной надежности является недостаточность статистических (экспериментальных) данных. Наиболее полно развиты в настоящее время расчеты надежности по различным предельным состояниям.

*Технологическая надежность* определяется отличием реального технологического процесса от его модели, принятой при проекти-

ровочном расчете. Учитывая, что современный КА имеет  $10^4 \dots 10^6$  деталей, которые должны быть изготовлены с заданной точностью, собраны в определенном положении и должны обладать рядом параметров (в среднем около  $10^2$ ), характеризующих их качество (т. е. около  $10^8$  детали-параметров), отличий реальной конструкции от расчетной модели, возникающих в процессе изготовления, может быть весьма много (до  $10^3$ ). Если нет отличий реальной конструкции от расчетной модели, то технологическая и проектировочная надежности совпадают.

*Эксплуатационная надежность* — надежность конструкции аппарата в процессе эксплуатации. Она определяется отличием реальных условий эксплуатации от модели, принятой при проектировочном расчете, т. е. от погрешностей, которые могут появиться при эксплуатации (при частичной разборке, при доработке конструкции, при изменении сроков хранения и др.).

При проектировании аппарата высокая надежность обеспечивается выбором надежных конструктивных схем и материалов, стандартизацией и унификацией, преемственностью конструктивных решений, применением в конструкции аппарата надежных элементов, предусмотрением допустимых режимов работы элементов аппарата. С этой точки зрения большое значение имеют такие характеристики конструкции, как технологичность и учет предельных возможностей производства. Важным путем повышения надежности при проектировании (особенно аппаратуры) является резервирование. Резервированием (дублированием) называется способ повышения надежности за счет предусмотрения в конструкции избыточного количества элементов, предназначенных для выполнения одних и тех же функций и включающихся в работу при отказе резервируемых элементов. Резервирование характеризуется кратностью — количеством повторяемых элементов. Вопросы резервирования в связи с использованием обитаемых КА, к надежности которых предъявляются очень высокие требования, получили широкое развитие.

При производстве высокая надежность обеспечивается строгим соблюдением установленной технологии, применением передовых методов изготовления и сборки, правильным проектированием технологических процессов, исключаям условия предельных возможностей, автоматизацией технологических процессов, тренировкой систем и элементов, принятой системой контроля и испытаний, технологической настройкой и наладкой систем. Отметим, что практически технологическая надежность даже при соблюдении строгих технических требований ниже проектировочной надежности.

При эксплуатации высокая надежность аппаратов достигается соблюдением правил эксплуатации, исключением превышения установленного уровня режимов работы систем, организацией системы технического обслуживания, высокой квалификацией обслуживающего персонала. Как правило, эксплуатационная надежность ниже, чем проектировочная и технологическая.



Говоря о надежности отдельных агрегатов и систем аппаратов, отметим, что в настоящее время накоплены статистические данные о надежности отдельных систем, которые показывают, что наибольшее число отказов в КА приходится на систему бортовой аппаратуры (электронная и электрическая система) и подвижные элементы конструкции, подверженные воздействию вакуума.

Одним из главных вопросов при решении задачи о надежности КА является определение соотношения надежность/стоимость. С повышением надежности аппаратов растет их стоимость. Поэтому целью экономических расчетов надежности является или определение уровня надежности при минимальных затратах, или определение максимально возможной надежности при заданной величине затрат. Методики подобных расчетов, основанных на методах исследования операций, приводятся в специальной производственной литературе. Найденные по этим методикам значения надежности принимаются за оптимальные и являются экономическим критерием надежности, позволяющим определить целесообразность и экономический эффект ее повышения.

### **Глава 3. ОБЩАЯ МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

#### **3.1. ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. ПОРЯДОК РАЗРАБОТКИ, СТАДИИ И ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Одной из главных задач технологии машиностроения является создание научных основ проектирования оптимальных технологических процессов обработки деталей и сборки изделий. Технологические процессы являются основой производственного процесса, так как на основе разработанных технологических процессов определяются данные для организации снабжения основными и вспомогательными материалами и оборудованием, данные для планирования, набора рабочей силы, транспортного хозяйства, расчета площадей и т. д. и даже для структурной организации всего предприятия.

Технологические процессы разрабатываются при проектировании новых и реконструкции существующих заводов, а также при постановке на производство новых изделий на существующих заводах. Но даже при выпуске уже освоенных изделий на действующих заводах непрерывно происходит совершенствование технологических процессов, вызванное конструктивными изменениями изделий, внедрением более совершенных методов обработки, необходимостью оптимизации отдельных процессов и операций, внедрением новых типов заготовок и т. д.

Задача проектирования технологических процессов характеризуется, во-первых, *многовариантностью возможных решений*, каж-

дое из которых может обеспечить заданные требования чертежа, технических условий и программы. При наличии нескольких вариантов технологических процессов необходимо иметь для выбора оптимального варианта критерии оценки (выбора), которыми могут быть, например, себестоимость, производительность, количество рабочих и т. д. При проектировании технологического процесса всегда производится выбор вариантов в явном или неявном виде: в явном в том случае, когда к концу проектирования имеется несколько вариантов технологического процесса; в неявном виде в том случае, когда на отдельных этапах проектирования из многих вариантов принимается один, например при выборе заготовки, делении на операции, выборе баз, расчете режимов обработки и т. д.

*Все операции и этапы проектирования технологического процесса взаимосвязаны*, что является второй особенностью задачи проектирования технологических процессов, поэтому изменения на каком-либо этапе проектирования технологического процесса вызывают изменения на многих предыдущих этапах проектирования; взаимосвязанность операций и этапов разработки технологического процесса приводит к решению задачи проектирования технологических процессов методом последовательных приближений. В начале проектирования делаются предварительные наброски (схема обработки) технологического процесса; на последующих этапах на основе подробного анализа и расчетов эти решения уточняются и конкретизируются. Каждое уточнение является некоторым изменением данного этапа и вызывает необходимость некоторого изменения уже разработанных предыдущих этапов, т. е. каждое уточнение есть повторение ряда предыдущих этапов с учетом новых данных, полученных на последнем этапе. Таких уточнений при проектировании технологического процесса производится несколько, в результате чего получается окончательный вариант технологического процесса.

В процессе проектирования можно выделить несколько крупных стадий разработки технологического процесса:

уточнение исходных данных и критериев и подготовка к проектированию технологического процесса;

анализ исходных данных и выбор вида заготовки;

разработка маршрутной технологии (схемы или плана процесса изготовления);

разработка отдельных операций (операционной технологии);

расчет общих показателей технологического процесса и выбор рационального варианта (технико-экономический анализ).

Эти стадии, в свою очередь, состоят из более мелких последовательных этапов проектирования технологического процесса.

Рассмотрим примерный порядок (этапы) разработки технологических процессов механической обработки:

1) назначение и уточнение исходных данных для проектирования технологических процессов. Установление критериев выбора проектируемого технологического процесса;

- 2) изучение и анализ чертежей изделия, технических условий и заданной программы;
- 3) изучение свойств материала, конфигурации детали, производственной программы и выбор вида заготовки;
- 4) выбор количества и методов обработки каждой поверхности. Предварительная разбивка процесса изготовления на операции;
- 5) разработка маршрутной технологии. Определение количества и порядка операций, назначение оборудования;
- 6) анализ точности и выбор методов контроля. Назначение стратегии контроля в маршрутной технологии. Уточнение маршрутной технологии;
- 7) расчет припусков и промежуточных размеров на механическую обработку. Разработка чертежа заготовки;
- 8) уточнение маршрутной технологии и разработка переходов (приемов) всех операций технологического процесса (проектирование операционной технологии);
- 9) назначение установочных и измерительных баз и технологическое проектирование приспособлений;
- 10) расчет или выбор режимов резания и назначение и расчет режущего инструмента;
- 11) окончательный выбор оборудования и уточнение режимов обработки;
- 12) нормирование операций. Определение процента загрузки операций и расчет количества основных рабочих и их загрузки;
- 13) определение квалификации, разрядов и специальности основных рабочих;
- 14) расчет оргтехмероприятий и снабжения и расчет технико-экономических показателей технологических процессов. Выбор конкретного варианта технологического процесса;
- 15) окончательное уточнение технологического процесса, проверка стабильности технологического процесса и внедрение его в производство.

В целях сокращения трудоемкости и длительности разработки технологического процесса целесообразно в тех случаях, когда это возможно, более полный анализ основных вариантов изготовления и выбор одного из них производить на ранних этапах проектирования. Приведенное деление процесса проектирования на этапы в ряде случаев может частично видоизменяться.

### **3.2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ**

К исходным данным, необходимым для решения задачи проектирования технологических процессов, относятся: сборочный чертеж, рабочий чертеж, технические условия, производственная программа (объем выпуска), чертежи заготовки, данные об оборудовании, нормативные и инструктивные материалы, особые требования и критерии оптимизации.

*Сборочный чертеж* позволяет представить конкретные условия работы узла и детали, сопряжения в узле, что важно для выбора оптимального варианта сборки, а часто и изготовления. Сборочный чертеж должен быть выполнен в соответствии с ЕСКД. В нем должны быть все проекции, разрезы и сечения, позволяющие четко представить все сопряжения деталей и их взаимодействие в эксплуатации.

*Рабочий чертеж* является основным исчерпывающим документом, составленным на основе ЕСКД и определяющим собой данную деталь; должен иметь необходимое количество проекций, разрезов, сечений, дающих четкое представление о конфигурации детали. Иногда полезно иметь также и реальный образец (эталон) детали, что может ускорить и облегчить решение ряда вопросов при проектировании технологического процесса.

*Технические условия (ТУ) на изготовление* составляют наиболее сложные и ответственные детали, узлы и агрегаты. Они содержат указания о назначении объекта; требования к нему, которые нужно выполнить в процессе изготовления или сборки; методы контроля, хранения; требования к таре, транспортировке, клеймению и т. д. Технические условия учитываются при выборе вариантов решения задачи проектирования.

*Чертеж заготовки* не относится к исходным данным для проектирования технологического процесса, но иногда он или некоторые данные о заготовке могут быть заданы заранее как исходные, т. е. должны учитываться как обязательное исходное условие для проектирования технологического процесса. Чертеж заготовки должен быть выполнен в полном соответствии с ЕСКД. На нем могут быть требования по надежному и точному получению отдельных ответственных поверхностей. Отдельно разрабатываются технические условия на заготовку.

*Производственная программа* (объем выпуска) позволяет определить при проектировании технологического процесса, из какого вида производства (массового, серийного, единичного) нужно исходить при решении таких вопросов, как способ получения заготовки, степень концентрации операций, механизация операций, выбор оборудования, нормирование, определение количества рабочих и т. д. Поэтому, не зная производственной программы, проектировать технологический процесс невозможно.

Производственная программа завода  $N_3$  для проектирования нового технологического процесса дается в виде требуемого количества изделий в год при определенном количестве рабочих смен в сутки.

Производственную программу участка или цеха  $N_i$  можно подсчитать с учетом потребного числа данных деталей на одно изделие  $m$ , процента запасных деталей  $\beta$ , а также процента предусмотренного брака  $\alpha$ :  $N_i = N_3 m (1 + \beta/100) (1 + \alpha/100)$ .

*Данные об оборудовании.* Свободный выбор оборудования может представиться только при проектировании технологических процессов для новых цехов и заводов, а для существующих заводов

приходится исходить из имеющегося оборудования и его наилучшего использования и лишь при острой необходимости закладывать в проектируемый процесс новое оборудование. Наличие оборудования определяет выбор методов обработки, оснастки, режимов резания и т. д.

Руководящие *материалы* во многих случаях определяют принятие конкретных решений, являясь обобщенными результатами огромного производственного опыта. К ним относятся различные ГОСТы (например, система стандартов безопасности труда — ССБТ), нормали, нормативы, альбомы типовых технологических процессов, инструкции, каталоги оборудования и инструмента, периодическая информация, литература и т. д.

*Критерии оптимизации технологических процессов.* Приведенных выше исходных данных достаточно для проектирования «правильных» технологических процессов, обеспечивающих выполнение требований чертежа, технических условий и производственной программы, т. е. эти исходные данные при решении технологических вопросов позволяют из возможного множества решений выбрать технически правильные, но их может быть много. Из этого множества технологических процессов необходимо выбрать один, для чего должны быть заданы критерии выбора. Так как эти критерии определяют выбор варианта решения, начиная с первых же этапов проектирования, они относятся к исходным данным для проектирования технологических процессов. К критериям выбора, или оптимизации, могут относиться: обеспечение минимальной себестоимости обработанной детали, максимальной производительности технологического процесса, минимального числа производственных рабочих, использование минимальных производственных площадей и т. д. На практике установленный критерий оптимизации может быть достаточно сложным, например обеспечение минимальной себестоимости при заданном значении производительности и надежности изделия; обеспечение максимальной производительности при заданной себестоимости и использовании заданного количества производственных рабочих и т. д. Необходимо особо отметить, что задачу проектирования технологического процесса без заданных критериев оптимизации решить однозначно невозможно.

### **3.3. СВЯЗЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРОГРАММОЙ. ТАКТ ПРОИЗВОДСТВА**

Заданный тип производства в значительной степени определяет степень разработки технологического процесса (порядок и количество операций, вид заготовок, оборудование, оснастку и т. д.). Для некоторых вспомогательных производств (например, ремонтное производство) при проектировании технологических процессов можно с определенным приближением ограничиться заданием типа производства, не устанавливая точно объема выпуска. Но такой технологический процесс не будет оптимизирован по объему выпуска и в основном производстве недопустим. Можно сказать, что

одной из аксиом технологии является соответствие технологического процесса заданной программе и объему выпуска. Это значит, что он должен обеспечивать выпуск заданного программой количества изделий. Такой технологический процесс является оптимизированным по объему выпуска. Если годовые значения объема выпуска возрастают в течение ряда лет, то за расчетную программу необходимо принять программу последнего года планируемого отрезка времени.

Очевидно, что если технологический процесс обеспечивает фактический объем выпуска изделий меньший, чем заданный, то такой процесс будет неудовлетворительным. Если технологический процесс обеспечивает выпуск изделий с большим превышением заданного объема выпуска, то такой технологический процесс также является неудовлетворительным. Это объясняется следующим. Общие затраты на выпуск изделий, т. е. на реализацию технологического процесса, зависят от объема выпуска: чем больше предусматривает технологический процесс выпуск изделий, тем выше общие затраты, так как увеличение выпуска связано или с дополнительной механизацией и автоматизацией производства, или с внедрением более производительного и более дорогого оборудования, или с увеличением числа занятых рабочих и производственных площадей и т. д. Но предприятие для выпуска сверхпрограммного количества изделий не будет обеспечено ни сырьем, ни комплектующими, ни другими кооперированными поставками, так как это не предусмотрено народно-хозяйственным планом. Вследствие этого затраты на выпуск сверхпрограммного количества изделий не будут использоваться, они окажутся замороженными непроизводительными затратами, тогда как заданная производственная программа может быть обеспечена значительно более дешевым технологическим процессом, разработанным в соответствии с заданной программой.

Этот закон соответствия технологического процесса заданной производственной программе не относится к случаю, когда предприятие при правильно разработанном технологическом процессе за счет изыскания внутренних резервов увеличивает фактический выпуск изделий без дополнительных затрат государственных средств или обеспечивает снижение себестоимости выпускаемых изделий.

Соответствие разработанного технологического процесса заданной программе обеспечивается соотношением такта производства и времен операций разработанного техпроцесса.

По заданной программе определяется такт производства. Тактом производства  $r$  называется отрезок времени, через который должно выпускаться готовое изделие (отрезок времени между выпуском двух следующих друг за другом изделий), т. е. такт производства есть отношение фонда времени  $F$  к объему выпуска

$$r = F / N_{\text{пр}} = 60nik / N_{\text{пр}}, \text{ мин,}$$

где  $n$  — число рабочих дней;  $i$  — число рабочих смен в сутки;  $k$  —

число часов в смене;  $N_{\text{пр}}$  — годовая производственная программа (объем выпуска). Такт производства — временное выражение заданной программы производства.

При разработке технологического процесса одной из важнейших величин, характеризующих его производительность, является штучно-калькуляционное время операций  $t_{\text{шт.к}}$ . Очевидно, что из всех времен операции технологического процесса лимитирующим будет являться наибольшее время  $t_{\text{шт.к max}}$ , так как фактический выпуск изделий будет определяться этой величиной (при условии, что на каждой операции имеется одно рабочее место).

Для того чтобы обеспечить выпуск изделий, равный заданной программе, необходимо уравнивать такт производства и время операции, характеризующее разработанный технологический процесс. Если одна операция выполняется на  $m$  одинаковых рабочих местах, то необходимо оперировать с расчетным временем, равным  $t_{\text{шт.к}}/m$ .

Тогда можем записать условие, связывающее заданную программу и разработанный технологический процесс:  $r = t_{\text{шт.к}}/m$ , или  $t_{\text{шт.к}} = mr$ .

В ряде отраслей народного хозяйства из анализа деятельности предприятий и экономических соображений максимально допустимое значение  $m$  принимается равным трем. С учетом этого  $t_{\text{шт.к}} \leq 3r$ . В этом условии мы должны стремиться к равенству расчетного штучно-калькуляционного времени операции и такта производства; неравенство исключает вариант, вообще не обеспечивающий выполнение производственной программы ( $t_{\text{шт.к}} > 3r$ ).

Отметим некоторые пути обеспечения приведенного условия соответствия: 1) если времена ряда операций значительно меньше такта производства, то необходимо пересмотреть маршрутный технологический процесс в направлении объединения ряда операций в одну, чтобы обеспечить примерное равенство расчетного времени такту; если это технически невозможно, то загрузка рабочих мест может быть обеспечена за счет применения групповой технологии; 2) если действительное время операции превышает три такта, то необходимо или членить эту операцию на несколько менее продолжительных (т. е. пересмотреть маршрутную технологию), или принять меры к повышению производительности на данной операции; 3) уменьшение времени операции может быть проведено или за счет повышения режимов резания, или за счет сокращения вспомогательного времени путем механизации или даже автоматизации этой операции.

#### 3.4. ИЗУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ ЧЕРТЕЖЕЙ, ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ И ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ. СВЯЗЬ ЧЕРТЕЖА С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

Первой стадией проектирования технологического процесса является изучение рабочего чертежа детали или узла, технических условий на изготовление или сборку и условий их работы в изделии. Необходимо проверить наличие достаточного количества

проекций, разрезов и сечений, правильность простановки всех размеров, изучить все требования по точности и шероховатости поверхности. При этом выявляются возможности улучшения технологичности конструкции детали (например, унификация размеров, приведение их в соответствие со стандартными размерами инструментов, простановка размеров от одной базы или совмещение установочных и измерительных баз и т. д.). Каждое вносимое изменение должно согласовываться с конструктором.

Связь рабочих и сборочных чертежей с технологическим процессом выражается в том, что все требования, имеющиеся в чертежах и технических условиях, должны быть обеспечены технологическим процессом.

Изучение материала, конфигурации детали, размеров и др. позволяет наметить методы получения заготовки; анализ точности и шероховатости поверхностей — необходимые финишные операции и предшествующие операции обработки; анализ конструкторских баз (взаимосвязь поверхностей) — будущий план обработки, как процесс смены баз; наличие специфичных поверхностей и требований может дать представление о специальных методах обработки и оборудовании, о термообработке и покрытиях и т. д. Анализ заданной программы производства еще более конкретизирует эти представления, т. е. позволяет отбросить ряд технически возможных, но экономически нецелесообразных вариантов изготовления.

Этот первый этап работы над проектированием технологического процесса должен завершаться формулированием, так называемой, основной технологической задачи—суммы главных технологических задач и требований к детали и сборке, что позволяет отнести данную деталь к определенному классу и определить ее тип внутри класса, что позволяет использовать типовые технологические процессы.

### **3.5. ИЗУЧЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА ЗАГОТОВКИ**

На данном этапе проектирования на основе изучения свойств материала детали, ее конфигурации, размеров, точности и шероховатости поверхностей и с учетом объема выпуска производится определение вида заготовки: метода ее получения или даже нескольких близких методов. Уточнение и технико-экономическое обоснование выбранного метода получения заготовки производится после выбора маршрута обработки, расчета припусков и проектирования заготовки.

### **3.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА И МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ КАЖДОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Начальным этапом разработки процесса изготовления является выбор методов обработки каждой поверхности детали исходя из конфигурации и заданных точности, шероховатости и качества поверхности, при этом необходимо учитывать заданный объем вы-



пуска, наличие оборудования, возможности создания приспособлений и инструмента и ряд других требований (например требования групповой технологии). На данном этапе необходимо определить также количество обработок каждой поверхности. Одним из законов построения технологии обработки является группирование однородных операций по обработке всех поверхностей. Такую группу однородных операций иногда называют этапом процесса обработки, например этап обдирки, этапы черновой и чистовой обработки, окончательной обработки, отделки и т. д. По этому закону необходимо произвести вначале обдирку всех поверхностей, после чего черновую обработку их, потом чистовую и т. д. Количество этапов обработки каждой поверхности в зависимости от требований может быть различным, что и определяется здесь, например обдирочное, черновое и чистовое фрезерование и шлифование данной поверхности, или сверление, расточка и развертывание данного отверстия и т. д.

Важность этого этапа проектирования увеличивается тем, что на нем в значительной степени решаются вопросы, связанные с предельными возможностями производства. С точки зрения получения конечных параметров детали, задаваемых чертежом, последовательность обработки можно представить как последовательность уточнений. Правильное применение принципа уточнения параметров при каждой обработке обеспечит минимальное и достаточное количество обработок каждой поверхности. На этом же этапе проектирования технологического процесса намечаются установочные и измерительные базы, место термической обработки, отделки и т. д. Данный этап проектирования технологического процесса можно рассматривать как подготовительную работу к проектированию маршрутной технологии.

### 3.7. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАРШРУТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Маршрутной технологией называется перечень всех операций технологического процесса в порядке их следования с указанием данных об оборудовании, оснастке и кратким описанием содержания операций. Разработка маршрутной технологии является промежуточным этапом проектирования технологического процесса для серийного и массового производства, тогда как для единичного и опытного производства маршрутная технология может быть конечной целью разработки технологического процесса. В последнем случае она оформляется в специальных документах — маршрутных картах определенной формы, где кроме краткого описания содержания операции указывается оборудование, оснастка, данные укрупненного нормирования, иногда могут разрабатываться и эскизы обработки основных операций.

Главной задачей при проектировании маршрутной технологии является определение количества и последовательности операций.

*Количество операций* укрупненно определяется конструкцией детали, узла или агрегата, заданным объемом выпуска, выбранным

типом заготовки и т. д. При решении вопроса о количестве операций могут быть два направления: метод концентрации и метод дифференциации операций.

Метод концентрации операций заключается в разбивке процесса изготовления на небольшое число сложных операций, состоящих из значительного числа переходов по обработке нескольких поверхностей, выполняемых последовательно (последовательная концентрация), параллельно (параллельная) или параллельно-последовательно (комбинированная). Примерами таких операций могут служить многоинструментальная обработка, обработка на многошпиндельных станках, агрегатные или револьверные операции, сложные операции на станках с ЧПУ или обрабатывающих центрах. Преимуществами метода концентрации операций являются, как правило, более высокая точность вследствие снижения числа переустановок детали; повышение производительности обработки; уменьшение числа операций, количества рабочих и станков; сокращение цикла обработки за счет уменьшения вспомогательного времени и совмещения переходов, производственной площади. Вместе с тем, этот метод требует высококвалифицированных рабочих — наладчиков, применения сложного дорогого оборудования, увеличивается время на подготовку и наладку операций, усложняются технологические расчеты.

Метод дифференциации операций заключается в разбивке процесса изготовления на большое число простых, часто однопереходных операций, выполняемых на простых по конструкции и более дешевых станках. Преимуществами этого метода являются простота оборудования, возможность его специализации и механизации, сокращение времени наладки и переналадки на новую продукцию, резкое сокращение потребности в квалифицированных рабочих, упрощение технологических расчетов. Но при этом увеличивается число операций, рабочих, количество оборудования, производственная площадь; удлиняются цикл обработки детали, вспомогательное время; возрастают межоперационные заделы и транспортировка деталей; как правило, уменьшается точность обработки.

Выбор того или иного метода или степени их сочетания при разработке технологических процессов определяется технико-экономическими расчетами, наличием оборудования, оснастки, рабочей силы и т. д. на базе заданных критериев оптимизации технологического процесса. Особо отметим, что, решая вопрос о количестве операций, необходимо обеспечивать, в первую очередь, соответствие технологического процесса заданному объему выпуска (программе), а также учитывать принцип предельных технологических возможностей.

В производстве ракет и космических аппаратов находят применение оба направления проектирования технологических процессов. Но, как правило, в серийном и крупносерийном производстве больше применяется метод параллельной концентрации или метод дифференциации операций, а в единичном и опытном производстве шире применяется метод последовательной концентрации, как путь

обеспечения соответствия технологических процессов малому объему выпуска и большей эффективности такого производства. Отметим, что общая тенденция развития производства направлена в сторону метода концентрированных операций.

*Последовательность операций* укрупненно определяется на предыдущем этапе проектирования. В настоящее время нет общей методики определения оптимальной однозначной последовательности всех операций технологического процесса, но несомненно, что последовательность операций не может быть произвольной, а определяется в значительной степени конструктивным базированием обрабатываемых поверхностей и требованиями к ним и подчиняется ряду принципов и правил, из которых можно отметить следующие:

а) необходимо стремиться принимать за технологические базы конструкторские базы, что кроме более высокой точности обработки обеспечивает минимальное число обработок каждой поверхности. Добиваться того, чтобы каждая предшествующая операция обеспечивала получение комбинации поверхностей, которые послужили бы базой для многих последующих операций, особенно это касается начальных операций. С этой точки зрения рекомендуется назначать минимальное число основных конструкторских баз, что важно для наиболее быстрого (меньшим количеством операций) достижения заданной точности детали;

б) при разработке порядка операций необходимо соблюдать принцип поэтапного построения процесса обработки. Этот же принцип иногда формулируют иначе: каждая установочная база при обработке данной поверхности может быть использована только один раз, т. е. до каждой последующей обработки данной поверхности базовая поверхность должна быть также обработана;

в) операции сверления и обработки отверстий и местных усложнений формы (пазы, ступеньки, лыски, канавки, полки и т. д.), если они не являются базами для последующей обработки, относят в конец технологического процесса. Но если имеются какие-либо особые соображения (например, проектирование групповых технологических процессов), то операции обработки этих элементов можно располагать и раньше, соблюдая принцип поэтапного изготовления;

г) контрольные операции необходимо располагать ближе к соответствующим операциям обработки (лучше вслед за ними);

д) термообработку нужно стараться отнести к концу технологического процесса перед окончательной обработкой, если это возможно технически;

е) операции со значительным количеством предусмотренного брака нужно размещать в технологическом процессе по возможности раньше, если это не противоречит другим принципам и правилам.

Соблюдение указанных принципов и правил не определяет однозначной последовательности и количества операций и оставляет возможность как для оптимизации маршрутной технологии по заданным критериям выбора, так и для учета особых условий проек-

тирования технологических процессов, например для поточного производства требуется обеспечить равенство или кратность операционных времен общему такту поточной линии; для многостаночного обслуживания требуется, чтобы машинное время на каждом станке было больше суммы вспомогательных времен на других станках; для автоматических линий требуется тщательная синхронизация машинного и вспомогательного времен с тактом линии; для групповой обработки требуется по возможности сводить операции обработки на однотипных станках в одно место технологического процесса.

Маршрутный технологический процесс оформляется на специальных технологических документах — маршрутных картах, которые имеют четыре варианта исполнения для различных условий производства. В маршрутной карте указываются все данные для последующей разработки технологического процесса изготовления. Кроме маршрутных карт могут быть составлены карты эскизов, содержащие графическое изображение операций с указанием обрабатываемых и базовых поверхностей и элементов закрепления. В некоторых случаях составляются ведомости расцеховки, содержащие данные о маршруте прохождения объекта изготовления по цехам; оснастки, содержащая перечень применяемой специальной и стандартной оснастки; материалов, содержащая сведения о марках и нормах расхода материалов.

### **3.8. РАСЧЕТ И НАЗНАЧЕНИЕ ПРИПУСКОВ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ РАЗМЕРОВ**

Зная методы обработки каждой поверхности, можно перейти к расчету припусков и проектированию заготовок.

*Припуском* называется слой металла, подлежащий удалению с заготовки в процессе обработки. Различают общий припуск — слой металла, который удаляется с данной поверхности в результате обработки на всех операциях технологического процесса, и межоперационный припуск — слой металла, удаляемый на данной операции. Общий припуск равен сумме межоперационных припусков данной поверхности.

Выбор оптимальной величины припуска является важной задачей при проектировании технологического процесса. Увеличенный припуск снижает коэффициент использования металла, увеличивается объем механической обработки, возрастают трудоемкость и цикл обработки и т. д. Но в то же время уменьшенные значения припуска приводят к необходимости повышения точности, усложняется установка заготовок при обработке, могут остаться на обработанной поверхности дефекты от предыдущих операций и т. д.

Величина межоперационного припуска должна обеспечивать удаление всех дефектов предыдущей операции и погрешностей, вызванных неточностями установки на данной операции.

При назначении припусков на обработку приходится решать две задачи: а) определение межоперационных и общего припусков;

б) определение промежуточных размеров с допусками. Решение первой задачи связано с определением минимального значения припуска, при этом имеется два метода назначения припусков на обработку: расчетно-аналитический (метод проф. В. М. Кована) и опытно-статистический.

Расчетно-аналитический метод основан на определении минимального припуска по следующей зависимости:

$$z_{i \min} = R_{z i-1} + T_{i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_{yi},$$

где  $z_{i \min}$  — припуск на обработку для рассматриваемого перехода;  $R_{z i-1}$  — высота микронеровностей, оставшихся с предшествующего перехода;  $T_{i-1}$  — глубина дефектного слоя, оставшегося с предшествующего перехода;  $\rho_{i-1}$  — пространственные отклонения, возникшие на предшествующем переходе;  $\varepsilon_{yi}$  — погрешности установки заготовки на рассматриваемом переходе.

Пространственные отклонения  $\rho$  определяют как векторную сумму отклонений  $\rho = \sum_{j=1}^n \rho_j$ ; погрешности установки определяют

тоже векторно  $\varepsilon_{yi} = \varepsilon_6 + \varepsilon_3$ , где  $\varepsilon_6$  — погрешность базирования, а  $\varepsilon_3$  — погрешность закрепления. Иногда эти составные погрешности суммируют по правилу квадратного корня:  $\rho = \sqrt{\rho_1^2 + \rho_2^2}$ ;  $\varepsilon_y = \sqrt{\varepsilon_6^2 + \varepsilon_3^2}$ .

В формуле индекс  $i$  относится к рассматриваемой операции, а индекс  $i-1$  — к предшествующей операции. Все слагаемые в формуле можно найти в технологических справочниках, в некоторых случаях  $\rho$  и  $\varepsilon$  можно найти расчетом. Расчетно-аналитический метод определения припусков более эффективен для массового и крупносерийного производства.

В серийном и мелкосерийном производстве больше распространен опытно-статистический метод, при котором общие и операционные припуски берут из таблиц специальных справочников, составленных на базе исследования большого статистического материала. Положительной стороной этого метода является его простота и быстрота, но при этом не учитываются конкретные условия данной обработки. Опытно-статистический метод, как правило, дает несколько завышенные значения припусков.

Определение промежуточных размеров с допусками производится последовательно, начиная с размера

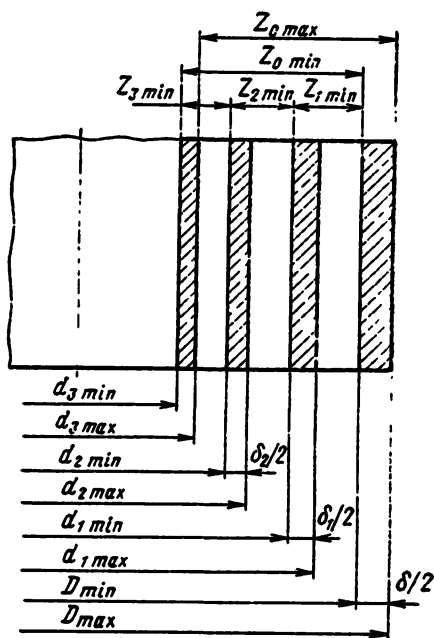


Рис. 15. Схема расположения припусков и промежуточных размеров для вала

и допусков готовой детали. Схема их образования наглядно видна на рис. 15, где показана схема расположения припусков и промежуточных размеров при трехкратной обработке.

После определения межоперационных и общих припусков разрабатывают чертеж заготовки, метод получения которой определен ранее. При расчете заготовки с целью упрощения ее форм делают напуски материала сверх рассчитанных припусков, которые, заполняя местные усложнения формы, упрощают конструкцию заготовки. При выборе стандартных заготовок расчетные размеры округляют до ближайшего стандартного размера в большую сторону. Разработка заготовки заканчивается составлением технических условий и требований к ней.

### **3.9. АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ И ВЫБОР МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ**

После разработки маршрутной технологии и расчета промежуточных размеров с допусками необходимо решить вопрос о методах и средствах контроля и испытаний, что связано с определением количества и места контрольных операций (стратегии контроля), методов и средств контроля, степени механизации операций контроля и т. д. Задача контроля и испытаний решается с учетом конструкции детали и сборки, степени надежности получения параметров объекта, типа производства и объема выпуска, требуемой точности контроля, затрат на контроль и т. д.

Выбор стратегии контроля является весьма сложной задачей, когда приходится учитывать ряд противоречивых факторов: надежность, точность, производительность и стоимость. Во многих случаях для решения таких задач приходится проводить специальные исследования с составлением математических моделей и решении задачи оптимизации с помощью ЭВМ.

Контролируемые параметры делят на геометрические (размеры, форма, шероховатость поверхности и т. д.), механические (твердость, жесткость, прочность, выносливость, остаточные напряжения и т. д.), физические (масса, частота собственных колебаний, магнитные свойства, качество покрытий, отражательная способность, сплошность и т. д.) и химические (химический состав, структура, коррозионная стойкость и т. д.). Для их контроля применяются самые различные методы и средства. Некоторые контрольно-испытательные операции в производстве КА являются уникальными и весьма сложными, например контроль правильности установки управляющих двигателей, испытания и контроль раскрытия солнечных батарей, контроль оптических свойств ряда деталей КА и т. д.

В общем цикле изготовления КА контроль и испытания занимают большое место, поэтому большое внимание уделяется повышению их производительности и надежности: унификации и даже стандартизации методов и средств контроля, механизации и автоматизации контроля и испытаний, использованию счетно-решающих устройств, систем самоконтроля, программирующих устройств и

т. д., например универсального автоматизированного контрольно-испытательного оборудования (АКИО) для контроля при сборке аппаратов до 200 и более параметров. В последнее время в связи с развитием автоматических станков, станков с ЧПУ, обрабатывающих центров и станков с адаптивным управлением находят все более широкое применение методы активного контроля.

### **3.10. РАЗРАБОТКА ОПЕРАЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

После решения вопросов о количестве и порядке операций и промежуточных размерах (точности операций) при проектировании технологического процесса переходят к этапам, связанным с разработкой каждой операции. При этом решается задача членения каждой операции на элементы: переходы, проходы, приемы. При проектировании операций технологического процесса уточняются маршрут обработки, распределение припусков между переходами, выбор оборудования, приспособлений, инструмента, уточнение точности и шероховатости поверхности, назначение режимов резания, нормирование. При оптимизации операции одним из основных является вопрос о совмещении переходов между собой, о совмещении элементов основного и вспомогательного времени, что связано с решением вопроса о количестве обрабатываемых заготовок (многоступенчатая обработка), о количестве применяемых инструментов (многоинструментальная обработка) и о схеме обработки: последовательной, параллельной, параллельно-последовательной. Эти вопросы решаются с учетом заданных критериев оптимизации, типа производства, объема выпуска и т. д.

### **3.11. НАЗНАЧЕНИЕ БАЗ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ**

Назначение установочных и измерительных баз является важным этапом в проектировании технологического процесса, влияющим на точность и стоимость обработки. Принципы и правила назначения баз рассмотрены выше. В случае отступлений от правил и принципов выбора баз необходимо проводить расчет точности. Вопрос об оснащении данной операции приспособлением решается исходя из критериев оптимизации и особенностей выполняемой обработки. Технолог или разрабатывает техническое задание на проектирование приспособления с указанием сущности операции, эскиза заготовки, базирующих поверхностей, выполняемых размеров, станка, инструмента, режимов и т. д., или осуществляет технологическое проектирование приспособления по следующей методике: нанесение эскиза заготовки в необходимом количестве проекций; обозначение базирующих поверхностей; нанесение опорных деталей приспособления, траектории и зоны движения инструмента, точек контакта зажимных устройств, контрольных размеров; указание типа привода и степени быстродействия приспособления и некоторых других данных о приспособлении и операции, необхо-

димых конструктору для проектирования приспособления (ориентировочные усилия резания, направление их действия, марка обрабатываемого материала, габариты установочного места для приспособления на станке и т. д.). После этого технологический проект передается конструктору для проектирования и конструирования приспособления.

### **3.12. ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ, ИНСТРУМЕНТА И РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ**

Выбор средств и режимов обработки осуществляется на этапах, связанных с разработкой операций технологического процесса. При выборе станка (оборудования, установки) нужно учитывать вид обработки, точность и жесткость станка, габаритные размеры, мощность станка, технические возможности (предел частот вращения, подач и т. д.), стоимость, возможности по производительности и др.

В мелкосерийном и единичном производстве на одном станке обычно выполняются разнообразные работы, поэтому выбранный станок должен обладать широким диапазоном параметров. Этим требованиям больше удовлетворяют универсальные станки с ЧПУ или другие быстроперенастраиваемые станки. Для массового и крупносерийного производства целесообразно назначение специального оборудования.

Аналогично решается вопрос и с выбором оснастки: приспособлений и режущего инструмента. В мелкосерийном производстве применение специальной оснастки обосновывается или невозможностью осуществления операции без них (например, ступени при сборке), или экономической целесообразностью. В последние годы в мелкосерийном производстве широко применяются универсально-сборные приспособления, что выгодно как с технической, так и с экономической точек зрения. Вопрос о выборе режущего инструмента в зависимости от класса обрабатываемого материала и режимов резания хорошо освещен в литературе [1, 12]. В настоящее время разработаны методики выбора режимов обработки для различных, в том числе и новых физико-химических методов обработки; они изложены в технологических справочниках. Во всех случаях при выборе режимов обработки необходимо стремиться к наибольшей ее производительности, наименьшей себестоимости при обеспечении требуемых точностных показателей и качества поверхности.

### **3.13. НОРМИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИ ОБОСНОВАННАЯ НОРМА ВРЕМЕНИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КВАЛИФИКАЦИИ РАБОТ**

Нормированием операций называется расчет времени, необходимого для их выполнения. Нормирование операций технологического процесса является важнейшей задачей как технико-экономической, влияющей на качество и производительность работы, так и социально-общественной, влияющей на величину заработной платы и ин-



тенсивность работы рабочего. Научно-технически обоснованная норма времени — время, необходимое для выполнения операции с учетом типа производства, достижений при выполнении подобных работ в отрасли, передового опыта новаторов производства и передовых принципов технологии и организации производства. Технически обоснованная норма времени определяется расчетом и уточняется экспериментально.

В основе определения нормы времени лежит расчет штучного времени:

$$T_{шт} = T_o + T_{всп} + T_{т.о} + T_{о.о} + T_{отд}$$

где  $T_o$  — основное (машинное) время, в течение которого идет машинная обработка;  $T_{всп}$  — вспомогательное время на установку, закрепление и снятие заготовки, подвод и отвод инструмента, управление станком, измерение детали и т. д.; сумма основного и вспомогательного времени составляет оперативное время:  $T_{оп} = T_o + T_{всп}$ ;  $T_{т.о}$  — время технического обслуживания (смазка, удаление стружки, смена инструмента) определяется в процентах от  $T_o$ ;  $T_{о.о}$  — время организационного обслуживания (подготовка или уборка рабочего места и оборудования), определяется в процентах от  $T_{оп}$ ;  $T_{отд}$  — время на отдых, определяется в процентах от  $T_{оп}$ .

Время, затрачиваемое на подготовку обработки партии из  $n$  деталей (изучение чертежа, наладка оборудования, консультации, установка оснастки и т. д.), называется подготовительно-заключительным временем  $T_{п.з}$ . Штучное время, суммированное с  $T_{п.з}$ , отнесенным к одной заготовке, называется штучно-калькуляционным временем:  $T_{шт.к} = T_{шт} + T_{п.з}/n$ . Обычно во всех технологических расчетах оперируют со штучно-калькуляционным временем. Научно-технически обоснованные нормы времени по мере развития техники и организации труда и производства, приобретения рабочими опыта пересматриваются.

Определение всех слагаемых штучно-калькуляционного времени производится по нормативным таблицам для различных работ, а в случае более точного определения используют метод фотографирования рабочего дня. Для единичного (опытного) и мелкосерийного производства разработаны укрупненные нормативы для составляющих времен и различных методов обработки и сборки.

После нормирования всех операций определяется процент загрузки операций, как отношение штучно-калькуляционного времени к расчетному значению такта производства, на основании чего может быть уточнена маршрутная технология или приняты меры по загрузке рабочих мест.

Одновременно с нормированием выполняется один из ответственных этапов проектирования технологического процесса — определение разряда квалификации работы по тарифно-квалификационным справочникам, разработанным для каждой отрасли промышленности. Имея разработанный технологический процесс, можно определить и количество, и специальность основных производственных рабочих.

### 3.14. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

После окончания разработки операционной технологии и проведения нормирования по установленным методикам рассчитываются различные показатели, определяющие потребность в электроэнергии, воздухе, заготовках, инструменте и т. д.

Обычно проектирование технологических процессов заканчивается расчетом технико-экономических показателей разработанного технологического процесса по специальным методикам, установленным для отрасли; значение этих методик, а также базовых значений рассчитываемых показателей очень велико: они определяют не только уровень технологии, но и вообще уровень и культуру производства на предприятии и отрасли. Отметим, что ракетно-космическая промышленность относится к передовым отраслям машиностроения с высоким уровнем и культурой производства. Количество и названия критериев оценки технологических процессов определяются для отрасли. Эти показатели служат или для оценки уровня технологического процесса путем сравнения их значений с базовыми значениями, или для сравнения нескольких технологических процессов. Отметим, что технико-экономические показатели не заменяют, а дополняют заданные критерии оптимизации, используемые на всех этапах проектирования технологических процессов.

К технико-экономическим показателям технологических процессов относятся следующие показатели:

1) суммарное основное (машинное) время по всем  $n$  операциям

$$T_{\Sigma o} = \sum_{i=1}^n T_{oi};$$

2) трудоемкость обработки (суммарное штучное или штучно-калькуляционное время по всем  $n$  операциям):

$$T_{\Sigma шт} = \sum_{i=1}^n T_{шт i}; \quad T_{\Sigma шт.к} = \sum_{i=1}^n T_{шт.к i};$$

3) себестоимость обработки  $C_{об}$  детали по всем операциям:  $C_{об} = З + Н$ , где  $З$  — заработная плата производственных рабочих;  $Н$  — цеховые накладные расходы;

4) себестоимость детали с учетом стоимости заготовки  $M$  с вычетом суммы за сдачу отходов материала (стружки):  $C_{дет} = M + З + Н$ ;

5) коэффициент использования оборудования по основному (машинному) времени

$$\eta = T_{\Sigma o} / T_{\Sigma шт}; \quad \eta_0 = T_{\Sigma o} / T_{\Sigma шт.к}.$$

Эти коэффициенты могут определяться и для каждой операции;

6) коэффициент использования металла:  $\eta_m = Q_{дет} / Q_{заг}$ , где  $Q_{дет}$  и  $Q_{заг}$  — масса детали и заготовки;

7) коэффициент загрузки оборудования, равный отношению расчетного количества станков  $K_p$  к фактически принятому  $K_n$ :  
 $\eta_z = K_p / K_n$ ;

8) расчетная производительность технологического процесса, равная отношению фонда времени за данный период  $F$  (например, за смену или месяц) к такту выпуска, определяемому штучно-калькуляционным временем наиболее длительной операции:  $N_{рас} = F / T_{шт.к\ max}$ .

Распространенным методом оптимизации технологических процессов является выбор наиболее экономичного варианта по себестоимости с учетом заданного объема выпуска изделий. По этой методике [7, 9, 12, 16] определяются общие затраты  $C_i$  на изготовление всех  $N$  деталей объема выпуска по каждому из рассматриваемых  $l$  технологических процессов:  $C_i = A_i N + B_i$ , где  $A_i$  — текущие затраты на изготовление одной детали;  $B_i$  — общие затраты на все детали объема выпуска.

Так как общие затраты могут возрастать скачкообразно в зависимости от затрат на партию деталей внутри объема выпуска, то графики затрат  $C_i$  по различным вариантам технологического процесса имеют линейный или ступенчатый характер. Выбор варианта технологического процесса осуществляется или графическим построением общих затрат от объема выпуска для всех вариантов, или аналитически по приведенной формуле.

Выбор варианта может производиться не только по всем затратам, но и по части их, изменяющейся в каждом варианте, а в ряде случаев и по отдельным этапам изготовления вместо всего технологического процесса, что значительно упрощает выбор варианта. Аналогично производят оптимизацию технологического процесса и по другим показателям. Отметим, что применение ЭВМ и разработка методических основ машинной оптимизации позволяют рассмотреть большое количество вариантов технологических процессов по различным критериям.

Кроме приведенных могут использоваться и другие показатели, определяемые условиями производства (объем выпуска деталей в рублях на одного рабочего, на единицу оборудования и т. д.).

Для проверки правильности и стабильности технологического процесса по нему изготавливается установочная партия деталей (узлов, агрегатов), идущая на специальные испытания. По результатам испытаний делается заключение о внедрении разработанного технологического процесса и о переходе к выпуску программной продукции.

После завершения всех работ по разработке и оптимизации технологического процесса в соответствии с единой системой технологической документации заполняются предусмотренные виды документации: маршрутные, операционные и расчетно-технологические карты (для операции с использованием станков с ЧПУ), карты эскизов и схем, спецификации технологических документов, технологические инструкции, материальные ведомости, ведомости ос-

настки и др. Методы составления и условия их применения в настоящее время четко определены системой стандартов ЕСТД.

В технологической документации, особенно в операционных картах, должно быть четко, ясно, полно и однозначно изложено содержание операции, тщательно заполнены все графы карт, что является одним из самых важных условий строгого выполнения всех технологических указаний и предписаний. Правильно заполненная документация и соблюдение технологической дисциплины обеспечивают успешное внедрение разработанных технологических процессов в производство и выпуск высококачественных изделий. Как отмечал один из основоположников технологии машиностроения профессор Э. А. Сатель: «Технология — железный закон производства».

Несмотря на то что общая методика проектирования технологических процессов изложена применительно к процессам механической обработки, как к более подробно изученным, общие принципиальные положения данной методики (такие, например, как необходимость оптимизации технологических процессов по заданным критериям, взаимосвязанность этапов проектирования, связь технологических процессов с объемом выпуска, определенная этапность в проектировании технологических процессов и т. д.) справедливы и по отношению к технологическим процессам обработки физико-химическими методами, сборки, испытаний, заготовительных методов, но конкретные методики должны, конечно, учитывать специфические особенности каждого процесса.

#### **Глава 4. ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА АППАРАТОВ**

Эффективность производства характеризуется такими показателями, как срок освоения изделия (срок технической и технологической подготовки производства), цикл изготовления, производительность, стоимость изготовления, себестоимость аппарата, качество и надежность аппарата. Так как производство определяется главным образом технологическими процессами, то эффективность производства есть в то же время и эффективность разработанных технологических процессов. Космический аппарат, как и любое изделие, есть результат конструктивно-технологического (и экономического) формирования, поэтому факторы, способствующие повышению эффективности производства аппаратов, являются как конструктивными, так и технологическими. Рассмотрим основные пути повышения эффективности производства.

#### 4.1. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ АППАРАТА

Одним из самых важных факторов, определяющих эффективность производства, является технологичность конструкции аппарата — совокупность свойств его конструкции, проявляемых в возможности оптимальных затрат труда, средств, материалов и времени при технической подготовке производства, изготовлении и сборке, эксплуатации и ремонте. Под технологичностью понимают такие особенности конструкции, которые позволяют при технической подготовке, производстве и эксплуатации применять методы и процессы, позволяющие сократить трудоемкость, стоимость, материалоемкость и т. д. при обеспечении высоких эксплуатационных свойств аппарата. Для космических аппаратов, отличающихся чрезвычайной сложностью, применением дефицитных материалов, высокой стоимостью и большой трудоемкостью изготовления и испытаний, обеспечение технологичности конструкций является актуальной задачей.

В зависимости от области проявления технологичности различают следующие ее виды: *производственную технологичность* аппарата, проявляющуюся в сокращении затрат труда, средств и времени при конструкторской подготовке производства (КПП), технологической подготовке производства (ТПП), при изготовлении, сборке, контроле и испытаниях; *эксплуатационную технологичность* аппарата, проявляющуюся в сокращении затрат времени, труда, средств на техническое обслуживание, эксплуатацию и ремонт изделия. В зависимости от готовности объекта различают технологичности: изделия (аппарата), сборочной единицы (узла, агрегата, блока), детали, заготовки. В зависимости от вида объекта различают технологичность конструкции по процессу изготовления, по форме поверхности, по размерам, по материалам и т. д.

Технологичность конструкции изделия — понятие относительное. Технологичность данной конструкции аппарата может быть различной в различных условиях производства, например аппарат технологичный в условиях единичного (опытного) производства может оказаться недостаточно технологичным и недопустимым для условий массового производства. Поэтому при определении технологичности конструкций аппаратов необходимо исходить из заданных конкретных производственных условий, к которым относятся, главным образом, вид изделия, тип производства, объем и повторяемость выпуска, специализация и оснащенность производства оборудованием и оснасткой, степень механизации и автоматизации производства, применяемые в данном производстве методы и процессы изготовления, уровень квалификации основных рабочих и т. д. Поэтому конструктор, закладывающий в конструкцию определенный уровень технологичности, может выполнить эту задачу только при условии знания этих конкретных условий производства. Отметим также относительность понятия технологичности во времени: степень технологичности конструкции меняется со временем в связи с развитием техники и технологии.

Технологичность конструкции оценивается качественными или количественными показателями технологичности. К качественным относятся следующие: взаимозаменяемость, регулируемость, контролепригодность и инструментальная доступность конструкции. Качественная оценка предшествует количественной оценке и применяется для выбора варианта конструкции изделия на всех стадиях ее разработки в тех случаях, когда для выбора не требуется определения степени различия технологичности различных вариантов. Кроме того, ряд признаков, не поддающихся количественной оценке, легко оцениваются качественно (например, инструментальная доступность, удобство регулирования, возможность контроля при сборке и т. д.).

Количественные показатели технологичности делятся на основные, характеризующие наиболее важные признаки технологичности, и дополнительные, характеризующие дополнительные признаки технологичности.

К основным показателям технологичности относятся трудоемкость изготовления и технологическая себестоимость аппарата, уровень технологичности конструкции по трудоемкости и себестоимости изготовления.

К дополнительным показателям технологичности относятся *техничко-экономические показатели*: относительная трудоемкость различных работ и стадий изготовления, испытания и обслуживания по отношению к трудоемкости изготовления изделия; удельная трудоемкость различных работ по отношению к номинальному значению основного параметра; относительная себестоимость различных работ и объектов по отношению к технологической себестоимости аппарата; удельная технологическая себестоимость отдельных работ и объектов и т. д.; *технические показатели*: коэффициенты унификации объектов и стандартизации; удельная материалоемкость изделия; коэффициенты использования материала, точности обработки, шероховатости поверхности; сухая масса объекта и т. д.

По способу определения количественные показатели могут быть *общеколичественными*, определение которых производится по спецификации и чертежам (общее количество деталей и названий деталей, количество покупных единиц, потребность в материалах и т. д.); *классификационными*, для определения которых необходимо предварительно провести определенную классификацию и несложные расчеты (коэффициенты стандартизации, унификации, нормализации, использования материала, точности обработки, шероховатости поверхности; распределение заготовок по методам получения и т. д.); *расчетными технологическими*, для определения которых необходимо провести проектирование технологических процессов и достаточно сложные расчеты (себестоимость, трудоемкость, удельные себестоимость и трудоемкость объектов, потребность в оборудовании, в площадях, относительные себестоимость и трудоемкость и т. д.). Терминология, правила обеспечения технологичности отражены в стандартах ГОСТ 18831—73.

Оценка технологичности конструкции производится при решении трех задач, связанных с ее обеспечением.

1) Определение уровня технологичности конструкции по различным показателям, например, уровень технологичности конструкции по унификации, по стандартизации, по относительной трудоемкости изготовления, по удельной себестоимости объекта и т. д., для чего стандартом введено понятие базовых показателей технологичности. Уровень по отдельным показателям определяется как отношение показателя технологичности конструкции к базовому.

2) Выбор технологически оптимального варианта конструкции. Для каждого типа аппаратов с учетом условий производства разрабатывается методика выбора варианта конструкции, номенклатура показателей технологичности, учитывающих специфику конструкции и условий производства аппарата. На любой стадии разработки с помощью этих методик производится выбор оптимального варианта.

3) Одной из сложных задач конструирования является формирование конструкции аппарата и его элементов в соответствии с требованиями технологичности. Такие требования формулируются для всех стадий изготовления аппарата, в связи с чем существуют различные виды технологичности по процессу изготовления: технологичность конструкции при литье, при горячей штамповке, при холодной штамповке, при обработке резанием, при сварке, клепке, пайке, склеивании, при сборке, при контроле и испытаниях, при изготовлении из пластмасс и т. д. Кроме этого, часто формулируют требования технологичности для деталей, обрабатываемых различными физико-химическими методами, например требования к деталям, обрабатываемым электрохимическим, электрофизическими методами и т. д. Такие требования часто называются рекомендациями по технологичности конструкций; они подробно освещены в литературе [3, 5, 9, 12, 15].

Общими требованиями технологичности, справедливыми при всех способах обработки, можно назвать уменьшение общего количества и наименований деталей, уменьшение количества поверхностей со сложными обводами, увеличение числа стандартных, нормализованных, унифицированных деталей и поверхностей, повторяемых деталей, повышение коэффициента использования металла, регулируемость конструкции, контролепригодность, инструментальная доступность при обработке, сборке и контроле и т. д. К технологичности конструкции деталей и аппарата необходимо подходить и конкретно, и комплексно, так чтобы обеспечение технологичности в одной стадии (например, при заготовительных операциях) не приводило к резкому ухудшению технологичности в других стадиях (например, при механической обработке), т. е. обеспечение технологичности конструкции есть комплексная и системная задача, требующая часто оптимизации по заданным критериям с учетом конкретных условий производства.

Кроме решения этих трех задач, определение показателей технологичности конструкции производится в следующих случаях:

1) сбор статистических данных по типовым аппаратам и их элементам для установления базовых показателей;

2) построение математических моделей с целью прогнозирования технического развития конструкций изделий.

Технологичность конструкции аппарата закладывается на самых ранних и всех последующих стадиях конструктивно-технологического формирования его и является результатом сотрудничества конструктора и технолога в процессе создания аппарата. В зависимости от формы этого сотрудничества могут быть различные методы конструктивно-технологического формирования аппарата:

а) работа конструктора с последующим (после окончания работ) технологическим контролем чертежей, когда участие технолога в формировании изделия выражается в относительно небольших уточнениях конструкции с точки зрения требований технологичности;

б) работа конструктора совместно с технологом с самого начала проектирования изделия, когда технолог участвует в принятии принципиальных решений на всех стадиях формирования изделия;

в) одновременное конструктивно-технологическое формирование изделия одним инженером, являющимся одновременно и конструктором, и технологом и разрабатывающим как конструкцию изделия, так и технологию его изготовления.

Наиболее оптимальным с практической точки зрения является второй метод конструктивно-технологического формирования, который наиболее полно обеспечивает соответствие конструкции требованиям технологичности и сравнительно просто и легко осуществим.

#### **4.2. ПОНЯТИЕ О ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ПРОИЗВОДСТВА**

Понятие о предельных возможностях производства вытекает из необходимости обеспечения качества и надежности ракетно-космических систем, особенно так называемой технологической надежности, т. е. той части надежности изделия, которая обеспечивается в процессе его изготовления.

Понятие надежности изделия связано с необходимостью стабильного обеспечения в процессе изготовления заданных показателей конструкции (класса точности, шероховатости поверхностей, посадок в сопряжениях, уровня внутренних напряжений в деталях, степени герметичности и т. д.).

Предельная возможность производства — это такой показатель производства, когда при изготовлении данного изделия принятыми методами какой-то из показателей, определяющих качество (надежность) изделия, получается нестабильно, в силу того, что для данной конструкции данный технологический процесс изготовления исчерпал или почти исчерпал свои возможности по обеспечению заданного уровня показателя изделия, т. е. технологический процесс (чаще всего одна или несколько операций) работает на пределе своих возможностей по данному показателю.



Понятие о предельных возможностях производства, как это видно из определения, связано с двумя факторами: конструктивным, возникающим в стадии проектирования и, особенно, конструирования изделия, и технологическим, возникающим в стадии проектирования технологических процессов.

Обусловленность предельных возможностей производства конструктивным фактором выражается в том, что в данной конструкции предусмотрены такие конструктивные решения, которые на современном этапе развития производства или уровня производства на данном предприятии не могут быть стабильно обеспечены по каким-то показателям. Лучшим выходом из этого положения является отказ от этих решений и принятие таких, которые в данном производстве обеспечивались бы легко и стабильно. Оставление первых конструктивных решений в надежде на «тщательное», «внимательное», контролируемое изготовление приводят обычно к обеспечению показателей надежности в опытной партии изделий и даже в установочной партии серийного производства, но при переходе к серийному производству обеспечение этих показателей становится нестабильным, т. е. надежность изделия падает, кроме этого, крупным недостатком таких решений является резкое возрастание стоимости изготовления изделия.

Обусловленность предельных возможностей производства технологическими факторами выражается в том, что в спроектированном технологическом процессе в одной операции заданный показатель надежности обеспечивается не стабильно, а лишь при условии очень точного и постоянного выполнения каких-то параметров или режимов обработки. Лучшим выходом из этого положения является перепроектирование данного технологического процесса: замена нестабильной операции другой или добавление еще одной уточняющей операции (например, чистовой) позволяет легко и стабильно обеспечивать данный показатель надежности изделия. Оставление неправильного технологического процесса в надежде на тщательное контролируемое выполнение нестабильной операции, как и в первом случае, приводит обычно к обеспечению показателей в опытной и установочной партии и снижению надежности изделия в серийном производстве; в этом случае стоимость изготовления также резко возрастает.

Появление нестабильности некоторых операций при переходе на серийное (массовое) производство изделий можно объяснить тем, что тщательный контроль за режимами операции и соответствующая психологическая подготовка и мобилизация исполнителей в условиях сдачи опытной и установочной партий изделий неизбежно снижается после их успешной сдачи при переходе к текущему производству. Такая ситуация хорошо известна в производстве.

Понятие предельных производственных возможностей, на первый взгляд, связано с понятиями технологичности конструкции или оптимизации технологических процессов, но оно отличается от них по существу. Изделие, например, может быть не технологичным (например, оживальная форма корпуса вместо конической или ци-

линдрической), но при правильно спроектированном технологическом процессе стабильно обеспечиваемым по всем своим показателям. В этом случае, несмотря на трудоемкость и высокую стоимость изготовления такого корпуса, ситуации предельной возможности производства нет, т. е. все операции технологического процесса работают ниже предела своих возможностей по заданным показателям надежности. Или, например, технологический процесс может быть достаточно хорошо оптимизирован по заданным критериям (например, по себестоимости), но одна или ряд операций могут работать на пределе своих возможностей (например, фрезерование какой-либо поверхности может с трудом обеспечивать заданную шероховатость поверхности, тогда как введение дополнительной операции шлифования легко и стабильно обеспечит заданную шероховатость), т. е. будет налицо ситуация предельных производственных возможностей.

Учитывая непосредственное влияние предельных возможностей производства на надежность изделия, что особенно важно при создании ракетно-космических систем, связанном с огромными материальными затратами, необходимо считать, что показатель предельных возможностей производства является самостоятельной и одной из важнейших характеристик как конструкции изделия, так и технологии. В этом показателе, как и во многих других случаях, выражается единство и взаимосвязанность конструкции изделия с технологией и производством.

Во избежание ситуаций предельных возможностей производства необходимо для всех процессов изготовления и всех операций иметь данные об их предельных возможностях по различным показателям, чтобы учитывать их при разработке конструкции и проектировании технологических процессов.

Отметим, что предельные возможности производства не остаются постоянными, они непрерывно расширяются и возрастают вследствие как развития самой технологии, так и воздействия на производство развития конструкций машин. Принципиально новые, смелые конструкторские решения, стимулирующие развитие технологии и своевременно и закономерно встающие перед производством, безусловно, отличаются от ошибочных конструктивных решений, приводящих к ситуации предельных возможностей производства.

Таким образом, разработка конструкций изделий и технологических процессов с учетом предельных возможностей производства является одним из существенных путей повышения эффективности технологии и надежности изделий.

#### **4.3. УНИФИКАЦИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И ПРЕЕМСТВЕННОСТЬ КОНСТРУКЦИИ**

*Унификация.* В целях рационализации конструирования и производства и снижения стоимости аппаратов необходимо стремиться к сокращению типоразмеров деталей. Это осуществляется путем

приведения близких по конструкции и размерам нескольких разновидностей деталей к одной, без ущерба, конечно, для качества конструируемого изделия. Сокращение таким путем номенклатуры деталей или элементов, входящих в состав одного или нескольких изделий, выпускаемых данным предприятием, называется унификацией. Применение одних и тех же деталей в изделиях, выпускаемых несколькими однородными предприятиями, также является унификацией. Производственный эффект от унификации будет наибольшим, если изготовление унифицированных деталей сосредоточено в одном месте.

Объектами унификации являются не только детали, но и отдельные узлы и агрегаты, а также элементы деталей, их материал, размеры, допуски, параметры и технические требования.

Унификация является важным путем улучшения технологичности конструкции и оценивается коэффициентом унификации. Она позволяет поднять эффективность производства, повысить серийность производства деталей и агрегатов, что обуславливает возможность применения в мелкосерийном производстве более прогрессивной и производительной технологии и методов массового и крупносерийного производства.

*Стандартизация* — разработка и внедрение обязательных для выполнения технических документов — стандартов, которые в государственном масштабе регламентируют конструктивные формы, параметры (размеры) и нормы качества объектов стандартизации. Стандарты ограничивают многообразие объектов стандартизации за счет ограничения количества типоразмеров.

Объектами стандартизации в машиностроении являются типовые детали и части машин общего назначения (крепежные детали, подшипники, шпонки и т. д.); конструктивно-технологические элементы деталей (резьбы, проточки, фаски, элементы шпоночных и шлицевых соединений и т. д.); параметры зубчатых и червячных передач (число зубьев, модули, межцентровые расстояния и т. д.); размеры (нормальные диаметры и длины, конусности, присоединительные размеры и т. д.); материалы (химический состав, механические свойства, сортамент); основные параметры машин и механизмов (мощности, числа оборотов, передаточные отношения, габаритные размеры, массы и т. д.); нормы обеспечения точности и взаимозаменяемости (допуски и посадки, качество поверхности, классы точности); качественные характеристики машиностроительной продукции; условные обозначения и система оформления чертежей (ЕСКД); терминология и понятия; регламент проведения типовых работ (система унификации, ЕСТПП, ЕСТД и другие) и т. д.

Внедрение стандартизации обеспечивает: уменьшение трудоемкости процесса конструирования (конструкторской подготовки) вследствие сокращения количества вновь конструируемых узлов и деталей; уменьшение периода технологической подготовки производства; снижение себестоимости изделий вследствие применения сравнительно дешевых стандартных деталей, изготавливаемых в

большом количестве в специализированном производстве наиболее производительными методами; возможность широкой кооперации, международного обмена и легкой замены деталей во время эксплуатации и ремонта.

Соблюдение общесоюзных государственных стандартов (ГОСТов) является законом для всех конструкторов и технологов, связанных с применением и изготовлением стандартных конструкций.

Стандартизация элементов конструкции есть путь улучшения технологичности конструкции, для оценки которой вводится специальный показатель технологичности — коэффициент стандартизации  $K_{ст}$ , равный отношению количества стандартных объектов к общему количеству объектов без учета крепежных деталей. Кроме этого, если указан базовый показатель, то определяется и уровень технологичности конструкции по стандартизации.

*Нормализация.* ГОСТы, являясь документами для всех или многих отраслей народного хозяйства, охватывают объекты стандартизации в очень широких пределах. В то же время внутри каждой отрасли обычно используются не все типоразмеры, указанные в ГОСТе, а лишь сокращенный ряд типоразмеров. Эффективность стандартизации при применении сокращенных рядов стандартных объектов еще более возрастает. Кроме этого, упрощается функция службы материально-технического снабжения. В связи с этим на основе существующих ГОСТов составляют специальные технические документы — нормали, которые устанавливают сокращенные ряды типоразмеров стандартизованных объектов, рекомендуемые к применению на данном предприятии и данной отрасли (отраслевые стандарты — ОСТы, нормали завода, отрасли и т. д.). Составление сокращенных рядов типоразмеров объектов для ограниченного отраслью или заводом производства называется нормализацией. Она осуществляется на базе анализа выполненных конструкций, опыта их проектирования и производства. Такие нормали называются *ограничительными*.

Нормализацию иногда проводят с целью некоторого расширения сведений, имеющихся в стандарте, вводят регламентацию некоторых параметров стандартных объектов, которые не были указаны в стандарте. Такие нормали называются *расширительными*. Иногда нормали вводят с целью уточнения отдельных показателей стандартизованных объектов — *уточняющие*.

Кроме нормалей, составленных на основе общесоюзных стандартов, разрабатываются нормали на ходовые типоразмеры общих и специальных типовых деталей и конструктивно-технологических элементов, которые не охвачены стандартизацией — *оригинальные* нормали. Они создаются на базе унификации отдельных узлов, деталей и конструктивных элементов.

Согласование нормалей отдельных однородных предприятий приводит к разработке отраслевых стандартов (ОСТов). Оригинальные отраслевые стандарты часто являются основой создания новых общесоюзных ГОСТов.

Нормализованные детали изготавливаются на специализированных предприятиях в большом количестве с применением прогрессивных производственных методов обработки, поэтому их себестоимость значительно ниже, чем аналогичных специальных деталей. Каждая нормализованная деталь имеет определенное обозначение, указанное в нормали. На сборочных чертежах нормализованные детали и элементы вычерчиваются согласно их условному изображению в сборниках нормалей с указанием их обозначений на выносных линиях и в спецификациях. На нормализованные детали, применяемые в данной отрасли или предприятии, рабочие чертежи не выполняются.

Нормализация, так же как и стандартизация, является одним из путей улучшения технологичности конструкции. Нормализация оценивается также с помощью коэффициентов.

Использование при конструировании новых деталей и агрегатов уже освоенных производством изделий называется *преемственностью конструкции*. Конструктивная преемственность является частным случаем унификации и оценивается также с помощью специальных коэффициентов  $K_{п.к.}$ . Конструктивная преемственность является важным технико-экономическим фактором, ускоряющим разработку конструкций новых изделий, сокращающим сроки подготовки производства и снижающим стоимость продукции. Недооценка принципа конструктивной преемственности говорит о недостаточной конструкторской квалификации исполнителя и ограниченном знании предшествующих конструкций аппаратов.

Создание группы однородных изделий или изделий разного назначения из унифицированных узлов (агрегатов), представляющих собой самостоятельные сборочные единицы, называется *агрегатированием*. Агрегатирование дает возможность собирать изделия, выпускаемые единицами или малыми сериями, из агрегатов, имеющих принципиально одинаковые функции, изготавливаемых методами крупносерийного или массового производства. Агрегатирование уменьшает трудоемкость конструирования и производства изделий и снижает их стоимость.

Применяя стандартные и нормализованные детали, следует стремиться к их максимальной унификации в изделии и даже в данном производстве вообще.

#### 4.4. ТИПИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В цикле технической подготовки производства и освоения новой конструкции аппарата при индивидуальном проектировании технологических процессов большое место по длительности занимает проектирование технологических процессов. Другим недостатком при применении методов индивидуального проектирования является влияние на технологические процессы субъективных качеств технологов, в результате чего для одних и тех же деталей проектируются различные технологические процессы, многие из которых бывают далеки от оптимальных. Эти недостатки в значительной степени

устраняются при применении принципа типизации технологических процессов изготовления и сборки, т. е. главной целью типизации технологических процессов является сокращение сроков проектирования технологических процессов и унификация их в пределах отрасли и даже всего народного хозяйства на базе передовых методов изготовления.

Сущность типизации технологических процессов заключается в классификации деталей по различным признакам по ступенчатой иерархии и проектировании для последних, самых мелких, групп деталей — типов — единых типовых технологических процессов, которыми технологи должны руководствоваться при разработке конкретных технологических процессов. При использовании типовых процессов необходимо учитывать условия производства: тип (объем выпуска), данные об оборудовании, критерии выбора и т. д. Поэтому разработанные по типовым процессам конкретные процессы будут в деталях отличаться друг от друга, но будут оптимальны для данных условий и во всех случаях составлены в соответствии с современным уровнем техники, что обязательно учитывается при разработке типовых процессов.

Из различных методов классификации деталей наиболее известна классификация деталей, предложенная проф. А. П. Соколовским, автором идеи типизации технологических процессов. В основе его классификации лежат как конструктивные особенности деталей (конфигурация, габариты, материал, система обрабатываемых поверхностей, термообработка), так и производственные технологические особенности (оборудование, тип производства, требуемая точность и т. д.), главной из которых является основная технологическая задача (ОТЗ), представляющая собой сумму точно сформулированных требований к системе обрабатываемых поверхностей.

Основным подразделением классификации деталей считается класс, представляющий совокупность деталей, характеризующихся общностью основных технологических задач, решаемых в условиях одинаковой конфигурации этих деталей. Классы обозначают буквами, например класс В — валы (валы, оси, штоки, пальцы, штифты, штыри, цапфы и т. д.), основными технологическими задачами этого класса являются получение наружной поверхности вращения с требуемой степенью точности, получение соосных внутренних центральных каналов, образование шпоночных, шлицевых канавок и т. д. Класс А — втулки, основными технологическими задачами которого являются получение наружной и внутренней поверхностей, обеспечение их соосности, образование шпоночных и шлицевых канавок на внутренней поверхности. Класс Д — диски, К — корпуса и крестовины, Р — рычаги, П — плиты и т. д.; они характеризуются своими основными технологическими задачами. Общность ОТЗ определяет сходство технологических процессов и применяемого станочного оборудования.

Внутри класса детали разбиваются на подклассы, группы, подгруппы и т. д. по габаритам, особенностям конфигурации, термообработке и т. д. Продолжая разбивку, доходят до типа-совокупности

деталей одного класса, имеющих в основном одинаковый маршрут обработки на одинаковых станках с одинаковой оснасткой в одинаковых производственных условиях, для которых и разрабатывается типовой технологический процесс. Типовой технологический процесс разрабатывается на типовой представитель группы (тип) деталей, для изготовления которого требуется наибольшее количество основных и вспомогательных операций по сравнению с другими деталями этого типа. Типовые технологические процессы периодически, по мере развития техники и технологии, пересматриваются.

Правильное применение типизации технологических процессов позволяет кроме достижения главных ее целей повысить производительность труда и снизить себестоимость деталей, успешнее проводить унификацию и нормализацию конструкций деталей, обеспечивать более полное использование оборудования и т. д.

#### 4.5. МЕТОД ГРУППОВОЙ ОБРАБОТКИ

Метод групповой обработки — важный и актуальный путь повышения эффективности технологии, особенно для условий единичного (опытного) и мелкосерийного производства, связанных с изготовлением в цехах очень большой номенклатуры деталей малыми партиями. Метод групповой обработки связан в значительной степени с диспетчерским планированием производства в цехе и обеспечением равномерной и высокой загрузки станков и оборудования.

Сущность метода групповой обработки заключается в создании особых групп из числа производимых в цехе деталей по признаку общности применяемого оборудования и метода обработки, что определяется сходством обрабатываемых поверхностей и требований к ним (рис. 16), разработке так называемой комплексной детали, содержащей все групповые обрабатываемые поверхности всех деталей, входящих в группу, и разработке для этой комплекс-

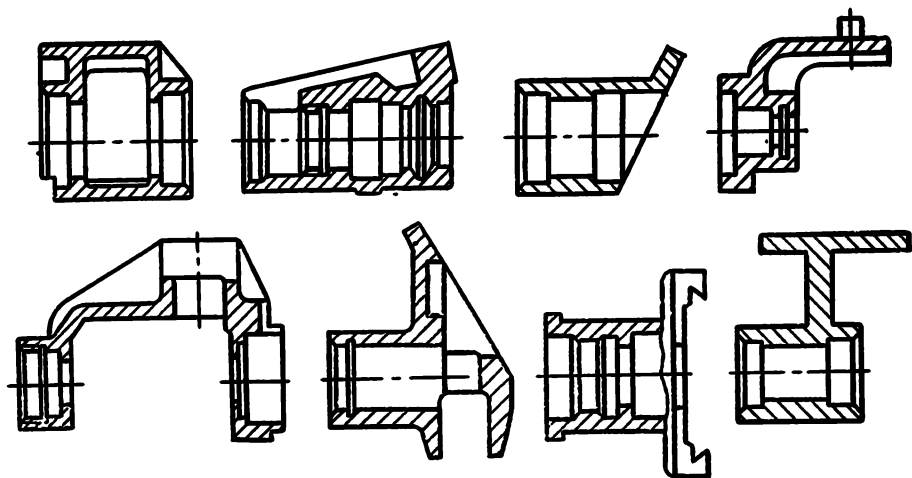


Рис. 16. Группа деталей со сходными обрабатываемыми поверхностями

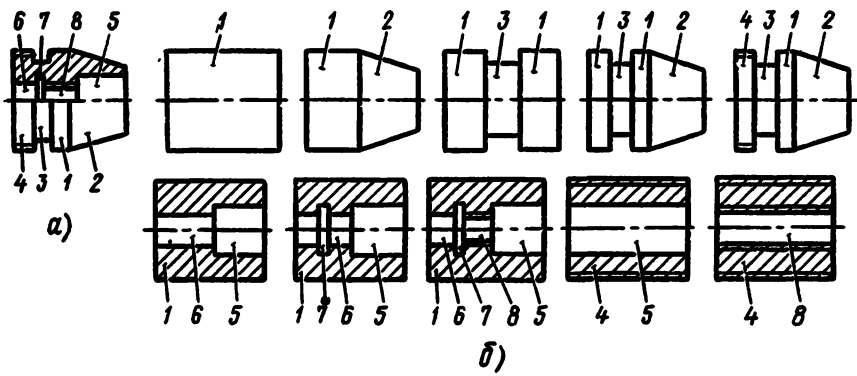


Рис. 17. Формирование комплексной заготовки:

а—комплексная заготовка; б—простые заготовки; 1... 8—элементы поверхностей

ной усложненной детали групповой наладки для данного оборудования.

Как правило, в группы объединяются, в отличие от метода типизации производства, детали не по сходству конфигурации, а по сходству обрабатываемых поверхностей, что определяет общность оборудования, оснастки и настройки станка. Поэтому одни и те же детали в процессе обработки различных обрабатываемых поверхностей могут входить в различные группы.

Комплексная деталь, на которую разрабатывается групповая операция и наладка, должна включать в себя особенности обрабатываемых поверхностей всех деталей, входящих в группу. Кроме этого, комплексная деталь должна учитывать в какой-то степени и разнообразие конфигураций деталей группы (рис. 17), так как для группы исходя из комплексной детали разрабатывается групповое переналаживаемое приспособление (и инструмент), которое с незначительной переналадкой должно обслуживать все детали данной группы. Чем большее количество деталей объединяется в группу, тем эффективнее действует этот метод. Успешным считается применение метода, когда на одном станке в течение месяца обрабатывают не более двух групп деталей; в этом случае экономически обоснованно можно создать определенную специализацию оборудования, оснастки и настройки.

Наибольшая эффективность от применения метода групповой обработки достигается, когда удается создать групповые поточные или даже автоматические линии обработки; они состоят из быстро переналаживаемого (группового) оборудования, оснастки и инструмента.

Метод групповой обработки принципиально отличается от метода типизации технологических процессов. При типизации классификация деталей основана на общности конфигурации, основной технологической задачи и маршрута обработки, а при групповой обработке на общности типа оборудования и метода обработки. Главной целью типизации является снижение времени на проекти-



рование технологических процессов и достижение их унификации, а главной целью групповой обработки — улучшение загрузки оборудования и внутрицехового планирования в условиях единичного и мелкосерийного многономенклатурного производства. Вопросы типизации производства решают для всей отрасли или народного хозяйства, создавая предварительно постоянные классы деталей и типовые процессы их обработки, а вопросы групповой обработки — для данного цеха и данной совокупности деталей, создавая гибкие группы деталей (при изменении состава деталей изменяются и группы, и настройки, и оснастка).

Правильное применение метода групповой обработки обеспечивает повышение производительности обработки за счет применения высокопроизводительной групповой оснастки, специализации рабочих мест, возможности применения станков с программным управлением, создания групповых поточных линий и других методов крупносерийного производства в условиях опытного и мелкосерийного; снижает себестоимость деталей; позволяет существенно увеличить коэффициент загрузки оборудования и улучшить внутрицеховое планирование производства, хотя внедрение этого метода требует проведения определенной подготовительной работы по группированию деталей, проектированию групповой оснастки и диспетчерско-плановой работы.

Эффективность внедрения метода групповой обработки значительно возрастает, если при проектировании деталей проводить унификацию и нормализацию обрабатываемых поверхностей и учитывать другие требования группового метода (влияние на конструкцию деталей), а при проектировании технологических процессов группировать в одном месте технологического процесса однородные операции (влияние на технологию).

#### 4.6. НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ

Повышение эффективности производства и технологии, особенно опытного и мелкосерийного производства, связано с реализацией идеи *гибкости производства* — способности быстро переналаживаться с одного изделия на другое, с одной программы на другую. Переналаживаемая технология в значительной степени связана с переналаживаемой оснасткой и переналаживаемым оборудованием. Применение переналаживаемой технологической оснастки (приспособлений и инструмента) позволяет сократить сроки технологической подготовки производства новых изделий, снизить их стоимость, повысить качество и надежность аппарата за счет возможности широкого применения точных приспособлений. Во многих случаях более 50% затрат средств и времени на техническую подготовку приходится на проектирование и изготовление технологической оснастки. Отсутствие переналаживаемой оснастки в мелкосерийном производстве приводит к широкому применению ручного труда, что

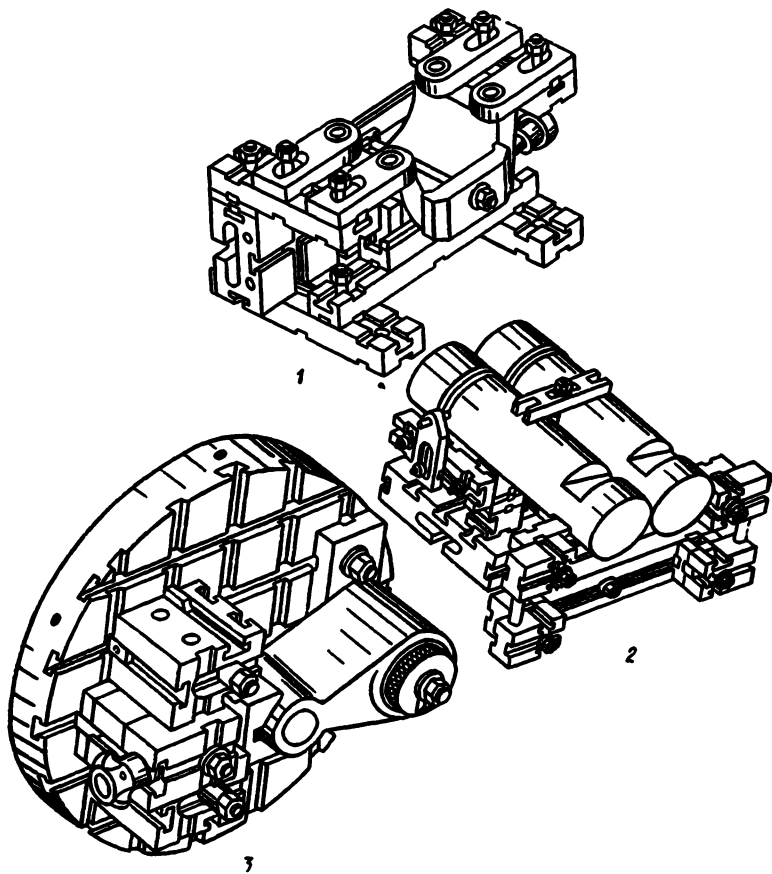


Рис. 18. Универсально-сборные приспособления:

1—сверльное; 2—фрезерное; 3—токарное

сказывается как на трудоемкости изготовления изделий, так и на их качестве.

Главным направлением проектирования переналаживаемой оснастки является применение оснастки, собираемой из нормализованных или стандартизованных элементов от сложных нормализованных корпусов и устройств до элементарных простых деталей, включая крепежные. Наиболее распространенным типом нормализованной переналаживаемой оснастки является система универсально-сборных приспособлений (УСП), собираемых из отдельных простых элементов в различных комбинациях (рис. 18). Система УСП позволяет собрать практически любую станочную оснастку, а при добавлении некоторых специфичных базовых деталей (рубильники, фиксаторы и т. д.), изготовляемых самим предприятием, и всю сборочную оснастку. Система УСП в последнее время находит все более широкое распространение в единичном (опытном) и мелкосерийном производстве; эффективность УСП определяется, с одной стороны, возможностью регулирования ряда технологичес-

ких параметров приспособлений в некоторых пределах, с другой стороны, возможностью быстрого перепроектирования и сборки приспособлений при изменении объекта производства, т. е. УСП весьма успешно обеспечивают гибкость производства.

Гибкость производства обеспечивается, наряду с переналаживаемой оснасткой, также и переналаживаемым специальным оборудованием. Быстрая переналаживаемость оборудования может быть достигнута различными средствами и методами. Агрегатные станки обладают большой гибкостью, высокой производительностью, при правильном применении хорошей экономичностью и возможностью компоноваться в переналаживаемые поточные и автоматические линии. Другим путем обеспечения гибкости оборудования является применение станков и оборудования с программным управлением и обрабатывающих центров — станков с большой концентрацией инструмента, устанавливаемого в рабочую позицию по заданной программе. Для переналадки таких станков требуется переход на другую программу, которая может храниться в памяти ЭВМ, управляющей всей системой. Подобные системы имеют максимально возможную для современных условий гибкость, особенно в сочетании с технологическими работами и манипуляторами, создавая единые робото-технологические комплексы и участки.

В последнее десятилетие ведутся работы по *автоматизации проектирования технологических процессов* с применением ЭВМ. Отличие этого направления от обычного применения ЭВМ при решении отдельных технологических задач (расчет режимов резания, точности, устойчивости процесса резания и т. д.) заключается в алгоритмизации проектирования всего технологического процесса и получения в конце решения распечатанного технологического процесса. В настоящее время существуют различные методики автоматического проектирования технологических процессов, но все они основаны на определенной кодификации исходных данных и всей необходимой для решения задачи информации, разработке методики проектирования технологического процесса и разработке алгоритма решения задачи, установлении критериев выбора (оптимизации), разработке и отладке программы для ЭВМ и разработке устройств, позволяющих осуществлять оперативную связь технолога с машиной. Автоматизация проектирования технологических процессов позволяет не только сократить сроки технологической подготовки, но и за счет оптимизации, производимой ЭВМ (перебор большого числа вариантов), повысить качество спроектированных технологических процессов.

В настоящее время разрабатывается и находится в различной стадии освоения много различных путей, повышающих эффективность технологии, как научно-технического, так и организационно-управленческого и социально-общественного характера. К ним относится такое направление, как развитие *автоматизированных систем управления производством (АСУП)*.

Рост и усложнение современного производства сделали актуальным внедрение АСУ в производство, так как старые методы управ-

ления, в значительной степени основанные на интуиции и способностях руководителя, становятся недостаточными. В настоящее время разработаны системы управления производством для различных условий, и главной задачей в этом плане является перестройка производства под разработанные системы управления. Внедрение АСУП позволяет в короткое время за счет машинной оптимизации получить наилучшее для данных условий решение задачи управления, что без применения ЭВМ было бы невозможно. Системы управления с применением ЭВМ технологическими процессами, являясь частью АСУП, в условиях частой смены объектов производства оказываются весьма эффективными, снижая до минимума время переналадки с одного объекта на другой.

К путям повышения эффективности производства и технологии относится также развиваемое в последнее время направление, связанное с расширением экспериментальных лабораторий и отделов на заводах, когда большое количество новых технологических вопросов могут быть быстро решены на заводе и внедрены в производство, а также усиление связи науки с производством.

Эффективно осуществляется принцип единого конструктивно-технологического формирования изделий в последние годы в связи с развитием научно-производственных объединений (НПО), которые позволили сблизить научные и проектные организации с производственными подразделениями, что значительно ускоряет время прохождения новых научных идей и разработок через научные и проектные организации до реализации их в производстве.

За последнее время такие научно-производственные объединения созданы во многих отраслях, в том числе и в ракетно-космической. Структура их в каждом отдельном случае различна, но, как правило, в подобные объединения включают научно-исследовательские институты, центральные проектно-конструкторские, технологические организации, экспериментальные и промышленные производственные предприятия, а также центры по подготовке и переподготовке кадров, научному обслуживанию предприятий и т. д. Концентрация таких подразделений в одном объединении с единым руководством, планированием и финансированием позволяет проводить многие стадии работы по параллельному или параллельно-последовательному принципу и сокращает сроки технической подготовки и освоения новых изделий.

Кроме рассмотренных имеется много других направлений и путей повышения эффективности производства и технологии, имеющих меньшее отношение к курсу технологии машиностроения (улучшение планирования, системы оплаты, условий производства, социальные вопросы и т. д.).

### **Изготовление типовых деталей, узлов, агрегатов. Общая сборка и испытания КА**

Состав КА по агрегатам зависит от конструкции, назначения и класса, но для современных аппаратов в большинстве случаев можно выделить следующие основные конструктивно-технологические составные элементы: 1) корпуса отсеков и солнечные батареи; 2) отсек полезной нагрузки (спускаемые, возвращаемые блоки и т. д.); 3) двигательные установки (ЖРД и РДТТ); 4) бортовая аппаратура и приборы управления; 5) бортовая кабельная сеть и другие коммуникации; 6) исследовательская аппаратура (полезная нагрузка); 7) крепеж и замковые устройства; 8) расходные материалы (горючее, окислитель, газы и т. д.). В данной книге рассматриваются не все эти элементы КА, а только относящиеся к корпусам и двигательным установкам.

Основным несущим и компоновочным элементом в конструкции КА является корпус. В силу конструктивного членения корпус КА состоит из отдельных агрегатов, составляющих конструктивно и функционально законченные и обособленные элементы. Характерной чертой большинства агрегатов является наличие корпусов, схожих по конструктивно-технологическим характеристикам и составу, что позволяет с технологической точки зрения рассматривать под понятием корпус обобщенную корпусную сборочную единицу, характеризующуюся одинаковым составом типовых характерных деталей и узлов и одинаковыми методами изготовления, независимо от того, к какому конкретно агрегату этот корпус относится. Такой подход к рассмотрению корпусов позволяет не только более кратко рассмотреть технологию их изготовления, но и выявить общие технологические характеристики и отличительные конструктивно-технологические особенности корпусов конкретных агрегатов.

Во многих случаях изготовление корпуса аппарата с обеспечением необходимых конструктивно-технологических требований связано с наибольшей трудоемкостью и стоимостью их и составляет основную задачу создания аппарата.

В общем случае корпус аппарата состоит из следующих сборочных единиц: оболочки с обшивкой и силовым набором; соединительных и установочных деталей; теплозащитных и теплоизоляционных покрытий (ТЗП и ТИП); переходных элементов; солнечных

батарей. В конструкциях конкретных отсеков могут отсутствовать те или иные элементы.

Основным конструктивно-технологическим элементом корпуса является оболочка. Оболочки корпусов современных аппаратов — жесткие конструкции, постоянно сохраняющие свои размеры, изготовленные из металлических (чаще), композиционных (реже) или сочетания металлических и композиционных материалов. Они являются основным базовым, несущим и защитным элементом корпуса КА, определяющим его форму и размеры. Почти всегда они являются также и основным компоновочным элементом конструкции корпуса, соединяющим воедино указанные выше сборочные единицы. Часто оболочка должна обеспечивать герметичность отсека и выполнять теплозащитные и теплоизоляционные функции. По наличию в конструкции тех или иных элементов, степени членения и особенностям технологического формирования оболочки можно разбить на следующие типы:

1. Сборные оболочки, состоящие из обшивки и деталей поперечного и продольного силового набора, чаще всего панелированной конструкции, когда сами панели собираются из отдельных элементов.
2. Монококовые оболочки, состоящие из одной обшивки.
3. Слоистые оболочки, состоящие из обшивок и заполнителей различного типа.
4. Оболочки, собираемые из монолитных панелей.
5. Каркасные корпуса — оболочки.

## **Глава 1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И СБОРКА СБОРНЫХ ОБОЛОЧЕК КОРПУСОВ**

Основными элементами сборных оболочек являются: обшивки, обечайки, детали силового набора, мелкие соединительные и установочные детали, панели сборной конструкции.

### **1.1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБШИВОК**

*Обшивкой* называется наружный листовой элемент оболочки, служащий для придания ей определенной (например, обтекаемой) формы и участвующий в восприятии аэродинамической нагрузки. Жесткие обшивки, применяемые в аппаратах, изготавливаются из достаточно жесткого листового материала; они могут сопротивляться нормальным и касательным силам и работать на все виды нагрузки. В настоящее время при проектировании и расчете оболочек обшивки учитывают как несущий силовой элемент конструкции.

К обшивкам предъявляются высокие требования, особенно по качеству поверхности листов обшивки и по точности и форме их внешних обводов, получающихся после формообразующих операций. Иногда высокие требования предъявляются и к точности размеров самих обшивок.

Материалами для обшивок аппаратов служат алюминивно-магниевые (АМг-3, АМг-6, Д16М, Д16АТ и др.), магниевые (МА1, МА8), титановые сплавы (ВТ1-2, ВТ6С, ОТ4, ОТ4-1), стали (12Х18Н9Т, Х17Н2, 30ХГСА, 12Х21Н5Т и др.), композиционные и другие материалы (например, сплавы бериллия). Марка материала назначается исходя из суммы конструктивных, технологических и экономических требований конструктором. В настоящее время для обшивок корпусов наиболее употребительными материалами являются алюминивно-магниевые (АМг6, АМг6М, Д16М) и титановые сплавы. Заготовки из этих материалов поставляются в виде листов толщиной от 1 до 12 мм и более. Класс применяемых материалов влияет на технологию изготовления обшивок, поэтому он может служить основанием для их классификации.

Наибольшее влияние на технологию изготовления обшивок оказывают форма и габариты обводов, в зависимости от чего можно рассматривать четыре группы обшивок: 1) плоские; 2) одинарной кривизны; 3) крупногабаритные двойной кривизны; 4) малогабаритные сложной формы.

Существенное влияние на технологию изготовления обшивок оказывают форма контура обшивок по кромкам и наличие в них окон, люков, вырезов, рифтов, зиггов и других местных усложнений формы.

Общая схема построения технологического процесса изготовления обшивок содержит следующие этапы: 1) вырезка плоской заготовки по заданной геометрии развертки и зачистка кромок; 2) формование плоской заготовки в криволинейную; 3) изготовление окон, рифтов и других усложнений формы, сверление отверстий и т. д.; 4) окончательная калибровка формы обшивки; 5) окончательная обрезка кромок контура обшивки под размер и обработка кромок; 6) контроль обшивок; 7) нанесение покрытий.

*Плоские обшивки*, наиболее простые в изготовлении и наиболее технологичные по конструкции, в корпусах небольших КА применяются часто. Изготовление их заключается в разрезке плоских листовых заготовок под заданный размер, и во многих случаях они являются полуфабрикатом для получения обшивок с криволинейными обводами, поэтому отметим методы их раскроя.

Для обшивок с прямолинейным контуром из листов небольшой толщины наибольшее распространение получил метод раскроя на гильотинных ножницах, хотя точность его и качество кромок обшивок не очень высоки. При раскрое толстых листов из титановых или других высокопрочных сплавов, склонных к выкрашиванию и трещинообразованию, применяют подогрев заготовок до 600... 700° С.

Раскрой крупных обшивок значительной толщины с более высокими требованиями по точности кромок производится на фрезерно-обрезных станках, например модели ФОЛ-2. Для обшивок с криволинейным контуром наиболее распространенным методом раскроя является фрезерование заготовок по разметке или по шаблонам пальцевой фрезой на вертикально- и радиально-фрезерных

станках или копировально-фрезерных полуавтоматах (ДФ-97, ОС-6, КСФ-1М).

Кроме указанных в опытном и мелкосерийном производстве применяется метод раскроя обшивок с криволинейными контурами с помощью различного рода ножниц: вибрационных (стационарных и ручных), дисковых (роликовых) или для доводочных раскройных работ настольных рычажных ножниц с криволинейными ножами. Раскрой на ножницах менее производителен и менее точен, чем механическое фрезерование. Достижимая точность при криволинейном раскрое на ножницах 7...9 класс, а класс шероховатости 2...4 (по ГОСТ 2789—73).

При криволинейном раскрое обшивок из титановых сплавов, нержавеющей и жаропрочных сталей, кроме различного вида ножниц, применяются ленточные пилы с зубьями и фрикционные (не имеющие зубьев); последние имеют большую (в 10...15 раз) стойкость. Для этих материалов широко применяются и высечные ножницы, на которых производится последовательная просечка обшивки по контуру с последующей зачисткой кромок фрезерованием. Все эти способы можно выполнять как по разметке, так и по шаблонам.

Обшивки малых размеров с прямолинейными и особенно со сложными криволинейными контурами в условиях массового или крупносерийного производства изготавливаются вырубкой в штампах различной конструкции. Преимуществами этого метода раскроя являются высокая производительность, большая точность, низкая квалификация исполнителей и возможность экономного использования листовых заготовок. Препятствием для широкого применения этого метода в опытном и мелкосерийном производстве является достаточно высокая стоимость штампов и оборудования, а также значительное время подготовки производства. После операции раскроя производится обработка и зачистка кромок обшивок на фрезерных станках.

*Обшивки одинарной кривизны* также изготавливаются из листовых заготовок. После резки и разделки кромок плоские заготовки поступают на операцию формования в криволинейную форму. Обшивки этой группы по форме обводов могут быть цилиндрическими или коническими, в некоторых случаях усложненными окнами, зигами и т. д.

Основным способом формообразования криволинейных обшивок этой группы является гибка, которая производится прокаткой в трехвалковых станках типа КГЛ (КГЛ-1м, КГЛ-2, КГЛ-3) и ЛГС-10 или в четырехвалковых станках типа ГЛС (ГЛС-2к, ГЛС-4 и др.). На указанных станках можно получать обшивки с переменным радиусом кривизны по заданной программе. Конические обечайки получают на этих же станках, устанавливая гибочный валок под определенным углом к опорным.

Некоторые из указанных выше станков (ЛГС-10, ГЛС-12) позволяют, благодаря наличию универсального гибочного пуансона, гнуть обшивки не только прокатыванием в валках, но и в пере-



движку опусканием в автоматическом режиме универсального пуансона, подобно лентогибочным прессам, когда нижние гибочные валки выполняют роль двухопорной матрицы. При различном шаге подачи концов заготовки получается коническая обшивка. Гибку обшивок можно производить и на листогибочных прессах, используя универсальные штампы. Кроме гибки обшивки одинарной кривизны могут изготавливаться и обтяжкой.

После гибки (формообразования) производится сверление отверстий в обшивках, прорезка окон или лючков пальцевой фрезой или их вырубка с помощью штампов, например на листогибочных прессах с механическим или электромагнитным креплением пуансонов и матрицы. После этого обрабатываются другие осложнения форм в конструкциях обшивок, затем производится окончательная доводочная калибровка обшивки и чистовая обрезка кромок контура фрезерованием.

Завершающими операциями изготовления обшивок являются окончательный контроль формы и размеров по контуру, а также качества поверхности и кромок, и нанесение защитных покрытий: оксидирование (магниевого сплава) или анодирование (алюминиевого сплава).

*Обшивки двойной кривизны* в современных КА находят не очень широкое применение, за исключением деталей типа днищ. При единичном и опытном производстве целесообразно применение метода выколотки на пневмомолотах, при мелкосерийном и опытном производстве применяется метод последовательной местной деформации, а при серийном производстве наиболее рациональным методом изготовления считается обтяжка на обтяжных прессах и в ряде случаев гидроформование.

Обтягиванием по пуансону (обтяжкой) называется процесс формообразования (одновременная гибка и растяжение) деталей двойной кривизны из листовых плоских заготовок профилированным пуансоном при заземленных кромках заготовки. Степень деформирования листовой заготовки при обтяжке достаточно достоверно характеризуется коэффициентом обтяжки  $K_{обт}$  — отношение длины контура наиболее растягиваемого сечения детали после обтяжки к длине того же сечения до обтяжки. Коэффициент обтяжки на каждом переходе должен быть меньше предельного значения, при котором материал начинает разрушаться в наиболее напряженных сечениях. Так как, вследствие значительного утонения и нагартовки материала, обтяжкой можно получить лишь весьма неглубокие детали, то во многих случаях на обтяжку поступают заготовки, предварительно прошедшие гибку с приближением к форме детали, или же обтяжка производится в несколько переходов с термообработкой между ними. Иногда для увеличения коэффициента обтяжки применяется нагрев полуфабриката на металлических пуансонах с отверстиями для трубчатых электронагревателей.

Для повышения производительности и коэффициента использования металла применяется групповая обтяжка, когда из одной обтягиваемой заготовки получают разрезкой несколько деталей, или пакетная обтяжка, когда на одном пуансоне обтягивается несколько наложенных друг на друга заготовок.

Обтяжка обшивок может выполняться по двум схемам. При простой обтяжке (на прессах ОП-2, ОП-3, ОП-5К, ОП-1000) заготовка закрепляется в зажимах, после чего подается пуансон и происходит обтягивание. При обтяжке с предварительным растяжением (на прессах РО-1, РО-3, ОП-5К, ОП-60М, ОП-1000, РО-5) заготовка закрепляется в зажимах, предварительно плоско растягивается, а далее подается пуансон (поднятием стола) и осуществляется обтягивание. Методы простой обтяжки применяются при формообразовании небольших по размерам обши-

вок. При изготовлении крупногабаритных обшивок применяются методы обтяжки с растяжением.

Обшивки двойной кривизны после операции формообразования подаются на операции обработки местных усложнений формы: сверление отверстий, изготовление окон, люков, прокатки рифтов, зигов и т. д. Для обшивок двойной кривизны окончательная доводочная операция (калибровка) является обязательной почти во всех случаях. Она в большинстве случаев производится теми же методами, что и основная операция формообразования. После этого производится окончательная обрезка кромок по контуру обшивки и их зачистка. После операции контроля на обшивки наносятся защитные покрытия.

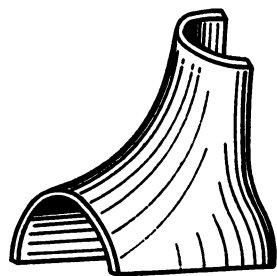


Рис. 19. Малогабаритная обшивка сложной формы

*Малогабаритные обшивки сложной формы* в конструкциях современных КА встречаются не очень часто. Процесс их изготовления содержит основные типовые операции изготовления обшивок. Конструктивно они могут иметь очень сложные обводы (например, рис. 19), переменную, иногда разного знака, кривизну. В качестве основной операции формообразования обшивок этой группы в опытном и единичном производстве применяется метод выколотки или ручной посадки на пуансонах; в серийном производстве наиболее часто применяется метод штамповки-вытяжки в несколько переходов с последующей доработкой формы. В некоторых случаях для обшивок двойной кривизны находит применение метод формообразования их взрывной штамповкой, который особенно эффективен для обшивок из высокопрочных сталей и титановых сплавов значительной толщины.

Рассмотренные методы изготовления обшивок различных групп обеспечивают достаточно высокое их качество и высокую производительность труда в различных условиях производства.

Для эффективного применения рассмотренных процессов конструкции обшивок должны удовлетворять ряду технологических требований: 1) угол между нормальными, проведенными к двум любым точкам поверхности обшивок, должен быть меньше  $180^\circ$ , иначе формообразование обшивок на копировально-гибочных станках, обтяжных и растяжно-обтяжных прессах невозможно; 2) обшивки не должны иметь местных выштамповок с резко отличными радиусами кривизны. Если же в них имеется необходимость, то их выполняют в виде отдельных деталей, а в обшивках предусматривают окна; 3) с точки зрения технологичности конструкций необходимо избегать больших обшивок с переменными и, особенно знакопеременными, радиусами кривизны; 4) следует иметь в виду, что изготовление обшивок двойной кривизны, особенно больших габаритов, обходится в 4...8 раз дороже, чем одинарной кривизны; 5) габариты обшивок должны соответствовать возможности формообразующего оборудования.

## 1.2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБЕЧАЕК

Обечайкой называется замкнутая листовая деталь оболочки корпуса заданной конфигурации, формирующая внешний обвод оболочки. Функциональное назначение и требования к обечайкам такие же, как и к обшивкам; часто они собираются из нескольких формованных листов обшивки. Особым классом являются обечайки, изготовленные из монолитных панелей.

По форме обводов обечайки можно разбить на цилиндрические, конические и двойной кривизны (оживальной формы); изредка встречаются обечайки фасонной формы. По наличию продольного (сварного или клепаного) соединения они могут быть бесшовными или с продольным швом. Часто обечайки сборных оболочек имеют два или несколько продольных швов, возможны обечайки, имеющие и поперечные швы. В тех случаях, когда габариты оболочек велики, целесообразнее предварительно собирать листы обшивки с силовым набором, получая жесткие панели, с последующей сборкой их в оболочку\*. В этом случае точность и производительность изготовления выше, а технология (особенно оснастка) оказывается проще.

Главным конструктивно-технологическим фактором, влияющим на общую схему изготовления обечаек, является наличие или отсутствие продольного соединения в обечайке.

Схема изготовления обечаек с продольным швом состоит из следующих этапов: 1) раскрой листовых плоских заготовок по заданным размерам с помощью шаблонов или без них с последующей обработкой кромок; 2) гибка цилиндрических или конических обечаек рассмотренными выше методами (операция формообразования); 3) изготовление местных усложнений формы; 4) сварка или клепка продольного шва с последующей обработкой сварных швов; 5) для обечаек двойной кривизны и фасонных обечаек — формообразующая операция (штамповка, штамповка взрывом, ротационная обработка и т. д.); 6) окончательная калибровка формы и доводка кромок; 7) контроль и консервация.

Во многих случаях после формообразующих и сварочных операций вводят операцию химического фрезерования (химического травления) с целью облегчения обечаек за счет снятия металла с поверхности и образования усиления по сварным швам, которые при травлении защищают экранами. Усиленные сварные швы обеспечивают равнопрочность конструкции по стенкам и швам.

Схема изготовления бесшовных обечаек определяется принятым методом формообразования как основным этапом их изготовления.

---

\* Под обечайкой мы понимаем замкнутую без силового набора обшивку. Замкнутую обшивку с силовым набором мы называем оболочкой сборной конструкции. Незамкнутые обшивки с прикрепленным силовым набором мы называем панелями сборной конструкции. В литературе иногда встречаются иные определения.

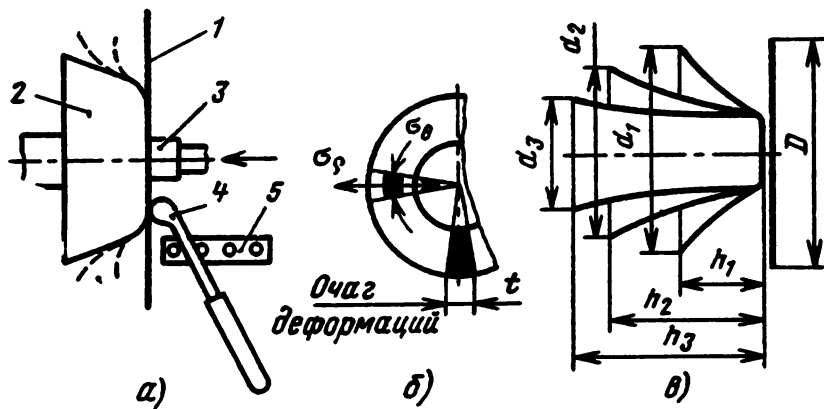


Рис. 20. Схема выдавливания на токарно-давилном станке:

а—схема процесса; б—перетекание металла заготовки; в—переходы при выдавливании конического стакана; 1—заготовка; 2—оправка; 3—центр; 4—давилник; 5—гребенка

Одним из известных методов формообразования полых листовых деталей, к которым относятся бесшовные обечайки, является вытяжка их из листа в штампах. При изготовлении обечаек в основном применяется вытяжка без утонения стенок. Этот метод отличается высокой производительностью и точностью. Вследствие значительной стоимости штампов он применяется в серийном и крупносерийном производстве. Этим методом можно получать обечайки цилиндрической, конической и оживальной формы, ступенчатые обечайки малых и средних габаритов.

При вытяжке на одном конце обечайки получается днище, которое в дальнейшем отрезается на токарном станке. Вытяжка обычно производится в холодном состоянии, но при обработке малопластичных материалов (алюминиево-магниевого, магниевые или титановые сплавы) для увеличения коэффициента вытяжки в ряде случаев применяется подогрев (до 400... 600° С) заготовок в специальных штампах с нагревателями. При изготовлении обечаек вытяжка производится в несколько переходов с промежуточными отжигами заготовок. Число переходов подсчитывается исходя из допустимых коэффициентов вытяжки для данного материала. Ограничениями этого метода являются габариты обечаек, высокая стоимость штампов и длительный срок подготовки производства.

В последние годы находят широкое применение в производстве ротационные методы изготовления бесшовных обечаек: обкатка и раскатка.

**Обкатка** (выдавливание, токарно-давилная обработка) производится на специальных токарно-давилных станках, у которых вместо суппорта установлено устройство с давилником (рис. 20). Высота центров позволяет получать детали диаметром до 800 мм и более.

В большинстве случаев исходной заготовкой при обкатке является листовая заготовка в виде диска с расчетным диаметром. Заготовками при обкатке могут быть также цилиндрические и конические обечайки, полученные другими способами, например гибкой и сваркой; из них после обкатки получают оживальные обечайки с криволинейными образующими или с суженными торцовыми сечениями.

При обкатке толщина заготовки практически не изменяется, материал ее перетекает в каждый момент на узком участке заготовки по установленной оправке. Степень деформации заготовки (отношение высоты  $h$  к диаметру  $d$ ) определяет количество переходов при обработке с промежуточными отжигами. Для уменьшения трения используется смазка в виде различных масел. При обработке обечаек из титановых или магниевых сплавов может применяться подогрев заготовки с помощью горелок. Точность обкатки 0,01 ... 0,02 диаметра; шероховатость обработанной поверхности 7 ... 9 класс. К основным режимам обработки относятся частота вращения и подача, которые подбираются и уточняются экспериментально. При обкатке необходимо проводить сплошной контроль по толщине детали. Для обкатки разработаны полуавтоматические станки с гидравлической подачей давяльника, программируемой с помощью копиров, что позволяет исключить тяжелый квалифицированный ручной труд, обеспечить стабильные усилия обкатки и повысить точность и стабильность процесса.

**Раскатка** (ротационная обработка давлением, ротационное выдавливание, выдавливание роликами, выдавливание с утонением) является другим известным способом ротационных методов обработки. Заготовками являются плоские диски или предварительно отформованные полуфабрикаты, которые закрепляются между пинолью задней бабки токарно-давяльного станка и оправкой, контур которой соответствует внутренней поверхности детали. При осевой подаче роликового давяльника материал заготовки, деформируясь, растекается по поверхности оправки.

Различают схемы прямого, когда материал течет в направлении подачи, и обратного выдавливания, когда материал заготовки, ограниченной со стороны передней бабки, течет в направлении, обратном подаче роликов. Раскатка отличается от обкатки тем, что в этом случае заготовка в процессе обработки утоняется. Степень утонения определяется пластическими свойствами обрабатываемого материала, в зависимости от чего может быть определено количество переходов с отжигами между ними. В ряде случаев при обработке высокопрочных материалов применяется раскатка с местным нагревом заготовки газовыми горелками, перемещающимися вместе с суппортом. Рекомендуемые режимы раскатки (подача 0,1 ... 0,25 мм/об, окружные скорости 20—25 м/мин) уточняют экспериментально. При обработке высокопрочных материалов применяют специальные смазки и покрытия с целью уменьшения усилий раскатки.

Технологические возможности раскатки с утонением, особенно на современных станках-полуавтоматах (СДГ-20, ЗР-53, ТТ-53, ТТ-76), весьма значительны: этим методом можно изготовить бесшовные тонкостенные высокопрочные обечайки цилиндрической, конической и оживальной формы с наружным и внутренним оребрением из высокопрочных, жаропрочных и нержавеющей сталей, сплавов никеля, молибдена, титана и алюминиевых и магниевых сплавов.

Ротационные методы обработки (обкатка и раскатка) рекомендуются для мелкосерийного и серийного, но могут применяться также и в крупносерийном производстве, особенно в период подготовки таких методов изготовления, как вытяжка в штампах. Отметим, что изготовление бесшовных обечаек этими методами уменьшает массу обечаек на 10 ... 20% и в результате упрочнения повышает механические свойства исходного материала до 40 ... 60%.

Для изготовления цилиндрических и конических обечаек с криволинейными образующими применяется метод формования их разжимными пуансонами (кольцевая обтяжка). Этот метод рентабелен при мелкосерийном и серийном производстве благодаря тому, что промышленностью выпускаются специальные конструкции универсальных разжимных пуансонов и прессов типа ПКД, кото-

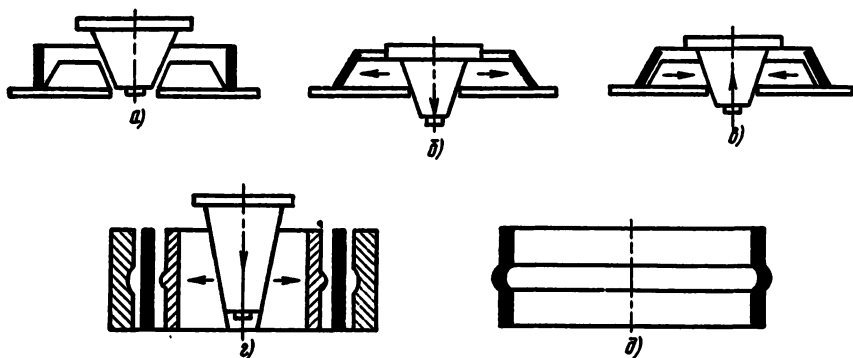


Рис. 21. Схемы формообразования радиальным растяжением конусной заготовки:

а—нагружение; б—радиальное растяжение; в—разгрузка; цилиндрической заготовки с рельефом; г—схема растяжения; д—готовая деталь

рые позволяют получать обечайки до 1600 мм диаметром и 1000 мм высотой. Этот метод применим также для изготовления обечаек из высокопрочных и нержавеющей сталей и сплавов, а также сплавов титана, никеля и т. д., достаточно разнообразной конфигурации (рис. 21). При отработке технологии во избежание огранки необходимо или увеличивать число секторов (до 12... 18), или формовать обечайку в несколько переходов, проворачивая их между переходами.

Для изготовления цилиндрических, конических и фасонных обечаек с днищами и без днищ в условиях мелкосерийного и даже крупносерийного производства находят возрастающее применение импульсные методы штамповки: взрывом (бризантными ВВ, порохами, взрывчатыми газовыми смесями), электрогидравлическая, электромагнитная, виброштамповка. Технологические возможности и области применения импульсных методов штамповки весьма широки. Они особенно выгодны и эффективны при изготовлении крупногабаритных обечаек со значительной толщиной стенок из высокопрочных сталей и сплавов, когда другие методы непригодны вследствие недостаточной мощности.

Для изготовления крупных обечаек из малопрочных материалов, имеющих малые толщины и плавные очертания, в мелкосерийном и опытно-производстве применяется метод статической штамповки жидкостью (гидроштамповка, гидроформовка). Этим методом получают крупные обечайки с криволинейными образующими и с суженными входными сечениями. В серийном производстве для обечаек небольших диаметров может применяться разновидность гидроштамповки — гидромеханическая штамповка, позволяющая уменьшить число переходов и имеющая ряд преимуществ. Метод гидроштамповки малопроизводителен вследствие длительного времени подготовки операции, но в опытно- и мелкосерийном производстве экономически эффективен. Аналогичными технологическими возможностями обладает формовка резиной (штамповка резиной) и ее разновидность гидрорезиноштамповка, обладающая рядом преимуществ. При изготовлении обечаек эти методы применяются ограниченно.

Рассмотренные основные методы формообразования служат для изготовления бесшовных обечаек, хотя многие из них могут применяться для переформовки цилиндрических или конических обечаек с продольными сварными швами.

В соответствии с общей схемой изготовления обечаек после формообразующих операций изготавливаются различные местные усложнения формы и кромки. Почти во всех случаях, особенно для

фасонных обечаек, требуется операция калибровки одним из рассмотренных выше способов (вытяжка, штамповка взрывом, ротационная обработка, гидроштамповка, кольцевая обтяжка) для придания окончательной формы обечайке. После этого производятся окончательная слесарная доработка, контроль, покрытие и консервация.

### 1.3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ СИЛОВОГО НАБОРА

Корпуса аппаратов в большинстве случаев относятся к балочным конструкциям, поэтому их оболочки кроме обшивок имеют силовой набор: продольные (стрингеры, лонжероны) и поперечные (шпангоуты, нервюры) силовые элементы. Кроме них в конструкции оболочек имеются мелкие соединительные элементы типа уголков, фитингов, кронштейнов, накладок, стенок и т. д., имеющих жесткую конструкцию.

Детали силового набора обычно изготавливаются из тех же материалов, что и обшивка во избежание дополнительных внутренних термических напряжений при аэродинамическом нагреве; в тех случаях, когда основные силовые элементы (стыковочные шпангоуты, силовые стрингеры, лонжероны) изготавливают из более прочных материалов, необходимо подбирать пары материалов с близкими значениями коэффициента линейного расширения.

*Стрингеры* представляют собой элементы продольного силового набора, работающие на осевые нагрузки и поперечный изгиб и служащие для подкрепления обшивки, увеличивая ее жесткость. Для создания жесткой монолитной конструкции оболочки стрингеры в ряде точек соединяются с поперечным набором (шпангоутами или нервюрами) с помощью мелких соединительных деталей или отбортовок шпангоутов. Стрингеры делятся на силовые, когда они проходят вдоль всего корпуса или отсека, и вспомогательные, местные: для окантовки люков, местного увеличения жесткости обшивки или крепления каких-либо деталей. Стрингеры конструктивно представляют собой обычно профили различного сечения (рис. 22). Их можно классифицировать по форме сечения, а также по количеству входящих в них деталей: простые профильные стрингеры и сложные сборные конструкции, состоящие из нескольких продольных деталей, собранных клепкой или сваркой.

Схема изготовления стрингеров зависит от вида исходной заготовки и количества входящих в конструкцию деталей. В качестве заготовок могут служить стандартные профили (катаные или пресованные) или листы; в редких случаях стрингеры могут фрезероваться из брусков квадратного или прямоугольного сечения. В общем случае схема изготовления стрингеров состоит из следующих этапов: 1) разрезка (раскрой) листа в ленту; 2) прокатка листа по профилю; 3) резка профилей по длине; 4) слесарная зачистка заусенцев и клеймение; 5) правка на прессах или плите от винтообразности; 6) обработка усложненной формы (обрезка скосов, радиусов, торцовка, изготовление местных вырезов и т. д.); 7) малковка

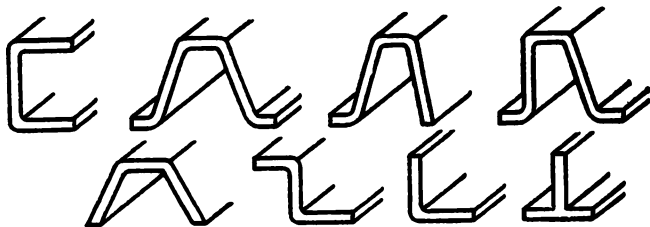


Рис. 22. Типовые сечения стрингеров

и подсечка; 8) гибка (прокатка) по заданной плазовой кривой; 9) пробивка или сверление отверстий в полках; 10) термообработка; 11) подсечка концов, слесарная доработка; 12) нанесение покрытий; 13) контроль размеров, прямолинейности, соответствия плазовому обводу. Когда исходной заготовкой является стандартный профиль, операции 1 и 2 отсутствуют. Если стрингер прокладывается по прямолинейному обводу, то отсутствует операция 8.

Рассмотрим некоторые этапы изготовления стрингеров. Когда заготовкой является катаный лист, раскрой его по заданным размерам производится одним из рассмотренных выше способов, после чего производится зачистка кромок. Прокатка листа (ленты) по профилю производится на специальных профилегибочных станках, у которых профиль задается формой роликов. Здесь же производится обрезка полок. После прокатки профили имеют винтообразную извернутость и прогиб, поэтому вводится операция правки на прессах или на плите вручную. Разрезка профиля в размер в зависимости от требований и условий производства осуществляется в штампах (универсальный и высокопроизводительный метод), на анодно-механических станках (точный и экономичный метод, особенно для разрезки высокопрочных сталей и сплавов), маятниковых дисковых пилах (профилей из алюминиевых сплавов), на передвижных пневматических пресс-ножницах (в опытно и мелкосерийном производстве при небольших сечениях профилей), абразивных отрезных станках. После разрезки требуется зачистка кромок и окончательная правка (рихтовка) профилей от винтообразностей. Местные осложнения формы (скосы, радиусы, вырезы и т. д.) выполняются или в штампах, или на вертикально-фрезерных станках (ДФ-97). Малковка производится в специальных штампах, на профилеразводных станках или прокаткой в роликах. Подсечка профилей производится в штампах.

Одной из основных операций при изготовлении криволинейных стрингеров является гибка их по заданной плазовой кривой. Сложность операции гибки заключается в необходимости сохранения устойчивости полок профилей и уменьшения закручивания. Наибольшее распространение нашла прокатка в роликовых профилегибочных станках, которые могут работать по трем схемам: трехроликовой симметричной (а), трехроликовой несимметричной (б) и четырехроликовой (в) (рис. 23), являющаяся наиболее распрост-



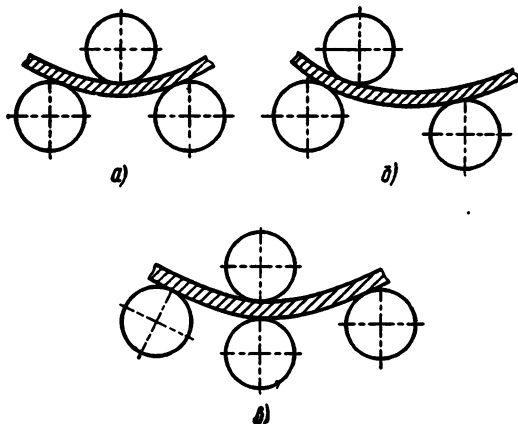


Рис. 23. Методы гибки

применяется нагрев, что кроме уменьшения усилий гибки обеспечивает также устранение или значительное уменьшение закрутки профиля. Недостатком этого метода является значительное число переходов с контролем после каждого перехода с помощью шаблонов.

Распространенным методом гибки стрингеров является метод *гибки с растяжением* на специальных станках типа ПГР-6, ПГР-7, ПГР-8, при котором заготовка вначале растягивается растяжными гидроцилиндрами, после чего в растянутом состоянии обтягивается по пуансону гибочным гидроцилиндром. Точность при этом выше, чем при свободной гибке. Это объясняется тем, что в этом случае в поперечном сечении профиля действуют напряжения одного знака (растяжения) и разность напряжений на наружных и внутренних волокнах уменьшается, что приводит к уменьшению пружинения.

Еще более высокая точность обработки достигается тремя переходами: предварительной гибкой, отжигом и калибровкой. При гибке титановых и стальных высокопрочных профилей эффективно применение нагрева, что снижает усилие формообразования до 5 раз. Существующие станки позволяют получать стрингеры длиной до 9000 мм. Метод достаточно точен и производителен.

Для изготовления стрингеров небольшой длины применяется метод *гибки в штампах* за один или при большой кривизне за два перехода. Метод производителен и точен, но требует длительной подготовки (изготовление, наладка штампов), поэтому эффективен в крупносерийном производстве. Для гибки профилей со сложными сечениями рекомендуются клиновые штампы. Недостатком их является высокая стоимость, большое влияние износа штампов на точность работы и потребность в мощных прессах.

В производстве применяется метод *гибки проталкиванием в фильеру* на прессе ППФ-1, когда профиль проталкивается с помощью гидравлического устройства в криволинейный ручей фильеры, имеющей поперечное сечение, аналогичное изгибаемому профилю и кривизну, аналогичную кривизне готовой детали. Опсрация может выполняться с нагревом для уменьшения закрутки. Пресс ППФ-1 развивает усилие до 50 т, обеспечивает обработку стрингеров с сечением  $180 \times 120$  мм, толщиной до 12 мм и наименьшим радиусом изгиба 700 мм. Метод прост и производителен и вследствие большой стоимости фильер рекомендуется для крупносерийного производства.

При изготовлении криволинейных стрингеров с полками на наружной стороне применяются *гибки раскаткой и ударным раздавливанием полок*, суть которых состоит в деформировании сжатием (прокатыванием в роликах или раздавливанием ударом бойков) горизонтальных полок, вследствие чего они, удлиняясь, изгибают профиль. Промышленность выпускает профилераскаточный станок ПРС-1, позволяющий раскатывать полки толщиной до 10 и шириной до 80 мм, и ударный

раненным и производительным методом гибки и обладающая большими технологическими возможностями. Современные станки (ПГ-6, ПГ-5А, ПГ-5М, ПГ-4) при правильно выбранной технологии позволяют успешно решать указанные выше обе задачи гибки, обеспечивают высокую точность и качество стрингеров. Число переходов и положение гибочных и упорных роликов определяется опытным путем. При гибке профилей большого сечения из высокопрочных материалов

профилеразводочный станок ПР-1. Эти методы рекомендуются для единичного и серийного производства, особенно для разводки уже изогнутых стрингеров.

После операции гибки и правки производят окончательную резку профилей в размер. Заключительными операциями изготовления стрингеров являются пробивка и сверление отверстий в полках, термообработка, слесарная доработка и нанесение покрытий. Контроль готовых стрингеров производится или с помощью шаблонов или на специальных переналаживаемых приспособлениях с упорами, устанавливаемыми по размерам стрингеров.

*Лонжероном* называется мощный продольный элемент силового набора балочной или ферменной конструкции, воспринимающий изгибающие моменты и перерезывающие силы. Лонжероны как силовые элементы конструкции находят широкое применение в агрегатах протяженной формы, аналогичных крыльям. В корпусах КА они выполняют роль усиленных стрингеров в крупногабаритных отсеках. Лонжероны по назначению могут быть основными, входящими в состав силовой схемы корпуса, и вспомогательными (местными), устанавливаемыми для местного усиления при передаче усилия на какой-либо элемент (например, обшивку); по конструкции — простыми или сложными (сборными), состоящими из нескольких элементов.

Сборные основные лонжероны почти всегда имеют прямолинейную форму. Большинство лонжеронов в корпусах аппаратов бывают простыми. Характерной их конструктивной особенностью является наличие верхнего и нижнего поясов (полок), связанных одной или двумя стенками.

В случае сборных конструкций технология их изготовления заключается в разрезке листовых заготовок по заданным размерам, раскрое и подготовке соединительных элементов из листовых или профильных заготовок и сборке всех входящих в лонжерон элементов в специальных приспособлениях, соединение производится или клепкой, или сваркой. Технология изготовления криволинейных сборных лонжеронов большой протяженности, состоящих из двух-трех профильных элементов, заключается в изготовлении этих элементов аналогично обычным стрингерам и сборке их в лонжерон в специальных приспособлениях, обеспечивающих правильное базирование и точность криволинейных обводов после сборки. Криволинейные простые лонжероны малой протяженности обычно изготавливают механической обработкой (фрезерованием) из заготовок квадратного или прямоугольного сечения. Простые лонжероны по форме сечения схожи со стрингерами и отличаются от них большей толщиной стенок и большей жесткостью.

Изготовление простых прямолинейных лонжеронов сводится к резке их в размер из профилированных заготовок. В случае сложных нестандартных форм сечений они изготавливаются из листовых заготовок, предварительно раскроенных по рассчитанным размерам, прокаткой в трех- или четырехвалковых станках или штамповкой. Технология изготовления криволинейных простых лонжеронов аналогична изготовлению криволинейных стрингеров. При изготов-

лении лонжеронов большое место занимают операции изготовления многочисленных местных усложнений формы, которые обычно располагаются после операций формообразования. В конце технологического процесса осуществляется контроль размеров и форм.

*Шпангоутом* называется элемент поперечного силового набора корпуса, обеспечивающий требуемую форму в его поперечных сечениях и увеличивающий критические напряжения в стрингерах и обшивке, связывая их и являясь для них опорой.

По назначению шпангоуты могут быть промежуточными (нормальными) и силовыми (стыковочными). Нормальные шпангоуты обычно состоят из одного профильного элемента различного сечения, прикрепляются непосредственно к обшивке или соединяются с обшивкой при помощи уголков и накладок. Около них стрингеры обычно не прерываются и проходят через них по специальным вырезам.

Силовые шпангоуты, обеспечивающие передачу значительных сосредоточенных сил и моментов на обшивку, имеют хорошую связь с обшивкой и представляют мощные рамы высокой прочности и жесткости. По конструкции они могут быть монолитными, состоящими из одной детали, или сборными, состоящими из нескольких элементов, склепанных или сваренных между собой.

В зоне силовых шпангоутов стрингеры обычно прерываются и соединяются со шпангоутами для передачи продольных нагрузок с помощью специальных соединительных элементов — фитингов. В конструкции корпусов силовые шпангоуты устанавливаются в местах стыковки отдельных секций или отсеков, а также в местах крепления к корпусу различных узлов или агрегатов.

Материалы для изготовления шпангоутов обычно выбираются те же, что и для изготовления обшивок и стрингеров, в некоторых случаях силовые шпангоуты, особенно стыковочные, могут изготавливаться из высокопрочных сталей (30ХГСНА, 30ХГСА, ЭИ415) и сплавов (ЭИ435А, ХН77ТЮР), титановых (ВТ1, ВТ5), иногда бериллиевых сплавов.

К шпангоутам предъявляются достаточно высокие требования по точности форм и размеров, определяющих обвод корпуса, и особенно к стыковочным поверхностям и стыковочным отверстиям. Высокие требования к шпангоутам предъявляются и по качеству и шероховатости поверхности, а также другим показателям (расположение вырезов под стрингеры, смещение обреза полка, выпучивание материала у дна профиля и т. д.).

Технология изготовления шпангоутов зависит от конструктивно-технологических характеристик. Схема изготовления в начальной стадии связана с типом заготовок. Для простых шпангоутов, состоящих из одного профиля в поперечном сечении, заготовками служат катаные листы, стандартные профили. Существенное влияние на схему изготовления шпангоутов оказывает наличие одного или нескольких сварных стыков, когда шпангоуты состоят из ряда сегментных элементов.

Если заготовкой шпангоута является катаный лист, схема изготовления заключается в разметке и раскрое листа по шаблонам или рассчитанным размерам, гибке этих листов в кольцо с одновременным профилированием их на специальных профилегибочных станках, сварке по стыкам профилей. После сварки, отжига и зачистки швов необходимо проводить окончательную калибровку, после чего делается вырубка пазов и их слесарная доработка. Если в конструкции имеются отверстия, то их целесообразно изготавливать до гибки, в листовых заготовках. Шпангоуты значительных диаметров (больше 1500 мм) обычно состоят из нескольких сегментных участков. В этом случае сегменты кроме гибки их на роликовых станках могут изготавливаться штамповкой, когда одновременно с формообразованием профиля производится обрезка гофров на полках. Сборка и сварка сегментов производятся после отжига и зачистки кромок в специальных несложных приспособлениях, обеспечивающих базирование, необходимую стыковку сегментов и возможность надежной сварки их в кольцевой шпангоут. После отжига и зачистки швов готовый шпангоут поступает на операции нанесения покрытий и окончательного контроля.

Когда заготовкой шпангоута являются катаные или прессованные профили, схема изготовления включает следующие этапы. Отрезка заготовки заданной длины на горизонтально-фрезерных станках дисковыми фрезами, на ленточных и дисковых анодно-механических станках, дисковыми пилами, абразивными дисками; в единичном или опытном производстве отрезка может производиться механическими ножовками. Гибка профилей в кольцо (или в часть кольца в случае сегментов) может производиться или в профилегибочных роликовых станках типа ПГ-3 или ПГ-4, или в штампах. После травления и промывки производится сварка в кольцо, после отжига и зачистки швов калибровка, нанесение покрытий и контроль. При изготовлении по данной схеме усиленных шпангоутов из высокопрочных сталей и титановых сплавов операции гибки, штамповки, подсечки, калибровки выполняются с нагревом.

Производительным методом калибровки шпангоутов после сварки является растяжение на прессах типа ПКД-3 с помощью разжимных секторов, раздвигающихся под действием клина подвижной траверсы пресса. Механическая обработка пазов, отверстий, посадочных (стыковочных) поверхностей должна производиться до калибровки.

В ряде случаев для шпангоутов применяют кольцевые заготовки, полученные гибкой в кольцо полосовых заготовок квадратного или прямоугольного сечения с последующей сваркой и горячей перештамповкой квадратного сечения в профильное. Кольцевые заготовки прямоугольного или частично спрофилированного сечения предназначаются в большинстве случаев для силовых и стыковочных шпангоутов, часто имеющих сложные профильные сечения. Технология изготовления подобных шпангоутов заключается в механической обработке на карусельных станках с целью получения

необходимого профиля и на фрезерных и сверлильных станках с целью изготовления местных усложнений формы.

Особое место в технологии изготовления стыковочных шпангоутов занимает сверление стыковочных отверстий в паре стыкующихся шпангоутов, принадлежащих разным агрегатам. Сверление этих отверстий производится по кондукторам, изготовленным по одному мастер-кондуктору, информация на который переносится с плаза для обеспечения необходимой точности и взаимозаменяемости стыковочных поверхностей. Для стыковочных шпангоутов ответственной операцией являются также разметка квадрантов (базовых плоскостей), которые не должны совпадать со сварными швами.

Усиленные шпангоуты в ряде случаев могут быть сборными, состоящими из нескольких сваренных или склепанных по длине профилей. Такие сборные конструкции могут оказаться более технологичными, чем шпангоуты монолитного сечения подобного сложного профиля, так как они состоят из сочетания стандартных катаных или прессованных профилей. Сборка составляющих профилей заключается в правильном и точном базировании их в специальных приспособлениях, обеспечивающих придание необходимой формы и возможность их автоматической продольной сварки. После сварки производится механическая доработка шпангоута и выполнение местных усложнений формы. Реже применяется другая схема изготовления сборных шпангоутов, когда сварка или клепка профилей производится до операции гибки; в этом случае гибка сложных несимметричных профилей весьма сложна, поэтому такая схема допустима только для симметричных составных профилей сборных шпангоутов.

*Мелкие соединительные или установочные детали* соединяют элементы силового набора друг с другом или с обшивкой. К ним относятся различные фитинги, скобы, косынки, уголки, планки, кронштейны, накладки, а также окантовки и крышки люков, полосы местного усиления и т. д. Подобных деталей в сборных конструкциях облочечек очень много, поэтому в цикле изготовления они занимают значительное время и место, хотя технологически во многих случаях несложны. Материалами для них являются те же материалы, что и для соединяемых или усиливаемых элементов. Требования к точности их размеров и форм бывают достаточно высокими, особенно по посадочным поверхностям или по поверхностям контакта с деталями, определяющими аэродинамические обводы. В конструкциях корпусов эти детали часто выполняют роль компенсаторов, для чего в их конструкции бывают предусмотрены овальные или пазовые отверстия, всевозможные прорези, канавки и т. д.

Технология изготовления соединительных деталей зависит от их конструкции: так как в большинстве случаев они являются жесткими, то изготавливаются общемашиностроительными методами. Заготовками для них служат листы, вырезанные в размер, катаные или прессованные профили, отрезанные на заданную длину, бруски квадратного или прямоугольного сечения, изредка литые или штампованные заготовки. В зависимости от конструкции формообразующими операциями для их изготовления являются холодная штамповка, гибка, механическая обработка, сочетание их и т. д., но почти во всех случаях процессы их изготовления заканчиваются

операциями механической обработки, обеспечивающими требуемую точность и качество, нанесением покрытий и контролем. Наличие в корпусах большого количества подобных деталей позволяет после проведения соответствующей классификации даже в условиях мелкосерийного производства применять при их изготовлении высокоэффективные методы массового производства на основе группового метода обработки.

#### 1.4. СБОРКА ПАНЕЛЕЙ

Панель представляет собой незамкнутую часть силовой конструкции оболочки корпуса и обычно состоит из обшивки, подкрепленной элементами силового набора.

Панелированные конструкции оболочек во многих отношениях более технологичны и предпочтительны перед непанелированными: расчлененность конструкции на панели является одним из показателей технологичности корпуса. Панелированные конструкции позволяют расширить фронт работ и, следовательно, сократить цикл при сборке корпуса посредством организации параллельной сборки панелей, обеспечивают возможность более качественного контроля соединений, позволяют более просто и экономично механизировать операции сборки и применять высокопроизводительное оборудование и методы сборки. Для крупных корпусов панелированные конструкции являются практически единственно возможным вариантом выполнения.

Отметим, что для клепаных конструкций панелирование приводит часто к увеличению массы, что может заставить отказаться от панелирования.

Конструктивно-технологической особенностью панелированных оболочек является то, что сборные панели представляют собой жесткую конструкцию, недеформирующуюся под собственным весом, что должно обеспечиваться конструкцией панели (форма, размеры, число входящих в панель элементов и т. д.) и методами их сборки и соединения. Жесткость этих панелей обеспечивает применение простых и дешевых сборочных приспособлений (стапелей) поддерживающего и базирующего типа, что является одним из факторов технологичности и эффективности панелирования конструкций.

Принципиальная схема панелирования определяет включение тех или иных элементов оболочки в состав панелей. Панель может содержать кроме обшивки только продольные элементы (стрингеры), в этом случае собранные панели соединяются друг с другом через шпангоуты; иногда панели состоят из обшивки и продольных и поперечных элементов, в этом случае оболочка собирается с помощью специальных соединительных элементов. Вариантов схем панелирования может быть много. Выбор принципиальной схемы панелирования и степени членения оболочки на панели — сложная конструкторско-технологическая задача, и решается она в каждом

отдельном случае конкретно с учетом большого количества технико-экономических показателей.

По конструктивно-технологическим признакам сборные панели могут быть весьма разнообразными: съемными, когда они соединяются с помощью разъемных соединений (болты, замки и т. д.); несъемными, когда применяются соединения неразъемного типа (сварка, клепка). Панели могут быть плоскими, одинарной или двойной кривизны. Для многих конструкций панелей характерно наличие местных усложнений формы: вырезы, окна, отверстия, соединительные или установочные элементы (фитинги, уголки, кронштейны, косынки и т. д.); наличие их усложняет изготовление и сборку, требует сложных сборочных приспособлений. В корпусах КА панели часто входят в герметичные отсеки, что, конечно, находит отражение как в конструкции, так и в требованиях к местам стыков и швам.

Ко всем конструкциям сборных панелей оболочки кроме требований точности и взаимозаменяемости по обводам, обеспечиваемым при изготовлении и сборке с помощью шаблонов и других средств плазово-шаблонного метода, предъявляются весьма строгие требования к местным искажениям контуров за счет уступов на стыках, местных деформаций обшивок (до 0,2... 0,3 мм), выступанию и западанию головок заклепок, болтов, винтов (для ответственных аэродинамических поверхностей до 0,2... 0,3 мм).

Выполнение указанных требований является главной задачей при сборке панелей и осуществляется правильным и точным базированием деталей. С точки зрения способа базирования деталей существуют различные методы сборки.

В единичном и опытном производстве применяется сборка по разметке, при которой базирование деталей осуществляется размеченными заранее линиями и точками. Сбазированные детали временно скрепляются струбцинами, болтами и поступают на окончательное соединение установленным методом (сварка, клепка). Сборка по разметке малопроизводительна, дорога и требует высококвалифицированной рабочей силы.

При сборке по сборочным отверстиям сборочной базой являются специальные технологические сборочные отверстия (СО), которые в каждой детали в количестве не менее двух сверлятся заранее с высокой точностью. При сборке детали соединяются так, чтобы совпали сборочные отверстия, и фиксируются болтами или заклепками, после чего производится окончательное соединение их сваркой или клепкой, а временные фиксаторы снимаются. Расположение сборочных отверстий на всех деталях взаимно увязано, т. е. снято с одного документа — плаза. Сборка по сборочным отверстиям может производиться в приспособлениях (для крупных и сложных панелей) и без них, но эти приспособления в данном случае просты и дешевы. Точность в этом методе определяется точностью СО и увязки. Такую сборку рекомендуется применять при всех типах производства, она достаточно точна, производительна и экономична.

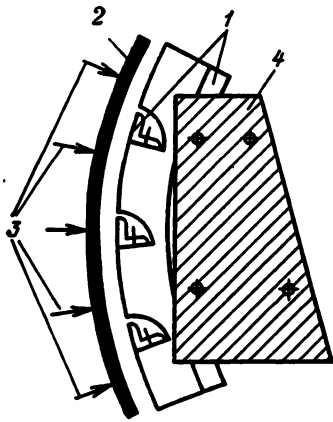


Рис. 24. Метод сборки с базой от каркаса:

1—элементы каркаса; 2—обшивка;  
3—прижимы; 4—приспособление —  
стапель

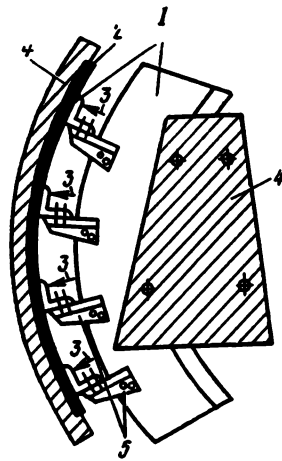


Рис. 25. Метод сборки с базой от обшивки:

1—элементы каркаса; 2—обшивка;  
3—прижимы; 4—приспособление —  
стапель; 5—компенсирующий элемент

Сборка панелей в приспособлениях — стапелях — находит широкое применение в производстве, обеспечивая более высокую производительность, точность и простоту базирования, а в некоторых случаях является единственно возможным методом. В зависимости от принятой исходной базы различаются методы сборки с базой от каркаса и от обшивки.

Сущность метода сборки с базой от каркаса (рис. 24) заключается в том, что предварительно в сборочном приспособлении по имеющимся в нем базам собирается каркас, детали которого временно скрепляются различными фиксаторами и зажимными устройствами, контролируются, после чего соединяются установленными технологией методами (клепка, сварка), а временные крепления снимаются. Затем на готовый каркас устанавливаются и прикрепляют (сваркой, клепкой) обшивку. Иногда обшивка может устанавливаться до окончательного соединения каркаса, но порядок базирования от каркаса к обшивке остается. В этом методе точность обводов изделия определяется точностью изготовления и сборки каркаса, особенно тех поверхностей, которые будут определять обвод панели (точность изготовления приспособления в обоих методах базирования считается одинаковой). Для компенсации погрешностей в обводах каркаса могут применяться подгонка и компенсирующие прокладки между набором и обшивкой.

При сборке с базой от обшивки вначале в приспособлении устанавливается обшивка (рис. 25), которая базируется по специальным базовым поверхностям (рубильники, ложементы), снятым с теоретического плаза, после временного закрепления обшивки различными устройствами устанавливаются детали силового набо-



ра (каркаса), при базировании их применяются компенсирующие соединительные элементы. Таким образом, окончательная точность обводов панели определяется точностью изготовления базирующих поверхностей приспособления. Окончательное соединение (сваркой, клепкой и т. д.) каркаса и обшивки производится во временно скрепленном положении, после чего скрепляющие устройства снимаются. В некоторых случаях для упрощения конструкции и ускорения сборки компенсирующие соединительные элементы исключают и каркас непосредственно прикрепляется к обшивке. В этом случае после снятия временных скрепляющих устройств вследствие упругих деформаций обшивки, обладающей меньшей жесткостью, чем каркас, точность обводов снижается за счет погрешностей обводов каркаса, т. е. в данном случае по точности метод сводится к сборке с базой от каркаса, а меняется только порядок сборки. Для ответственных панелей и агрегатов с высокими аэродинамическими требованиями, рекомендуется метод сборки от обшивки с применением компенсирующих соединительных устройств между обшивкой и каркасом.

Разновидностью метода сборки от обшивки является сборка с базой по внутренней поверхности обшивки, которая, как видно из названия, находит применение в тех случаях, когда предъявляются высокие требования по точности обводов внутренней поверхности агрегата. Суть ее сводится к установке обшивки внутренней поверхностью по базовым поверхностям приспособления с последующим присоединением каркаса. Эта разновидность сборки находит некоторое применение в производстве КА.

Технологический процесс сборки панелей, кроме их конструкции, в значительной степени определяется принятым методом сборки, определяющим порядок присоединения основных элементов панелей (обшивка, стрингеры, шпангоуты). Операции изготовления местных усложнений формы могут быть на любой стадии сборки в зависимости от конструкции и условий производства. Установка соединительных и установочных деталей определяется установкой соединяемых элементов. В крупных сборных панелях обычно детали, присоединяемые к обшивке (например, стрингеры), привариваются точечной сваркой, а присоединяемые к внутреннему силовому набору (например, шпангоуты через соединительные детали к стрингерам) — клепкой. Типичной схемой сборки является такая, когда отдельные панели собираются со стрингерами и соединительными элементами, а после их базирования в стапеле и продольной сварки между собой, устанавливаются и соединяются шпангоуты, поступающие на сборку в виде кольцевых монолитных элементов. В конце технологического процесса сборки устанавливаются различные кронштейны, люки, полки и т. д. и дорабатываются местные усложнения формы.

Важнейшей технологической характеристикой сборных панелей является законченность сборки и монтажа, т. е. присоединение всех элементов и монтаж оборудования и проводок с тем, чтобы при агрегатной сборке можно было соединять готовые панели и стыко-

вать оборудование и кабельную проводку. Поэтому в общем технологическом процессе сборки панелей, кроме сборки самих силовых элементов (обшивки, продольного и поперечного набора, соединительных деталей и т. д.), значительное место занимают монтажные операции по установке и монтажу деталей оборудования, элементов крепления трубопроводов, бортовой кабельной сети, различных технологических монтажных узлов и других деталей, не входящих в силовую схему панели. Они обычно располагаются в конце технологического процесса и требуют значительного числа контрольных операций. При сборке панелей заметное место отводится таким вспомогательным операциям, как подготовка поверхностей под сварку (травление, зачистка, обезжиривание и т. д.), фрезерование и зачистка сварных швов, механическая доработка, слесарные операции и т. д., которые располагаются в соответствующих местах технологического процесса. С целью обеспечения необходимого качества собранных панелей в техпроцессе сборки часто предусматривается перекрывающий контроль качества сборки; заметное место занимает подготовка, соединение и контроль образцов-свидетелей, особенно для ответственных соединений. Готовые и проконтролированные панели поступают на агрегатную сборку оболочек корпуса.

### 1.5. СБОРКА ОБОЛОЧЕК КОРПУСОВ КА

*Сборка оболочек* аппаратов в значительной степени определяется особенностями конструкции и требованиями к ним. Отметим следующие параметры оболочек, влияющие на технологию их сборки. *Габаритные размеры* влияют на удобство сборки, применяемые методы и оснастку, иногда даже на расчлененность конструкции оболочек. *Количество стыковочных поверхностей* с высокой заданной точностью сборки и обработки определяет сложность применяемой оснастки, количество операций механической обработки собранной оболочки и контрольных операций и т. д. *Герметичность* или негерметичность в значительной степени определяет схему сборки, наличие операций по нанесению герметиков, испытания на герметичность. *Объем монтажа* определяет не только длительность цикла сборки и монтажа, но влияет на порядок, применяемую оснастку, объем испытательных работ и т. д., что в значительной степени относится к оболочкам приборных отсеков, обитаемых модулей и т. д.

Одним из главных конструктивно-технологических признаков оболочек, влияющих на схему технологического процесса, является степень расчленения на панели. Как отмечалось выше, панелированные конструкции имеют ряд технологических преимуществ.

При сборке панелированных оболочек на сборку поступает меньшее число деталей и узлов, так как часть их уже собрана в панели, кроме этого меняется схема и уменьшается объем монтажных работ: часть их выполняется на панелях. При сборке же непанелированных оболочек на сборку поступают только детали и

частично собранные узлы: обшивки, стрингеры, шпангоуты (или секции шпангоутов), обечайки, различные соединительные и установочные детали, крышки люков, окантовки и т. д. и детали и узлы монтажа, практически весь объем монтажных работ в этом случае выполняется при сборке оболочки.

Схема сборки панелированных и непанелированных оболочек состоит из четырех стадий: 1) стапельная сборка; 2) внестапельная сборка и работы; 3) монтажные работы; 4) испытания и контроль; часть контрольных и испытательных операций выполняется при сборке и монтаже.

Стапельная сборка панелированных оболочек сводится к установке в сборочный стапель стыковочных (базовых) шпангоутов, изготовленных и собранных отдельно, установке панелей и точному базированию их относительно шпангоутов и друг друга, установке соединительных деталей и осуществлению операции соединения (клепки или сварки) иногда в два этапа: предварительной прихватки (скрепления) и окончательного соединения.

Стапельная сборка оболочек непанелированной конструкции значительно сложнее, иногда производится на нескольких стапелях. Могут быть две схемы стапельной сборки: в первом случае в стапеле устанавливаются и базируются все основные корпусные детали (обшивки и детали силового набора) и далее осуществляется их соединение; во втором случае, применяемом редко, производится сборка оболочек с последовательным присоединением ряда деталей. Последовательность стапельной сборки в значительной степени зависит от применяемых баз. Отметим что обычно непанелированные оболочки с тонкими обшивками собирают с базой от каркаса, а панелированные — от обшивки.

Применяемые сборочные стапели, изготавливаемые увязанно по плазово-шаблонному методу (изготовление и установка рубильников), в случае сборки непанелированных оболочек получают значительно сложнее и дороже, что иногда заставляет применять несколько последовательных стапелей по ходу технологического процесса сборки, что, конечно, снижает точность сборки, удорожает ее, уменьшает производительность, увеличивает трудоемкость изготовления. Поэтому применение панелированных конструкций оболочек технологически значительно выгоднее.

После сборки и соединения всех основных элементов оболочек, последние снимаются со сборочного стапеля и устанавливаются на простое поддерживающее приспособление. Из всех работ, выполняемых после снятия оболочки со сборочного стапеля, выделим в отдельную стадию операции, связанные со сборкой (присоединением) деталей, не входящих в силовую схему оболочки: различных установочных кронштейнов, крышек люков, узлов крепления коммуникаций. К стадии внестапельных работ относятся механическая доработка стыковочных и посадочных поверхностей, разделка отверстий соединительных узлов с целью обеспечения требуемой точности и взаимозаменяемости сопряжений. К этой же стадии относятся и операции по нанесению защитных, антикоррозионных, теп-

лоизоляционных, теплозащитных, отделочных покрытий и т. д. Эти три группы операций внестapelной сборки в ряде случаев могут быть очень сложными и трудоемкими (например, разделка стыковочных отверстий и поверхностей на специальных стендах; нанесение ТЗП и т. д.).

В отдельную стадию сборочных работ оболочек можно выделить, вследствие их специфики, операции монтажа, т. е. установку (монтаж) различных коммуникаций (трубы, жгуты электропроводки, пневмо- и гидрокоммуникации, разъемы и т. д.), систем управления (механизмы, приборы), различного оборудования, аппаратуры и т. д., а также их проверку, отладку и регулировку. Наибольший объем монтажных работ производится в оболочках приборных блоков, обитаемых отсеков и блоков управления аппаратом. Объем монтажных работ на сборке оболочки зависит от панелированности конструкции: так как проводить монтажные работы на панелях значительно проще и производительнее, то панелированные конструкции являются более технологичными и предпочтительными, в этом случае трудоемкость монтажных работ на сборке оболочек резко сокращается. В случае непанелированных оболочек, когда объем монтажных работ велик, конструктор должен предусмотреть возможность их проведения (съёмные панели, люки, проемы, специальные трассы в виде каналов, накладок и т. д.). Кроме этого, конструкция оболочки должна обеспечивать на стадии ее сборки завершение большинства монтажных работ, с тем чтобы на общую сборку аппарата осталось минимальное их количество, связанное в основном с соединением коммуникаций и их регулированием.

Среди монтажных работ значительное место занимает монтаж бортовой кабельной сети (БКС) электросистем аппаратов, в которые кроме источников электроэнергии (аккумуляторов) и потребителей ее (механизмы, приборы, аппаратура) входят электро-, радиокоммуникации, коммутационная аппаратура (разъемы, реле, переключатели, соединения) и детали крепления кабелей и разъемов. Существует четыре типа технологических процессов изготовления жгутов БКС: ручная раскладка их на плазе, включающая выполнение всех работ по их изготовлению на одном рабочем месте; ручная раскладка на плазе заранее нарезанных с обработанными концами заготовок (проводов) с применением приспособлений для монтажа и контроля; ручная раскладка подготовленных групп проводов иногда без применения плазов; автоматизированная раскладка проводов с применением оборудования с ЧПУ (для внутриблочных жгутов). Технологический процесс изготовления жгутов в общем случае состоит из следующих основных этапов: отмер и резка проводов; раскладка их на плазе; связка и свивка жгутов; защита жгутов различными защитными и изоляционными материалами; подготовка концов проводов под соединение; соединение проводов с деталями разъемов, наконечников и других элементов пайкой или спрессованием; сборка и герметизация разъемов; контроль и упаковка их. Основными операциями монтажных работ

БКС на панелях и агрегатах являются: установка и крепление замками, винтами и т. д. функциональных элементов (приборов, электроагрегатов и др.); прокладка, крепление скобками, хомутами и т. д. и стыковка между собой жгутов, кабелей и других коммуникаций; присоединение жгутов и кабелей к приборам. Главным требованием к монтажу элементов БКС является точность и исключение внутренних механических напряжений и провисаний кабелей, вызывающих усталостное разрушение и нарушение контактов. Технология монтажа и испытаний бортовых систем подробно рассмотрены в учебном пособии А. В. Чернышева «Технология монтажа, отработки, испытаний и контроля бортовых систем летательных аппаратов».

Особое место на сборке оболочек занимают контрольно-испытательные работы, объем которых в ряде случаев (например, сборка герметичных отсеков, жилых блоков и т. д.) может быть весьма большим. Они могут включать различные виды испытаний: на функционирование, прочностные, на герметичность, тепловые и т. д. После проведения всех сборочных и контрольно-испытательных работ оболочки подаются на общую сборку аппарата или блока.

## **Глава 2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ МОНОКОКОВЫХ И КАРКАСНЫХ КОРПУСОВ**

### **2.1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ МОНОКОКОВЫХ ОБОЛОЧЕК**

К монококковым относятся оболочки, состоящие или из одной обшивки, имеющей значительную толщину для обеспечения необходимой жесткости и прочности, или из обшивки с поперечным набором, которые кроме обеспечения формы и жесткости повышают устойчивость корпуса. Несмотря на все преимущества (простота конструкции и технологии, лучшее силовое использование обшивки, увеличение внутреннего объема корпуса) монококковые оболочки в корпусах КА не нашли широкого применения, вследствие того что в таких конструкциях весьма трудно обеспечить прочность и жесткость в сочетании с легкостью: необходимость местного усиления оболочки в местах вырезов, крепления установочных элементов, передачи сосредоточенных усилий и т. д. в конечном счете приводит к усложнению и утяжелению конструкции оболочки. Поэтому конструкторы отдают предпочтение оболочкам с продольным и поперечным силовым набором.

В технологическом отношении монококковые оболочки относительно просты. В том случае, когда такая оболочка состоит из одной обшивки, схема изготовления ее схожа со схемой изготовления листовых обечаек: заготовка листовая, раскрой, разделка кромок, гибка и сварка продольных швов. Формообразующей операцией может быть ротационная обработка, когда получают оболочки

без сварного шва. В некоторых случаях применяется штамповка-вытяжка. В том случае, когда монококовая оболочка состоит из обшивки и поперечного набора, обечайка-обшивка изготавливается указанными выше методами, отдельно изготавливаются шпангоуты, и далее в приспособлениях производится их сборка. Сборка может производиться в приспособлении также из отдельных формованных листов обшивки, которые накладываются на установленные шпангоуты, прихватываются, контролируются и окончательно свариваются по продольным стыкам обшивок и в местах соединения их со шпангоутами. Сборка может проводиться с базой по обшивке и по каркасу в зависимости от требований по точности обводов. Общие требования к монококовым оболочкам такие же, как к оболочкам корпусов любого типа.

## 2.2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФЕРМЕННО-КАРКАСНЫХ КОРПУСОВ

Каркасные (ферменные) конструкции корпусов КА чаще всего используются или как переходные отсеки, соединяющие различные агрегаты (например, двигательную установку с основным корпусом), или как основа (корпус) тяжелонагруженного агрегата (например, посадочного блока), или как несущая основа для соединения ряда независимых агрегатов или блоков, как, например, каркасные магазины для нескольких спутников, выводимых одним носителем. Конструктивными особенностями ферменно-каркасных корпусов являются высокая прочность и жесткость, способность воспринимать ударные нагрузки, относительная простота, высокая надежность, невысокая стоимость, возможность точного изготовления несложными методами. Ферменно-каркасные корпуса применяются во многих конструкциях КА («Луна», «Союз», «Аполлон», «Скайлэб», «Сервейор» и др.) с различным назначением, в зависимости от чего определяются и требования к ним, главными из которых, кроме прочности и жесткости, являются точность посадочных поверхностей, устойчивость стержневых элементов, надежность соединения всех элементов (сварных или механических соединений), иногда точная центровка относительно главной оси и ряд других требований, связанных с конкретным назначением корпуса. Основными деталями ферменно-каркасных корпусов являются трубчатые или профильные детали: тяги, стойки, раскосы, опоры, а также различные кронштейны, косынки, уголки и т. д., в некоторых конструкциях силовые стыковочные кольца (шпангоуты). Материалами для этих деталей являются высокопрочные стали, иногда алюминивно-магниевые сплавы, титановые сплавы, а также композиционные материалы.

Общая схема изготовления подобных корпусов имеет следующие этапы: изготовление трубчатых или профильных деталей, силовых колец, соединительных деталей, сборка (сварка) узлов, общая сборка (сварка), доделочные операции стыковочных поверхностей, нанесение покрытий, контроль и испытания.

Изготовление силовых колец аналогично изготовлению стыковочных шпангоутов, каковыми они по существу и являются. Изготовление трубчатых деталей состоит из отрезки труб требуемого размера, разделки концов для стыкования и сварки между собой и с силовыми кольцами. Мелкие соединительные детали изготавливаются из поковок или отливок механической обработкой, иногда штамповкой из листовых заготовок. Основное требование при изготовлении ко всем деталям — обеспечение требуемой точности поверхностей стыка.

Сборка ферменных корпусов обычно начинается с узловой сборки — сварки в приспособлениях, обеспечивающих точное базирование деталей. С целью обеспечения минимальных сварочных деформаций в приспособлениях предусматривают для базирования и жесткого закрепления свариваемых деталей специальные фиксаторы, положение которых должно быть экспериментально уточнено, сварку деталей ведут в определенном порядке, обеспечивающем минимальные напряжения и деформации в сваренном корпусе, после сварки предусматривают отжиг на снятие внутренних напряжений. Общая сборка ведется аналогично в более сложных приспособлениях. В некоторых случаях у таких корпусов в местах стыка могут предусматриваться пירוустройства.

После сварки и отжига посадочные (стыковочные) поверхности должны обрабатываться (фрезерование, шлифование, точение) для обеспечения требуемой точности и шероховатости поверхности.

После сборки и доработки контролируются геометрические размеры и точность взаимного положения стыковочных поверхностей, а также проводится контроль сварных швов. Изготовленный корпус подвергают прочностным и динамическим испытаниям и дополнительному контролю геометрических размеров.

### **Глава 3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СБОРНЫХ ОБОЛОЧЕК КОРПУСОВ ИЗ СЛОИСТЫХ ПАНЕЛЕЙ**

Особым типом сборных оболочек и панелей являются многослойные или слоистые оболочки. Конструктивно они представляют собой оболочки, собранные из панелей, состоящих из двух (или более) листовых обшивок, между которыми располагается, соединяя их, наполнитель из легкого материала сотовой, пористой или другой структуры (рис. 26). Прочность, жесткость и устойчивость таких конструкций обеспечивается определенной формой и составом структуры и конструкцией наполнителя. Более высокая по сравнению с листовой конструкцией устойчивость при сжатии и сдвиге позволяет применять слоистые оболочки во многих случаях без подкрепляющего продольного силового набора и с уменьшенным количеством поперечного. Благодаря развитию технологии изготовления слоистых оболочек, применение их в конструк-

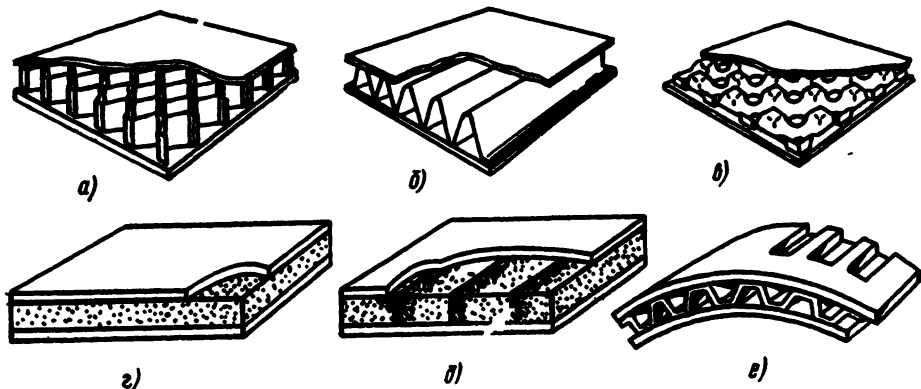


Рис. 26. Слоистые панели с сотовым (а), гофрированным (б, в), вафельным (в), пенопластовым (г) и армированным (д) заполнителями

ниях ракет, самолетов и космических аппаратов возрастает (например, «Аполлон», «Скайлэб» и др.). Преимуществами слоистых оболочек по сравнению с однослойными с большим количеством силового набора, кроме выигрыша в массе, являются: равномерное восприятие напряжений всем сечением оболочки, способность воспринимать все виды нагрузок, хорошие термо- и звукоизоляционные свойства, более гладкие аэродинамические обводы, отсутствие ослабления соединительных элементов отверстиями под заклепки и сварными швами. Недостатками слоистых оболочек являются: некоторая сложность осуществления стыковых соединений, необходимость усиления заполнителя при передаче перерезывающих сил, необходимость усложнения конструкции заполнителя (например, армированием) при передаче местных сосредоточенных нагрузок, сложность и отсутствие надежных средств контроля качества соединения обшивок с заполнителем.

Конструктивно слоистые оболочки состоят из отдельных слоистых панелей, соединенных друг с другом различными способами. Классификацию их проводят по методу соединения обшивок с заполнителем: паяные и клееные; по материалам, применяемым для обшивок и заполнителя: металлические, неметаллические и комбинированные, а также по структуре, конструкции и материалу заполнителя. По последнему признаку в ракетно-космической технике находят широкое распространение слоистые панели с сотовыми заполнителями с шестигранными или четырехгранными ячейками, они могут быть металлическими (алюминиевые, титановые, стальные) и неметаллическими (стеклотекстолитовые, стеклопластиковые); с гофрированными заполнителями (преимущественно, металлическими); с ячеистыми (вафельного типа) заполнителями; с неметаллическими монолитными пенопластовыми заполнителями, иногда армированными металлическими проставками; с неметаллическими (полиуретановыми) вспенивающимися заполнителями и др. По форме обводов слоистые панели могут быть плоскими, одинарной и двойной кривизны, клинообразными и со сложным



аэродинамическим профилем. Наличие местных усложнений формы (подкладки, фитинги, узлы крепления арматуры и коммуникаций, кронштейны и т. д.), которые часто встречаются в конструкциях слоистых панелей, увеличивают трудоемкость и стоимость их производства.

### 3.1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И СБОРКА ПАЯНЫХ СЛОИСТЫХ ПАНЕЛЕЙ

Паяные слоистые панели, обладая отмеченными выше преимуществами и недостатками слоистых панелей и преимуществами паяных соединений вообще, по сравнению с клееными обладают более высокой прочностью и способностью работать при более высоких температурах (до 370 ... 540°С). Конструкция заполнителя может быть сотовой формы с шести- или четырехгранными ячейками, гофрированной или ячеистой (вафельной) формы. Окантовочные детали, образующие кромку панели и служащие для соединения панелей между собой, изготавливаются или фрезерованием из брусков, или штампуются из листовой заготовки, или изготавливаются из стандартных профилей; по конфигурации они могут быть Z-образными, швеллерного типа, сплошными или сложного сечения. По габаритам паяные панели обычно бывают небольших размеров; из них собираются крупные панели и оболочки.

Требования к паяным слоистым панелям аналогичны требованиям к сборным панелям и оболочкам. Материалами для них служат металлы, пригодные для пайки высокотемпературными припоями: алюминиевые сплавы (АМг6, АМг3), нержавеющие стали (X18Н9Т, X18Н10Т и др.), сплавы на основе никеля, жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы, титановые сплавы, пайка которых более сложна. Припой выбирается исходя из паяемых материалов, технологии изготовления и условий эксплуатации. Для сплавов алюминия и магния в качестве припоев применяются сплавы алюминия и магния с цинком, медью, оловом, кадмием, серебром и др. В качестве флюсов применяют хлористый цинк, нашатырь, разведенные спиртом. Наиболее распространенными типами высокотемпературных припоев являются медноцинковые (ПМЦ-42, ПМЦ-48, ПМЦ-52), латунные (Л62), серебряные (ПСр-72, ПСр-40, ПСр-44, ПСр-50кд), которые пригодны для пайки большинства металлов. Разработка твердых припоев с содержанием никеля и лития особенно способствовала развитию паяных слоистых панелей. Применение припоев с содержанием лития (до 0,2%) позволяет снизить требования к чистоте паяемых соединений при подготовке к пайке, что сильно упрощает технологию их изготовления. Основными требованиями к припоям, кроме температуры плавления, являются сродство их с паяемыми металлами, способность образовывать галтели (буртики) в местах соединения обшивки с заполнителем и затекать в зазоры по всей высоте заполнителя, коррозионная стойкость, прочностные свойства, возможность (по температуре пайки) совмещения пайки с термообработкой обшивок

и заполнителей, что часто предусматривается в технологии изготовления стальных слоистых панелей.

Изготовление обшивок паяных слоистых панелей аналогично изготовлению обшивок сборных панелей, но они часто имеют очень малую толщину (0,3 ... 1,5 мм); применение толстых обшивок для них невыгодно: теряется фактор выигрыша массы.

Наиболее распространенным типом заполнителя для паяных слоистых панелей являются сотовые. Заготовкой для них служат листы фольги, раскроенные в требуемый размер, с пробитыми дренажными отверстиями (для отвода газов при пайке). Листовые заготовки собирают в пакет, прокладывая между ними в шахматном порядке медные электроды. Соединение лент пакета заполнителя осуществляется точечной сваркой на автоматических установках. Пакет, состоящий из приваренных друг к другу листов, растягивают на специальном приспособлении до получения ячеек (сот) требуемой формы. В некоторых случаях сварку листов фольги заполнителя ведут по отдельности, накладывая их на сваренный пакет и постепенно наращивая до требуемого размера, с последующей растяжкой в сотовую форму.

Для придания окончательных размеров и формы сотовые заполнители подвергаются механической обработке одним из следующих методов: 1. Обработка дисковой фрезой на вертикально-фрезерном станке. 2. Шлифование на ленточно-шлифовальном станке. Этот метод наиболее точен, производителен и экономичен. 3. Электроэрозионная обработка, когда припуск снимается искровым разрядом и анодно-механическим шлифованием вращающимся электродом, установленным на шпинделе фрезерного станка. 4. Обычное фрезерование. В этом случае заполнитель наполняют твердым легкоплавким материалом или заливают водой и замораживают ее. При наличии криволинейных обводов обработка может производиться на станках с ЧПУ или координатным устройством. 5. Химическое травление. Метод экономичен, но длителен из-за наличия сложной операции наложения защитного экрана.

Гофрированные заполнители изготавливаются из листовой заготовки или штамповкой, или прокаткой на специальных профилированных валках. Ячеистые (вафельные) заполнители изготавливаются штамповкой (пакета заготовок) или прокаткой. Обработанный заполнитель поступает на сборку.

Процесс сборки и пайки панелей осуществляется в несколько этапов. Вначале все входящие в сборку паяемые детали — обшивки, заполнители, кромочные профили и т. д. — очищают для удаления следов масел, смазки, оксидной пленки, загрязнений по специальной технологии, предусматривающей различные операции обезжиривания, травления в кислотных и щелочных ваннах, промывки в дистиллированной воде, сушки.

Очищенные детали и листы припоя толщиной 0,05 мм собирают в специальных приспособлениях, контролируют, подгоняют и прихватывают сваркой или местной пайкой. Для обеспечения плотного прилегания обшивки к заполнителю собранная панель устанавливается в приспособление с вакуумным (рис. 27, а) или пневматическим (рис. 27, б) прижимом. В этих же приспособлениях создается необходимая атмосфера для пайки (аргон, водород, азот). Пайка панелей производится в нейтральной атмосфере и с приме-

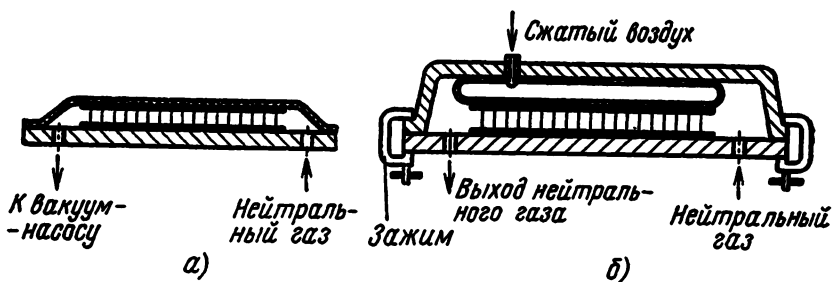


Рис. 27. Приспособление для пайки сотовых конструкций с вакуумным (а) и пневматическим (б) прижимом

нением газовых флюсов, может производиться в печи или в специальных электрообогревательных приспособлениях. При температуре пайки (около  $900^{\circ}\text{C}$ ) производится выдержка в течение 15 минут, после чего панель поступает на остывание или на дальнейшую термообработку (ниже температуры пайки). После остывания к панели могут присоединяться отдельные детали (фитинги, накладки, кронштейны, крепежные узлы и т. д.) пайкой ацетилено-кислородной горелкой или сваркой (точечной или дуговой). Кроме контроля геометрических размеров качество пайки контролируется рентгеновским или ультразвуковым методами.

### 3.2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И СБОРКА КЛЕЕННЫХ СЛОИСТЫХ ПАНЕЛЕЙ

Клееные слоистые панели начинают находить все большее распространение наряду с паяными. Обладая преимуществами и недостатками слоистых панелей вообще, клееные панели по сравнению с паяными позволяют создавать панели из разнородных материалов и неметаллов, исключают коррозию в соединениях, вследствие изоляционных свойств клеев устраняют возможность появления в местах соединения при нагреве термо-ЭДС, которая может служить причиной коррозии и разрушения соединения, часто обеспечивают герметичность соединения. Недостатком их является относительно низкая прочность, особенно при неравномерном отрыве, и отсутствие надежных методов неразрушающего контроля клееных соединений. Для неметаллических слоистых панелей склеивание является практически единственным методом их изготовления.

Недостатком клееных панелей в космических условиях является способность полимерных клеев изменять свои свойства с течением времени и потеря прочности соединений под действием космической радиации. Эти недостатки не исключают применения клееных соединений в КА.

Клееные слоистые панели конструктивно представляют собой панели, состоящие из тонких обшивок, соединенных через заполнитель, могут иметь различные внешние обводы. По форме заполнителя бывают с сотовыми или гофрированными заполнителями; с за-

полнителями вафельного типа; пенопластовыми монолитными заполнителями, иногда армированными различными более прочными элементами, особым типом клееных панелей являются панели с вспенивающимися заполнителями. Наряду с трехслойными панелями встречаются двухслойные, состоящие из плоской и гофрированной обшивки, приклеенной к плоской. В клееных панелях с целью усиления в местах концентрации напряжений или отверстий иногда соты заливаются специальными (например, пастообразными эпоксидными) материалами (компаундами), которые после отверждения создают весьма прочную и жесткую конструкцию.

Клееные слоистые панели изготовляют из металлических и неметаллических материалов и их сочетаний. Материалом для обшивки могут быть алюминиевые и магниевые сплавы (Д16, Д18, Д20, АМц, АМг и др.), применяемые и для обычных сборных панелей, нержавеющие стали (12Х18Н9Т, ЭП100, 30ХГСА и др.) и титановые сплавы (ОТ4, ВТ16 и др.). Изготовление таких обшивок аналогично рассмотренным выше. Металлические обшивки с заполнителем находят все большее применение благодаря более полному использованию массового и технологического эффекта. Широкое распространение для обшивок слоистых панелей наряду с металлами находят неметаллы, главным образом стеклотекстолиты марок типа КАСТ, КАСТ-В, ВПС-1, СТ-911, ЭФ-32-301, ФН и стеклопластики типа АГ-4С и СВАН. Эти материалы могут работать в конструкциях до температур 200 ... 300°С, а некоторые из них (СТ-911, ЭФ-32-301 и ФН) кратковременно выдерживают температуры до 500 ... 600°С. Часто встречаются сложные панели комбинированной конструкции, когда обшивки бывают металлическими (алюминиевые, стальные), а заполнитель — неметаллический или вспенивающегося типа.

Заполнители для клееных слоистых панелей могут быть металлическими (алюминиевые, титановые) и неметаллическими. Заготовкой для металлических заполнителей служит обычно фольга толщиной 0,02 ... 0,1 мм марок А1Т, АД1Н (нагартованная), АМгН, САП, ОТ4, ВТ16 и т. д. Металлические заполнители рифленые (гофровые) и ячеистой формы, а также сотовые, собираемые с помощью сварки, изготовляются аналогично заполнителям для паяных панелей. Изготовление сотовых заполнителей, собираемых склеиванием, иногда производится на установке АСП-1200, в которой фольга, разматываясь из рулона, проходит ультразвуковую очистку и обезжиривание в специальном растворе, далее на нее наносится клей, автоматически пробиваются дренажные отверстия и производится разрезка на листы заданной длины. Листы с клееными полосами собирают в пакеты (блоки), которые в специальном приспособлении стягивают под давлением  $(6 \dots 8) \cdot 10^2$  кПа и подают в печь, где выдерживают при температуре 150°С в течение 30 минут. Далее остывшие блоки подвергают механической обработке для получения форм обводов и контура, после чего в специальных устройствах производят растяжку для получения сот

требуемой формы (чаще шестигранной). Обработка растянутого сотового заполнителя производится с замораживанием водой.

Изготовление сотовых заполнителей может производиться и по другой схеме. Из рулона фольги вырезают листы требуемых размеров, в специальном приспособлении эти листы профилируют, пробивают дренажные отверстия и, после очистки и обезжиривания, на контактные площадки наносят клей. Последовательно устанавливая в приспособление профилированные листы, наращивают заполнитель до требуемых размеров. После склеивания и растяжки сотовые заполнители подаются на механическую обработку (с заливкой сот водой и замораживанием) для получения формы обводов и контура.

В качестве материала для заполнителя широко применяются также различные пенопласты, представляющие собой пористые газонаполненные материалы на основе полистирола, поливинилхлорида, полиуретановых, фенольных и других смол различных марок (ПС-1, ПС-4, ПХВ-1, ФК-20, ФК-40, ПУ-101, ПУ-101А, К-40). Некоторые из них (типа ФК, К-40) могут работать при температурах до 200° С. Заготовки пенопласта могут быть монолитными (плиточными) или в виде различных композиций твердых (порошок, крошка, пленка и т. д.) или жидких, применяющихся для самовспенивающихся пенопластов.

Развитие слоистых клееных панелей стало возможно благодаря достижениям в области разработки клеев, к которым предъявляется большой комплекс требований; главными из них являются высокая адгезионная и когезионная прочность, водо- и атмосферостойкость, коррозионная неактивность, сохранение прочностных свойств (теплостойкость) в широком диапазоне температур и при переменной температурном режиме, отсутствие выделения летучих веществ и небольшая величина усадки при отверждении во избежание образования пузырей и внутренних напряжений в клеевом слое, длительная и усталостная прочность, сопротивление старению, достаточная текучесть в процессе склеивания для заполнения конструктивных зазоров, ударная стойкость, отсутствие токсичности, длительный срок хранения компонентов клея. Кроме этих требований в некоторых конструкциях к клеям могут предъявляться специальные требования (например, возможность склеивания без подогрева, длительная жизнеспособность, радиационная стойкость, грибостойкость и бактериальная стойкость в тропических условиях и т. д.). Несмотря на то что в настоящее время нет идеальных клеев, удовлетворяющих одновременно всем этим требованиям, в авиационно-ракетной промышленности разработано большое количество марок клеев на основе различных синтетических полимеризационных и поликонденсационных смол и соединений: фенольно-формальдегидных, фенольно-эпоксидных, эпоксидных, фенольно-формальдегидно-каучуковых, фенольно-полиамидных и т. д. — с различными добавками: наполнителями, растворителями, катализаторами, отвердителями. Применительно к конкретным условиям работы и исходя из свойств материалов и требований к конструкциям, выбирается конкретная марка клея, поэтому почти все марки находят применение. Клеи могут быть низкотемпературными, которые склеиваются без нагрева или с нагревом до 100 ... 150° С (ПУ-2, Л-4, К-153, ВИАМ-Б3), или высокотемпературными, требующими для отверждения нагрева до 150 ... 200° С (БФ-2, БФ-4, МПФ-1, ВК-32-250, ВС-101, ВС-350, ВК-32-ЭМ). В зависимости от исходного состояния клеи могут быть жидкими, пастообразными, пленочными, твердыми и порошкообразными. Клеи бывают обычными по теплостойкости, когда они выдерживают нагрузки до 60 ... 70° С, и высокотеплостойкими, работающими до температур 300 ... 350° С и более (ВК-32-200, ВК-32-250, ВС-10т и др.).

Технологический процесс изготовления слоистых панелей зависит от конструкции панелей и применяемых материалов и содержит следующие основные этапы: 1) изготовление элементов конструкций: обшивок, кромочных и стыковочных профилей, заполнителя, дополнительных конструктивных элементов; 2) подготовка

поверхностей под склеивание; 3) нанесение клея; 4) открытая выдержка деталей с нанесенным слоем клея; 5) сборка всех деталей; 6) запрессовка панелей; 7) выдержка после запрессовки; 8) контроль готовых панелей. Иногда схема изготовления может несколько отличаться от приведенной.

Подготовка поверхностей деталей заключается в очистке их и пригонке друг к другу. Этап очистки склеиваемых поверхностей содержит механическую, физическую и химическую очистки. Механическая заключается в слесарной доработке, механической правке и очистке. Физическая — в удалении частиц масла, жира, грязи и т. д. с помощью различных растворителей и моющих средств; в условиях крупносерийного производства часто применяют очистку поверхностей горячими парами растворителей и методы ультразвуковой очистки. Химическая — в травлении поверхности в щелочных или кислых ваннах, что кроме очистки обеспечивает определенную шероховатость для увеличения площади склеиваемой поверхности. Для защиты от коррозии на поверхности металлических деталей иногда наносят покрытия (анодирование, цинкование, кадмирование).

Нанесение клея производится кистью, шпателем, роликом с фетровым покрытием (для сотовых заполнителей), распылением или окунанием поверхностей в клей. Порошкообразные и прутковые клеи наносят на подогретую до  $100 \dots 120^\circ \text{C}$  поверхность так, чтобы клей, расплавившись, растекался по всей поверхности ровным слоем. В последнее время широкое распространение находят клеевые ленты (пленочные клеи) с подложками из специальных тканей, сеток или бумаги и без подложек. Клеи обычно наносят на обе поверхности толщиной  $0,1 \dots 0,2 \text{ мм}$ .

После нанесения клея детали собираются в соединение; главной задачей сборки является обеспечение точного ровного прилегания склеиваемых поверхностей. Иногда операции нанесения клея и сборки совмещаются. После сборки склеиваемые соединения подвергаются запрессовке, при которой создается давление на склеиваемые поверхности до  $(0,7 \dots 1) 10^2 \text{ кПа}$  для плотного и равномерного соприкосновения деталей и получения равномерного по всей площади слоя клея. Запрессовка может производиться в специальных приспособлениях с вакуумным прижимом, в прессах с гидро- или пневмодавлением, в автоклавах, в прессах или приспособлениях с пружинными или механическими прижимами, в специальных стапелях с прижимными устройствами и т. д.

Режим склеивания, включающий температуру, выдержку, время нагрева и охлаждения, определяется маркой клея и конструкцией соединения. Нагрев соединений осуществляется различными способами: горячими газами, парами, проходящими через каналы приспособления или автоклава, электроконтактными нагревателями, инфракрасными лампами. В последнее время разработаны методы нагрева токами высокой частоты, которые обеспечивают более качественные клеевые соединения. В процессе склеивания (запрессовки) необходимо строго соблюдать температуру и режим выдержки. При склеивании цилиндрических замкнутых оболочек приспособление, на котором собрана оболочка, в течение всего процесса склеивания вращается со скоростью  $3 \dots 5 \text{ об/мин}$ .

По аналогичной схеме производится сборка и склеивание слоистых панелей с плиточным пенопластовым заполнителем. Особен-

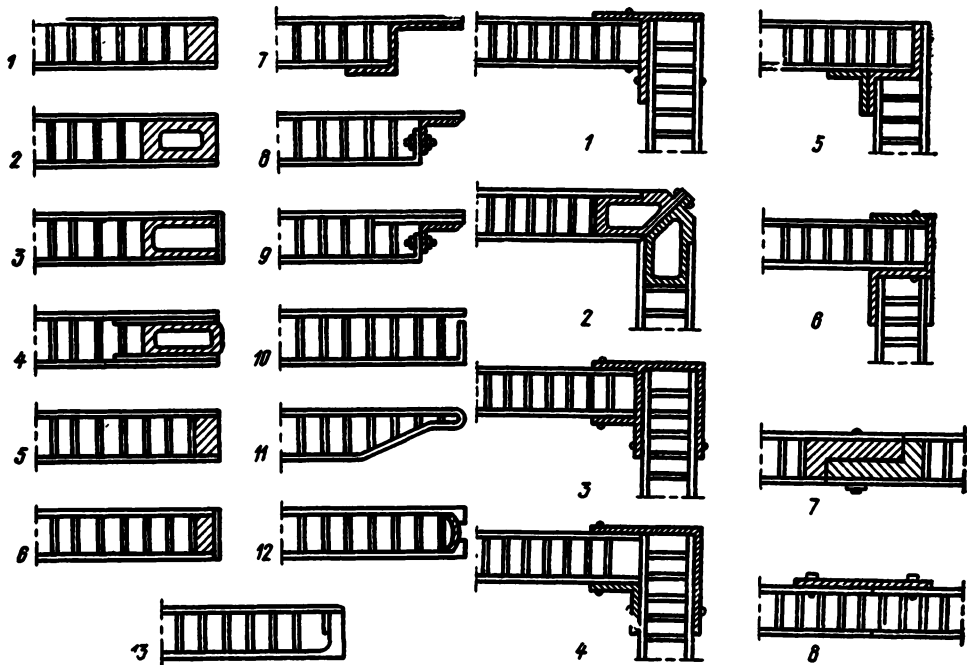
постью данного типа панелей является наличие в большинстве случаев армирования заполнителя металлом, стеклотекстолитом или другим материалом для увеличения жесткости и прочности панели. Армирующие элементы могут быть в виде брусков, плит, различных профилей и т. д. В этом случае вначале пенопластовые заготовки склеиваются с армирующими элементами, а после подаются на общую сборку панели.

Технология изготовления стеклотекстолитовых слоистых панелей с ткаными сотопластами и обшивкой, которые применяются в конструкциях радиопрозрачных корпусов, усложняется отдельными этапами пропитки и отверждения обшивок, изготавливаемых из нескольких слоев ткани, и сотопластов. Температурные режимы пропитки и отверждения могут быть многоступенчатыми. После изготовления отдельных элементов сборка и склеивание панели производятся по общей схеме.

Несколько отлична от общей схемы технология изготовления слоистых панелей с самовспенивающимися пенопластами, которые в исходном состоянии могут быть в виде порошка, пленок (типа ФК) или жидкостей (типа ПУ). Схема изготовления их предусматривает сборку и соединение металлической панели из двух обшивок, нанесение на внутреннюю поверхность панели клея (БФ-2 или БФ-4), далее засыпка или заливка во внутреннюю полость панели расчетного количества пенопласта. Собранный таким образом панель подается на термообработку. При вспенивании пенопласта внутри полости развивается давление до  $(3 \dots 5) 10^2$  кПа, поэтому, если конструкция панели недостаточно жесткая, она предварительно устанавливается в специальные ограничительные приспособления. Термообработка заключается в нагреве и выдержке панели в течение определенного времени при температуре до  $150^\circ\text{C}$  (для пенополиуретанов —  $60 \dots 70^\circ\text{C}$ ), при которой происходит вспенивание и отверждение пенопласта. Время термообработки в обычных термощкафах 6 ... 7 ч, при нагреве токами высокой частоты около 10 мин.

После склеивания панели подвергаются доработке, очистке и механической обработке стыковочных и посадочных поверхностей для дальнейшей сборки.

Несмотря на то что каждый этап изготовления клееных панелей подвергается тщательному контролю материалов и режимов, необходим и тщательный окончательный контроль. Технология его состоит из внешнего визуального контроля клееных швов, кромок панели, состояния поверхности обшивок и т. д.; простукивания специальным стержнем из мягкого металла поверхности склеивания с целью обнаружения местных непроклеев, утолщенных прослоек клея и т. д.; ультразвуковой резонансной дефектоскопии специальными приборами, которая позволяет обнаружить непроклеи, утолщенные прослойки, пористые участки клееного слоя и другие дефекты; выборочных испытаний на разрушение определенного количества изделий из серии (4 ... 20) %; специальных испытаний образцов — свидетелей.



**Рис. 28. Типовые способы заделки кромок трехслойных панелей:**

1—вклеивание алюминиевого или стеклопластикового бруса; 2—вклеивание полового алюминиевого бруса; 3—вклеивание бруса коробчатого сечения; 4—вклеивание полового бруса с усиливающими прокладками; 5—вклеивание замазки на основе эпоксидных смол; 6—вклеивание замазки и металлической пластины; 7—приклеивание Z-образных законцовок; 8—клеено-болтовые фланцы; 9—клеено-болтовые фланцы с усиливающими прокладками; 10, 11—законцовки подгибкой для малонагруженных панелей; 12, 13—заделка концов с усилениями, полученными химическим фрезерованием

**Рис. 29. Методы соединений слоистых панелей:**

1—с помощью T-образного профиля; 2—прочное разборное соединение для ненагруженных панелей; 3—с помощью специального профиля; 4—соединение с помощью двойных уголков; 5—упрочненное соединение с защитой от расслаивания; 6—усиленное соединение с помощью Z-образного профиля; 7—усиленное разборное торцовое соединение панелей; 8—торцовое соединение с помощью накладок

После окончательного контроля и доработки слоистые панели поступают на сборку оболочек. Широкому распространению клееных слоистых оболочек послужило успешное конструктивно-технологическое решение способов заделки кромок слоистых панелей (рис. 28) и методов их соединения между собой (рис. 29) в оболочки, обеспечивающих достаточную жесткость и прочность кромок и соединений и сопротивление ударным, вибрационным и другим нагрузкам.

Сборка оболочек из слоистых панелей, благодаря их жесткости, требует более простых сборочных ступеней, чем при сборке непанелированных конструкций. Сборка их аналогична схеме сборки панелированных оболочек и содержит те же стадии и этапы. В этом случае необходимо предусмотреть на слоистых панелях монтаж оборудования до подачи их на сборку. Методы соединения в за-



висимости от назначения и конструкции оболочки могут быть различными: болтовые, клепка, сварка. Собранные оболочки после испытаний, поступают на общую сборку аппарата или блока.

#### **Глава 4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБОЛОЧЕК КОРПУСОВ ИЗ МОНОЛИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ**

Наряду со сборными и многослойными конструкциями в летательных аппаратах находят применение конструкции оболочек и корпусов, собираемые из небольшого числа крупногабаритных монолитных деталей. К ним относятся монолитные шпангоуты, лонжероны, рамы, стрингеры и т. д. Особое место среди них занимают монолитные панели, включающие в себя обшивку с продольным и поперечным набором. В монолитных панелях ребра жесткости могут быть или только в продольном или в продольном и поперечном направлениях («вафельного» типа), или расходящимися лучами из одной точки, например, применение «вафельных» панелей в КА «Аполлон», «Скайлэб» и др. Применение монолитных панелей вызвано, с одной стороны, постоянным увеличением нагрузок на конструкции и стремлением в то же время сохранить их массовые характеристики, с другой стороны, развитием технологических методов изготовления монолитных панелей с достаточно тонкими ребрами и обшивкой, позволяющими реализовать этот массовый выигрыш.

Конструктивными преимуществами монолитных панелей по сравнению со сборными являются, кроме меньшей массы при равной прочности уменьшение трудоемкости проектирования за счет уменьшения количества рабочих чертежей, упрощение конструкции за счет уменьшения числа деталей, увеличение прочности, жесткости, устойчивости за счет уменьшения числа стыков и швов, некоторое увеличение внутреннего объема агрегата, высокая герметичность конструкции, высокое качество наружных поверхностей обшивок. Технологическими преимуществами монолитных панелей являются: уменьшение объема сборочных работ и во многих случаях суммарной механической обработки, уменьшение работ по герметизации, высвобождение производственных площадей и сборочного оборудования, упрощение сборочной оснастки, уменьшение стоимости изготовления панелей. Недостатками их являются значительная стоимость заготовительной оснастки, иногда низкий коэффициент использования металла, удлинение цикла подготовки и переналадки производства из-за длительности проектирования и изготовления оснастки. В опытном и единичном производстве применение монолитных панелей иногда может привести к удорожанию опытных изделий, технологические преимущества их полностью выявляются при серийном производстве.

Существует много способов изготовления монолитных панелей: механическое фрезерование из плит, прессование, прокатка, горя-

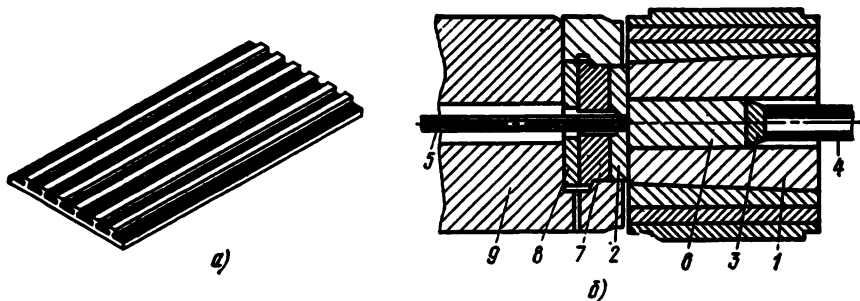


Рис. 30. Схема б прессования панелей а:

1—контейнер; 2—матрица; 3—пресс-шайба; 4—пресс-штемпель; 5—прессованная панель; 6—слиток; 7—прокладка матрицы; 8—подкладной диск; 9—мундштук

чая штамповка, литье, химическое фрезерование, размерная электрохимическая обработка и др. Методы выбирают исходя из конструкции панели, имеющегося оборудования и экономических соображений.

*Механическое фрезерование* монолитных панелей в настоящее время является одним из распространенных методов их изготовления, особенно в опытном и единичном производстве. Прямолинейные плоские панели фрезеруются из плит, получаемых горячей прокаткой или ковкой, на копировально-фрезерных станках, позволяющих получать ребра жесткости любого расположения, и станках с программным управлением. Панели криволинейной формы одинарной кривизны изготавливают из плит по двум схемам; фрезерование плоской плиты, затем гибка или гибка плоской плиты, а затем фрезерование криволинейной плиты. Первая схема проста и производительна при фрезеровании на многошпиндельных автоматах, но при гибке получается огранка на плоской стороне панели, что вызывает необходимость дополнительной ее обработки. При второй схеме обеспечивается хорошая точность обводов, но фрезерование гнутой плиты производится на сложных копировально-фрезерных станках с малой производительностью. Преимуществами механического фрезерования монолитных плит являются относительная простота оборудования, простота и дешевизна оснастки, возможность получения панелей различных конфигураций с любым расположением ребер жесткости и с любой толщиной, высокая точность и хорошее качество поверхности. Но такие недостатки, как низкий коэффициент использования металла, большая трудоемкость и худшие механические характеристики металла панели, обусловили рекомендацию этого метода только для опытного и единичного производства. В серийном производстве этот метод допустим только в период подготовки более производительного метода.

*Прессование* монолитных панелей (рис. 30) является одним из самых производительных способов их изготовления. При этом обеспечивается высокий коэффициент использования металла, получаются более высокие механические свойства заготовок и

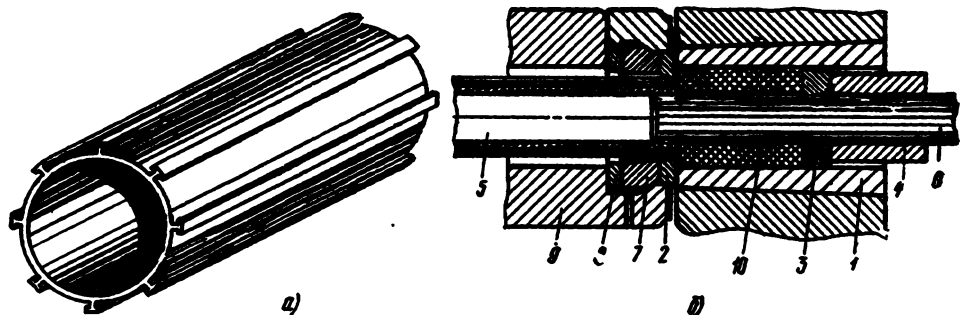


Рис. 31. Схема прессования  $b$  цилиндрической ребристой панели  $a$ :

1—контейнер; 2—матрица; 3—пресс-шайба; 4—пресс-штемпель; 5—прессованная панель; 6—игла; 7—подкладка матрицы; 8—подкладной диск; 9—мундштук; 10—слиток

достаточно высокое качество поверхности. Недостатком этого метода можно считать ограничения по форме и размерам панелей: можно получать панели только с продольными ребрами жесткости шириной до 850 мм и с толщиной обшивки не менее 2 ... 3 мм; длина панелей определяется емкостью контейнера. Для получения панелей с переменным по длине сечением применяется дополнительное фрезерование на копировально-фрезерных станках. Существует также метод прессования замкнутых панелей с наружными ребрами (рис. 31), который позволяет также получать панели с утолщением на конце. Цилиндрические панели далее разрезают и развертывают, получая плоскую или криволинейную панель. После прессования производится механическая обработка: фрезерование продольных кромок под сварку, плоскостей и кромок поперечных стыков на специальных копировально-фрезерных станках (типа КФП-1, ГФ-268, КФС-20, ФОЛ-2, ФОЛ-2М), фрезерование полок стрингеров и обшивок, законцовок и других усложненных формы по чертежу. После зачистки кромок и правки панель поступает на операцию гибки или на роликовых станках (типа КГЛ или ГЛС), или на гибочных прессах. Гибка на роликовых станках производится с установкой между ребрами буквых реек и поверх них металлического листа для обеспечения возможности прокатки между валиками и уменьшения огранки плоской поверхности панели. Гибка на прессах менее производительна и менее точна (больше огранка), но она дает возможность гибки панелей любой длины. После гибки обычно необходимы ручная доводка формы, термообработка и окончательная механическая обработка в основном стыковочных поверхностей и кромок. При необходимости внешняя поверхность панели шлифуется и полируется на станке ШПП-1 абразивной лентой и наносятся покрытия.

*Прокатка* монолитных панелей начала применяться в промышленности в последнее десятилетие. Преимуществами этого метода являются возможность получения панелей с толщиной обшивки менее одного миллиметра и панелей вафельного типа (рис. 32). Заготовками для панелей с продольными ребрами служат прессованные панели, которые в результате прокатки удлиняются за

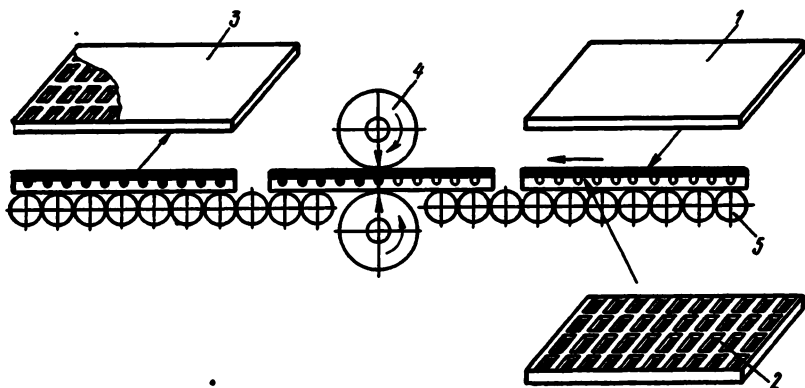


Рис. 32. Прокатка панелей вафельного типа:

1—плита-заготовка; 2—матрица; 3—готовая панель; 4—формообразующие ролики стана; 5—роликковое подающее устройство

счет утонения обшивки и ребер. При прокатке панелей вафельного типа листовая заготовка — плита, сложенная с матрицей, имеющей обратную конфигурацию, прокатывается через гладкие валки, где вследствие пластических деформаций металл заготовки перетекает в углубление матрицы. Посредством многократной прокатки с постепенным сближением валков получают вафельную панель требуемой формы. Процесс идет при температуре горячей штамповки. Технология обработки таких панелей и подготовки их к сборке в оболочки аналогична технологии изготовления прессованных панелей.

*Горячая штамповка* монолитных панелей на мощных прессах является методом, позволяющим получать такие панели, которые другими методами не могут быть получены: панели с любой конфигурацией и переменной толщиной по длине ребер и со стыковыми узлами, составляющими одно целое с панелью, что обеспечивает значительный выигрыш в массе и лучшую конструктивную прочность. Недостатками их являются: необходимость прессов большой мощности, длительный срок изготовления штампов, невозможность получения стенок малой толщины (менее 5 .. 8 мм), низкая точность и достаточно сложная технология. Поэтому горячештампованные панели подвергаются длительной и сложной механической обработке или химическому фрезерованию. Объем такой обработки может быть уменьшен применением операции горячей калибровки. Горячештампованные панели рекомендуется применять в сильнонагруженных конструкциях при серийном, крупносерийном и массовом производстве.

*Литье* монолитных панелей имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами: возможность получения панелей с различным расположением ребер, с более тонкой обшивкой, чем при прокатке, прессовании или штамповке, большая производительность, уменьшение объема механической обработки, уменьшение периода технологической подготовки производства, отсутствие

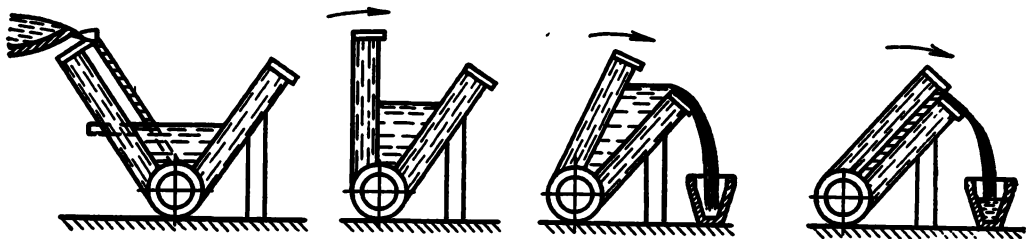


Рис. 33. Схема литья выжиманием

больших усилий в процессе формообразования, возможность более быстрой переналадки оборудования и т. д. Недостаток литых панелей — худшие механические характеристики, вследствие чего конструкция оболочки может получиться более тяжелой, чем изготовленная другими методами, поэтому они находят применение в малонагруженных агрегатах, когда их преимущества оказываются эффективными. Метод литья панелей должен удовлетворять следующим условиям: до застывания металла в любом сечении через него должен пройти весь металл, питающий последующие сечения, и излишек металла из последующих сечений; при застывании не должно образовываться усадочных раковин, т. е. застывающие участки должны подпитываться жидким металлом; процесс литья должен обеспечивать удаление шлаков из отливки; желательно обеспечивать более плотную структуру металла в процессе литья. Методами, отвечающими этим условиям, являются литье выжиманием, бесковшовая заливка под низким давлением, центробежное литье.

При литье выжиманием (рис. 33) в раскрытую форму заливается металл. Одна из створок-матриц поворачивается в направлении неподвижной, сплав заполняет форму, и излишек металла выливается из формы. При закрытии матрицы затвердевание металла идет от стенок матрицы, постепенно нарастающая выжимаемым металлом. Матрица, формирующая гладкую сторону панели, изготавливается из металла, а ребристую — песчаная, так как металлическая матрица создавала бы напряжения или даже разрушения в ребрах панели. Промышленность выпускает литейно-выжимные установки ЛВ-1, позволяющие отливать панели размерами до  $2000 \times 800$  мм с минимальной толщиной стенок до 1 мм.

Бесковшовая заливка под низким давлением применяется для получения заготовок замкнутых тонкостенных панелей (кольцевые оболочки). В обогреваемом тигле (рис. 34) находится расплавленный металл, который через металлопроводы под действием давления аргона (иногда воздуха) поступает в форму, состоящую из двух разъемных матриц, формирующих наружную поверхность панелей, и центрального песчаного стержня, смонтированного на металлической основе и формирующего внутреннюю поверхность с силовым набором. Металл проходит через форму в прибыльную часть, которая выполняет роль накопителя жидкого металла и

шлаков; при прохождении металла он постепенно нарастает между стенками отливки, питая ее до момента затвердевания. Непрерывное движение жидкого металла устраняет возможность появления раковин, благодаря чему получается плотная структура.

Центробежным литьем можно получать монококовые оболочки для нагруженных агрегатов. Достоинством этого метода является получение благодаря центробежным силам от вращения изложницы довольно плотного материала, не уступающего по прочностным характеристикам монолитным обечайкам, получаемым другими способами.

Технология подготовки литых монолитных панелей заключается в механической обработке их наружных и стыковочных поверхностей и кромок, а также различных местных усложнений формы. Объем механической обработки значительно меньше, чем в других способах получения панелей. После зачистки, нанесения покрытий и контроля они поступают на сборку оболочки.

**Химическое фрезерование** (размерное контурное травление) монолитных панелей нашло широкое распространение в ракетно-космической промышленности. Преимуществом его по сравнению с механическим фрезерованием является при обеспечении высокой точности (до  $\pm 0,05$  мм) возможность получения панелей самых разнообразных форм и размеров с широкими и узкими пазами за одну операцию с обеих сторон листа. При химическом фрезеровании исключаются деформации панелей, имеющие место при механической обработке. Метод позволяет уменьшить массу панелей и создавать более равнопрочные конструкции. Химически фрезерованные панели практически не требуют дальнейшей ручной слесарной доработки и после обработки местных усложнений формы (отверстия, пазы и т. д.) передаются на сборку. Хотя химическое фрезерование является одним из распространенных методов получения монолитных панелей, отметим, что при этом процессе прочностные показатели поверхностного слоя исходного материала

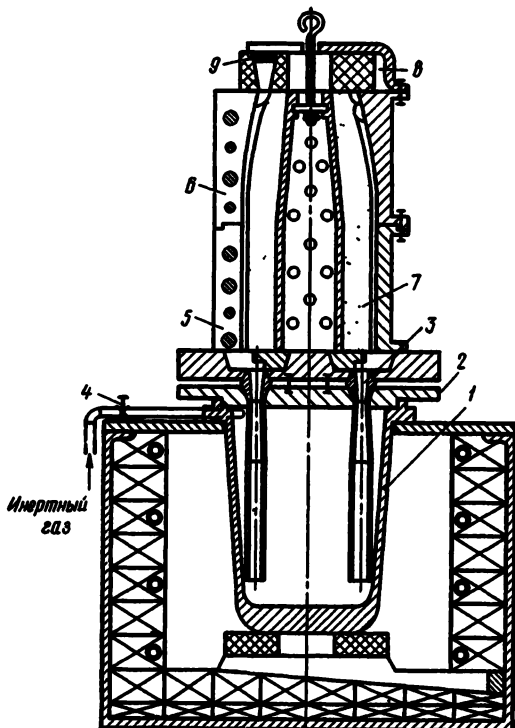


Рис. 34. Схема установки бесковшовой заливки под низким давлением:

1—тигель; 2—крышка тигля; 3—металлопровод; 4—кран; 5, 6—разъемные матрицы; 7—песчаный стержень; 8—прибыль; 9—стружковый фильтр

не улучшаются из-за отсутствия поверхностного пластического деформирования (наклепа).

*Сборка оболочек* из монолитных панелей благодаря их значительной жесткости, точности обводов и стыковочных поверхностей, производится также в более простых сборочных стапелях, чем непанелированных оболочек. При сборке монолитных панелей в оболочки вследствие значительной жесткости панелей необходимо предусматривать компенсирующие устройства. Соединение монолитных панелей в оболочки может производиться болтами, клепкой или сваркой. Схема сборки таких оболочек аналогична схеме сборки сборных оболочек панелированной конструкции и содержит те же стадии и этапы, для чего на монолитных панелях до подачи их на сборку оболочки должен быть предусмотрен монтаж оборудования и различных коммуникаций в возможно большей степени. Собранные и испытанные оболочки подаются на общую сборку аппарата или блока.

## **Глава 5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ**

### **5.1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ**

Одним из характерных и специфических агрегатов КА являются солнечные батареи (СБ), которые в настоящее время являются основным и самым распространенным (до 90% космических аппаратов) бортовым источником энергии. Фотоэлектрические преобразователи, используемые в СБ, являются прямыми преобразователями солнечной световой энергии в электрическую.

Достоинствами СБ являются относительная простота и компактность конструкции, безопасность эксплуатации, длительный срок работы (до нескольких лет), сравнительно высокий КПД преобразования (7 ... 14% и выше), высокая удельная мощность (мощность, отнесенная к массе СБ), достигающая до 100 ... 130 Вт/кг, относительно малая чувствительность к направлению падающего светового потока, что позволяет упростить, а в ряде случаев, исключить ориентацию СБ.

Недостатками их являются необходимость в дополнительных источниках энергии в период отсутствия освещенности; снижение мощности (в среднем на 10%) под действием радиации и метеорной эрозии, для уменьшения чего применяются специальные защитные устройства; отрицательное влияние на них резкого перепада температур; высокая стоимость.

Конструктивно солнечные батареи могут быть складными (панельными), рулонными и собранными на многогранных или цилиндрических корпусах КА. Устройство и основные элементы СБ показаны на рис. 35.

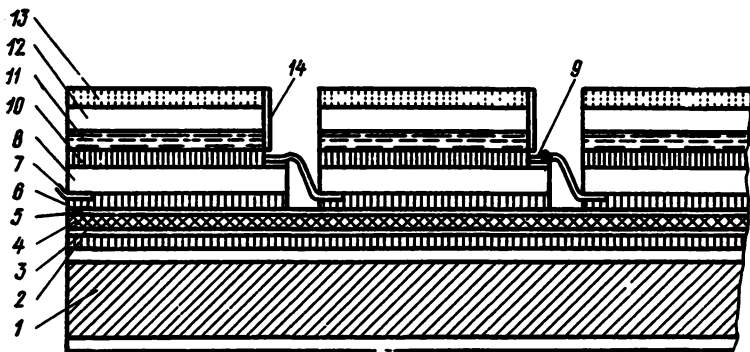


Рис. 35. Разрез солнечной батареи:

1—панель; 2—клеевой слой; 3—подложка из пластмассы, армированной стекловолокном; 4—плоские токонесущие шины для нейтрализации магнитного поля элементов; 5—подложка; 6—клей для подложки; 7—тыльный контакт на кремний *p*-типа; 8—фотоэлемент *n-p*-типа из монокристалла кремния; 9—лицевой контакт к кремнию *p*-типа; 10—клей для защитного стекла; 11—фильтр; 12—кварц; 13—просветляющий слой; 14—защитное стекло на фотоэлементе

Основными составными элементами солнечных батарей являются несущие панели каркасного типа, механизмы разворачивания панелей после выхода КА на орбиту, механизм ориентации панелей в направлении Солнца, фотоэлектрические преобразователи, смонтированные на панелях через подложку и соединенные в параллельно-последовательные цепи, химические аккумуляторы и зарядные устройства. В зависимости от типов батарей состав их может несколько отличаться от приведенного. Например, в СБ, собранных на корпусе КА, отсутствуют системы ориентации и разворачивания, в рулонных СБ отсутствуют несущие панели, роль которых выполняют тонкопленочные ленты.

Несмотря на большее применение в настоящее время панельных (раскладывающихся или стационарных) солнечных батарей, рулонные СБ имеют большую перспективу применения благодаря меньшей удельной массе на единицу площади СБ (до 0,9 ... 3 кг/м<sup>2</sup>). В рулонных СБ несущая подложка, на которую монтируются фотопреобразователи, изготавливается или из полимерных пленок, покрытых стекловолокном, или из металлических лент (титановые, алюминиевые сплавы), или тканевых лент из полимерных волокон. Лента с преобразователями обычно наматывается на барабан, снабженный устройствами для разматывания и сматывания различной конструкции, которые позволяют многократно свертывать и разворачивать панели.

Исходя из условий эксплуатации к СБ предъявляются весьма высокие требования по термо- и радиационной стойкости, стойкости против холодного схватывания (адгезии) в условиях вакуума, устойчивости против вибраций и перегрузок. Кроме того, панели и узлы соединений должны обладать определенной жесткостью как в сложенном, так и в раскрытом положениях, прочностью, заданными массовыми характеристиками и ресурсом



работы. Эти требования учитываются как в конструкции СБ (наличие различных защитных средств, смазок и т. д.) и при выборе материалов, так и в технологии их изготовления.

При назначении материалов СБ необходимо кроме учета приведенных требований согласовывать материалы стыкуемых деталей (например, панелей и подложек) по величине коэффициента термического расширения во избежание больших внутренних циклических напряжений при термоциклической нагрузке.

Основным несущим элементом конструкции СБ является плоская панель каркасного типа. Количество их в типовых СБ доходит до четырех—восьми и более. Для мощных батарей сложная панель (крыло) может иметь складную конструкцию, состоящую из нескольких (до 5 и более) простых панелей, соединенных между собой шарнирно. Панели могут ориентироваться в одной или двух плоскостях. Обычно в крупных батареях первая от корпуса, корневая (обычно, суженная) панель, вращается вокруг оси, перпендикулярной оси КА, а вращение вокруг перпендикулярной оси осуществляется или в узле соединения между 2-й и 1-й панелями, или в специальном узле наклона (например, на станции «Салют»), расположенном до узла вращения панелей (двухосный подвес карданного типа).

Материалом для несущих каркасных панелей в большинстве случаев служат магниевые или алюминиевые сплавы. При использовании бериллиевых сплавов удельная мощность возрастает до 46 Вт/кг, что в два раза превышает удельную мощность для алюминиевых каркасов. Заготовками являются стандартные профили из указанных материалов. К каркасу панелей приваривается или приклепывается значительное количество различных кронштейнов для присоединения панелей к узлам подвески, устройств для натяжения сетки с фотопреобразователями, для натяжения струн, служащих подкреплением сетки и т. д. Все эти устройства и кронштейны изготавливаются общемашиностроительными методами, в основном механической обработкой, материалы их согласуются с материалами панелей, в ряде случаев на них наносятся антифрикционные покрытия и смазки.

Сборка и сварка самих каркасных панелей производится в следующем порядке. После входного контроля заготовок последние поступают на разметку мест сварки, вырезов и т. д. и слесарную подготовку кромок под сварку. Сварка профилей в каркас производится в приспособлении, куда устанавливаются отдельные детали, фиксируются струбцинами, прихватываются и свариваются аргоно-дуговой сваркой. После зачистки швов и контроля качества сварки и размеров каркас поступает на отжиг, контроль и правку каркаса. Следующим этапом сборки является присоединение (сваркой, клепкой или болтовыми соединениями) кронштейнов, плат, уголков, втулок и т. д., для чего вначале производится слесарная подготовка мест соединения (подготовка кромок, посадочных мест, сверление отверстий, цековка посадочных мест под болты и т. д.), далее установка в приспособлении для точного ба-

зирования, фиксация и сварка или клепка. После зачистки швов и поверхностей производится установка подшипников, втулок поддерживающих струн и т. д., далее грунтовка, окраска эмалью, сушка, смазка, взвешивание, контроль, после чего производится сборка с сеткой (с фотоэлементами), монтажные работы, проверка собираемости с карданным подвесом (узел ориентации) и собранная панель поступает на испытания на раскрытие и проверку функционирования.

## 5.2. ИСПЫТАНИЯ СБ

Для солнечных батарей установлены в общем случае три вида испытаний: приемо-сдаточные, типовые и исследовательские (конструкторско-доводочные) испытания.

*Приемо-сдаточные испытания* проводятся после сборки всей панели для каждого комплекта. Программа их устанавливается конструктором в технических условиях. В нее могут входить следующие работы: контроль размеров, правильности монтажа подвижных частей, целостности изоляции, массы; центровка панелей со всеми установленными элементами и приборами; проверка крутящих моментов системы раскрытия, точности осей вращения относительно осей изделия в обезвешенном состоянии; контроль величины зазоров в подвижных соединениях и местах возможного заклинивания, прогиба панели при снятии обезвешивания; проверка работоспособности панелей на раскрытие и фиксацию в рабочем положении с одновременной проверкой времени раскрытия, сопротивления изоляции, целостности электроцепей, работы температурных датчиков и фотоэлементов. При приемо-сдаточных испытаниях допускаются регулировочные работы, если они возможны. Электрические параметры СБ проверяются во время автономных испытаний собранных КА.

*Типовые испытания* проводятся после приемо-сдаточных с целью проверки соответствия СБ техническим условиям и требованиям; относятся к имитационным испытаниям и проводятся на стенде, имитирующем установку СБ на аппарате. В программу типовых испытаний могут входить: испытания на работоспособность, проверка герметичности пневмосистем (если они имеются), испытания на имитацию транспортировки на специальном ударном стенде с последующей проверкой работоспособности, динамические ударные испытания на перегрузку, виброиспытания на специальном вибростенде со сложенными и раскрытыми панелями, испытания на воздействие повышенных (до  $140^{\circ}\text{C}$ ) и пониженных (до  $-160^{\circ}\text{C}$ ) температур, которые должны учитывать и температуры стерилизации, и испытания на ресурс (30 ... 50-кратное раскрытие и складывание панелей СБ). Испытания заканчиваются внешним осмотром и контролем электроцепей.

*Исследовательские (конструкторско-доводочные) испытания* проводятся в два этапа. На первом этапе проверяется по программе типовых испытаний работоспособность каркасов панелей, уст-

ройства ориентации, механизмов раскрытия и других механических узлов. На втором проверяется работа фотопреобразователей при действии ударных и вибрационных нагрузок. После испытаний СБ направляются на общую сборку КА.

## Глава 6. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЖРД

### 6.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Двигатель — важнейшая часть любой современной ракеты и КА. По функциональному назначению двигатели могут быть стартовыми, маршевыми, рулевыми, тормозными, стабилизирующими, корректирующими, для маневрирования на орбите и т. д. Жидкостный ракетный двигатель (ЖРД) является одним из наиболее сложных и совершенных видов двигателей внутреннего сгорания.

Режим работы жидкостных двигателей чрезвычайно напряженный. Детали ЖРД работают при значительных давлениях, подвергаются действию вибрационных нагрузок, высоких температур, эрозионному действию горячих истекающих газов, аэродинамическому нагреву и т. д., многие детали работают в контакте с агрессивными и коррозионно-активными средами. В связи со спецификой применения ЖРД, как части летательных аппаратов, главным требованием к ним является снижение массы и объема и обеспечение максимальной надежности при удовлетворении ТТТ, увеличение ресурса.

В настоящее время существует большое количество конструкций жидкостных двигателей, различающихся многими признаками. С точки зрения компоновки и соединения с корпусом различают двигатели рамной конструкции; однокамерные двигатели без силовой рамы; многокамерные двигатели (связка двигателей).

*Состав двигательной установки.* Большинство конструкций ЖРД содержит ряд типовых элементов: 1) емкости высокого давления (баки «О» и «Г») для компонентов топлива; 2) камера сгорания (КС); 3) система подачи компонентов из топливных баков в камеру сгорания с помощью турбонасосного агрегата (ТНА) или путем вытеснения их из баков газом (вытеснительная система); 4) устройство для формирования потока вытекающих из КС горячих газов и придания ему определенного направления: сопло, непосредственно соединенное с КС; 5) газогенератор (ГГ), вырабатывающий газ для вращения турбины ТНА или для вытеснительной системы; 6) система трубопроводов; 7) управляющие клапаны и исполнительные механизмы; 8) система емкостей и трубопроводов для питания жидкостью, воздухом или инертным газом исполнительных клапанов и управляющих механизмов. В настоящее время более широкое применение находят электрические системы; 9) устройство для соединения всех агрегатов и передачи силы тяги объекту: силовая рама или цапфы (шарнир) жесткой камеры

сгорания; 10) система управления вектором тяги в виде устройств для отклонения оси сопла КС, специальных рулевых камер сгорания, рулевых сопел, питаемых отработанным газом ТНА, или вдувом газа в сопло КС; 11) электросистема.

В двигательной установке наиболее характерным с конструктивно-технологической точки зрения узлом является непосредственно сам двигатель, основными элементами которого являются камера сгорания и форсуночная головка. В свою очередь, камеру сгорания подразделяют на следующие элементы: собственно камера сгорания (средняя часть), критическое сечение, сопло (критическая или нижняя часть), состоящее из охлаждаемой части и не охлаждаемого насадка.

Камера сгорания включает в себя в общем случае следующие типовые элементы и детали: внутренняя оболочка, или огневая стенка; наружная оболочка, или рубашка; связующие элементы стенки и рубашки; коллекторы и патрубки.

Форсуночная головка состоит из следующих типовых элементов и деталей: верхнее днище с патрубками и фланцами; среднее днище; нижнее огневое днище; кольцо ФГ; форсунки горючего и окислителя; патрубки; элементы жесткости.

В конкретных конструкциях двигателей могут быть некоторые отличия от этого состава.

## 6.2. КЛАССИФИКАЦИЯ

Камера сгорания является основной частью ЖРД и в зависимости от конструктивно-технологических признаков КС, ЖРД можно классифицировать следующим образом:

I. Двигатели средней мощности с охлаждением стенок КС одним из компонентов (горючее), протекающим в межрубашечном

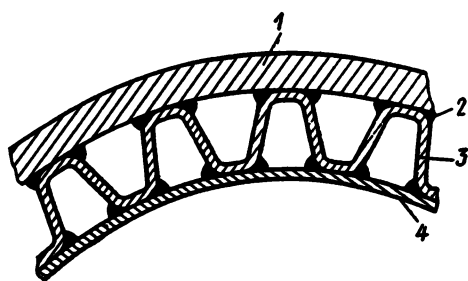


Рис. 36. Поперечное сечение камеры сгорания с гофрированными проставками:

1—рубашка; 2—припой; 3—гофрированная проставка; 4—стенка

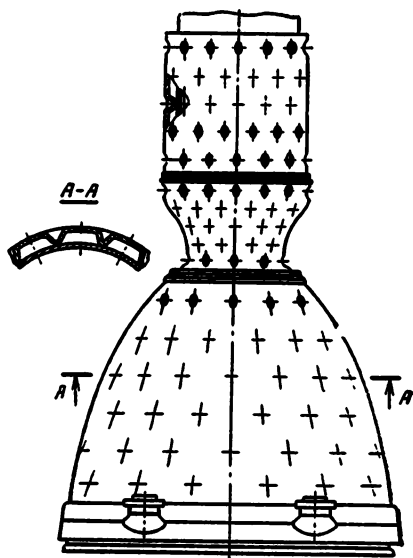


Рис. 37. Камера сгорания с выштамповками

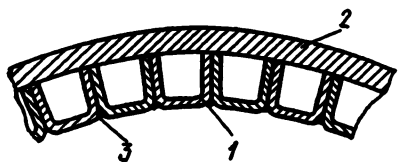


Рис. 38. Сечение камеры сгорания, образованного из U-образных профилей:

1—U-образные профили; 2—рубашка; 3—пайка

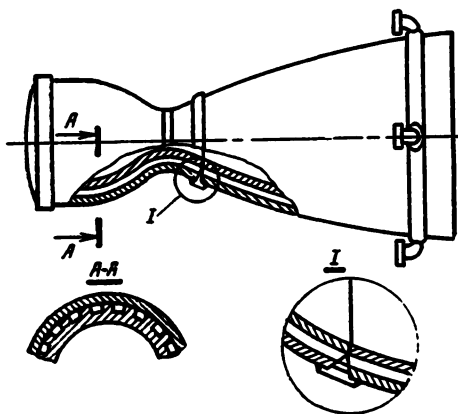


Рис. 39. Сечение камеры сгорания с фрезерованными пазами

пространстве; КС состоит из оболочек, связанных при помощи колец.

II. Двигатели средней и большой мощности, а также рулевые двигатели, имеющие КС с охлаждением одним из компонентов и с оболочками, связанными пайкой при помощи гофрированных проставок, установленных между рубашкой и стенкой (рис. 36).

III. Двигатели средней и малой мощности, имеющие КС с охлаждением одним из компонентов и с оболочками, связанными сваркой через выштамповки в рубашке (рис. 37).

IV. Двигатели, в камерах сгорания которых межрубашечное пространство образовано соединением пайкой U-образных профилей с рубашкой (рис. 38).

V. Двигатели малой и средней мощности, оболочки КС которых связаны при помощи ребер жесткости на одной из оболочек (стенке), получаемых фрезерованием, травлением или выдавливанием продольных канавок (пазов) переменной ширины (рис. 39).

VI. Двигатели большой и средней мощности, оболочка КС которых состоит из тонкостенных трубок переменного профиля, соединенных пайкой и скрепленных по наружной поверхности намоткой стальной ленты, проволоки или стекловолокна (рис. 40).

VII. Двигатели небольшой мощности с одной оболочкой без охлаждения стенок компонентами.

### 6.3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И СБОРКА КАМЕР СГОРАНИЯ С ГОФРИРОВАННЫМИ ПРОСТАВКАМИ

#### 6.3.1. Конструктивно-технологическая характеристика

Данный тип камер сгорания состоит из двух оболочек: внутренней (огневой стенки) и внешней (рубашки), связанных друг с другом пайкой при помощи гофрированных проставок (см. рис. 36). Подобные КС нашли широкое применение в конструкциях отечественных двигателей большой и малой мощности.

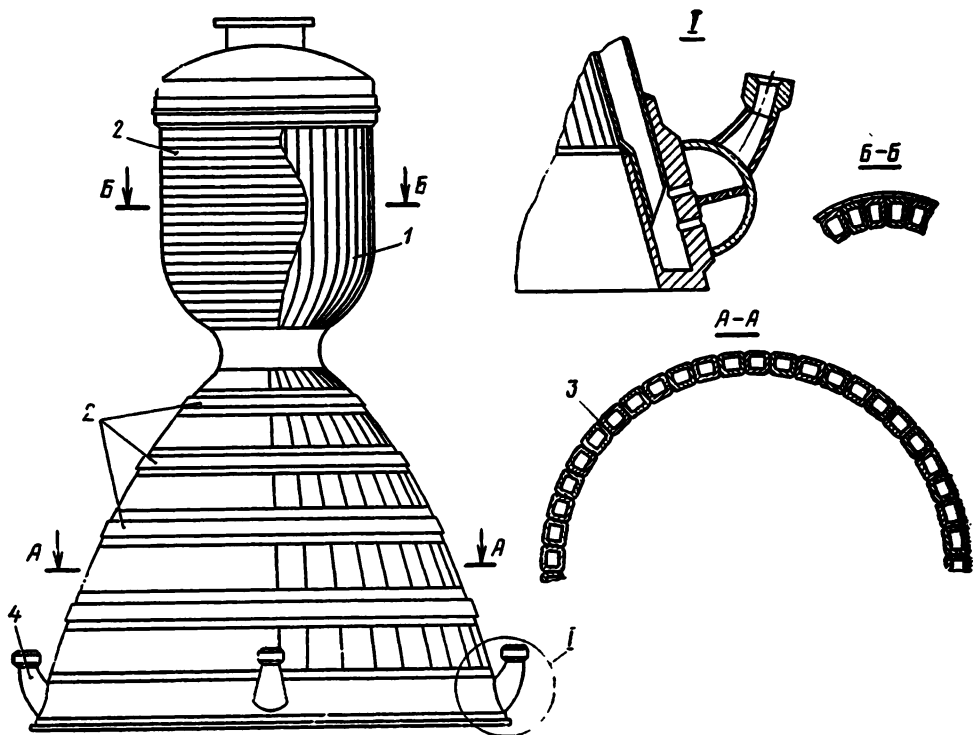


Рис. 40. Трубчатая камера сгорания:  
 1—трубка; 2—скрепление. 3—пайка; 4—патрубок

Камера сгорания с гофрированными проставками состоит из следующих основных частей: верхняя (головная) часть (форсуночная головка); средняя часть (собственно камера сгорания), включающая и критическое сечение, что обусловлено необходимостью вынести за критическое сечение кольцевой сварной шов, по которому производится стыковка средней и нижней части; нижняя (закритическая) часть (сопло), самая нижняя часть которой может быть одностенной, без охлаждения.

Требования к КС с гофрированными проставками, как и к любым КС, заключаются в следующем: 1) обеспечение правильной геометрической формы и размеров узла и всех элементов КС. Диаметральные размеры выполняются по 5 ... 7 классу, диаметр в критическом сечении по 2 ... 3 классу; 2) обеспечение заданной прочности и жесткости после сборки; 3) обеспечение герметичности конструкции в целом и отдельных элементов; 4) обеспечение заданного режима протекания компонента в межрубашечном пространстве: заданного расхода компонентов и перепада давлений в трактах «О» и «Г»; 5) обеспечение высоких требований по коррозионной стойкости к материалам и по эрозийной стойкости к владышам в критическое сечение.

Материалы для элементов КС кроме конструктивных показателей должны иметь хорошие технологические свойства: штампуемость, свариваемость, способность к пайке без флюсов, во избежание загрязнения флюсами внутренних полостей, обрабатываемость резанием.

*Стенка* двигателя подвергается непосредственному воздействию давления горячих газов и коррозионному действию компонентов, протекающих в межрубашечном пространстве. Для лучшего отвода тепла материал стенки должен обладать хорошей теплопроводностью и конструктивно часто имеет небольшую толщину. Стенка обычно изготавливается из листовой нержавеющей стали Х18Н9Т, жаропрочных (ЭИ659) или титановых сплавов.

*Рубашка* в большинстве КС подобного типа является основным несущим элементом конструкции, воспринимающим силовые воздействия от работающего двигателя. Кроме силовых нагрузок рубашка подвергается коррозионному действию протекающих в межрубашечном пространстве компонентов. Рубашка обычно изготавливается толще, чем стенка, и иногда толщина меняется по длине КС. В качестве конструкционных материалов для рубашки применяются легированные стали ЭИ654, ЭИ763 (23Х2Н13ФА), ЭИ811 (Х21Н5Т), ЭП-56, 10Х16Н45А, иногда титановые сплавы.

*Гофрированные проставки* в процессе работы двигателя подвергаются действию протекающего компонента. Сложная их конфигурация обуславливает высокие технологические свойства материалов проставок, особенно по холодной штампуемости и способности к пайке. Материалом для них служат малоуглеродистые стали 08кп и 10кп, иногда нержавеющая сталь Х18Н9Т.

### 6.3.2. Общая схема изготовления

Относительная маложесткость и особенности конструкции элементов КС, достаточная сложность и высокие требования по точности форм и размеров обуславливают особую схему в технологии изготовления и сборки подобного типа КС.

Конструкция КС (средняя и нижняя часть) делится на отдельные кольца (обечайки), состоящие из собранных с помощью пайки поясков стенки, рубашки и проставок. Таких поясков может быть от 3—4 до 10—12. В конструктивном отношении такие собранные кольца представляют достаточно жесткую конструкцию. Изготовление их производят параллельно, затем собирают на специальных оправках и сваривают по окружности, получая готовые блоки средней и нижней части КС, далее средняя и нижняя части собираются вместе, после контроля и испытаний весь узел подается на сборку с форсуночной головкой.

### 6.3.3. Изготовление стенки и рубашки средней части

Внутренняя оболочка средней части КС — огневая стенка — состоит из цилиндрической части, представляющей собой обечайку с прямолинейными образующими, и криволинейной части — фа-

сонной обечайки. Цилиндрическая часть в большинстве случаев не членится на отдельные обечайки и изготавливается из одной заготовки. Криволинейная часть может изготавливаться как из нескольких поясков, так и из одной обечайки. Для обеих частей используются листовые заготовки, вырезаемые из стальных или титановых полос по заданным размерам. Цилиндрическая часть стенки изготавливается из листовой заготовки гибкой и сваркой по продольной образующей.

Криволинейная часть изготавливается гибкой из специально раскроенной листовой заготовки, в результате чего получается коническая заготовка, и последующей штамповкой или выдавливанием на токарно-давальном станке. Перед штамповкой продольные сварные швы, полученные аргоно-дуговой сваркой, зачищают, проковывают и отжигают, после чего заготовки поступают на рентгеноконтроль качества швов.

В некоторых случаях стенку средней части КС получают целиком штамповкой (вытяжкой) или раскаткой из листовой заготовки, одновременно формируя прямолинейную и криволинейную части.

После сварки двух частей стенки производится ее калибровка. Калибровка имеет целью придание заготовке точной геометрической формы и устранение коробления после сварки. После калибровки производится контроль формы и размеров с помощью шаблонов.

Калибровка стенки производится следующими методами: вручную, на прессе, на гидростенде, взрывом (рис. 41), растяжением на разжимном приспособлении, обкаткой на оправке на токарно-давальном станке.

Рубашки по конструкции бывают сборные и цельноштампованные из листовых заготовок. Тонкостенные цельноштампованные рубашки применяются в двигателях небольшой тяги; их изготовление аналогично изготовлению стенок. Рубашка сборной конструкции состоит из ряда обечаек, соединенных кольцевой сваркой.

Цилиндрические обечайки изготавливают из листовых заготовок гибкой с последующей продольной сваркой и зачисткой и отжигом шва. Торцы обечаек перед сваркой подвергают механической об-

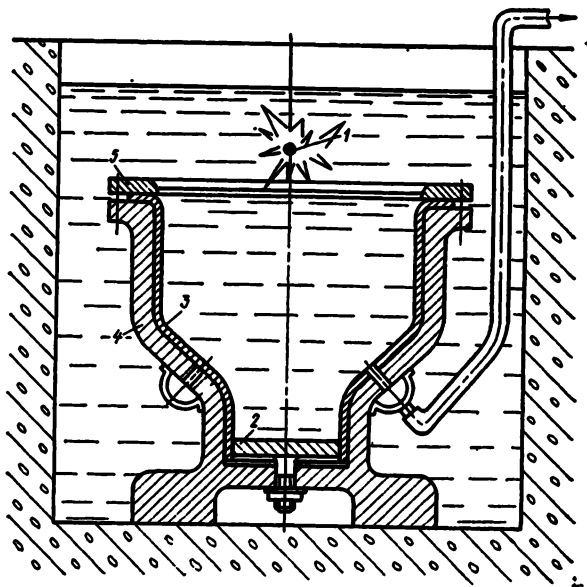


Рис. 41. Калибровка стейки КС взрывом:

1—заряд; 2—прижим; 3—заготовка КС; 4—матрица; 5—прижимное кольцо



работке. Криволинейные обечайки получают штамповкой из конических обечаек. Перед сборкой рубашки производится комплектация обечаек по размерам. Сборка производится на сварочном приспособлении для кольцевой сварки, после чего производится автоматическая сварка под слоем флюса или автоматическая аргоно-дуговая сварка. После сварки производится контроль сварных швов (рентгеноконтроль, гамма-дефектоскопия, магнитные или другие неразрушающие методы контроля).

После сборки и сварки для придания окончательной формы рубашка подвергается калибровке или механической обработке по всему профилю. Наиболее производительным методом для рубашек вследствие значительной толщины является калибровка на торчно-давильных станках с подогревом.

### **6.3.4. Особенности изготовления оболочек нижней части**

Нижняя (закритическая) часть КС работает в менее напряженных условиях, чем средняя, поэтому нижняя часть выполняется более тонкостенной.

*Стенка* нижней части имеет в большинстве случаев постоянное сечение. Наиболее распространенным способом получения ее является формовка из конической заготовки с продольным швом. Сопловые части КС небольших размеров, особенно по длине, могут получаться из листовых заготовок вытяжкой.

*Рубашка* сопловой части КС часто имеет сборную конструкцию, состоящую из отдельных кольцевых поясков-обечаек, иногда даже различной толщины, изготавливаемых по отдельности аналогично стенке и соединяемых кольцевой сваркой. Изготовление некоторых обечаек рубашки усложняется значительным количеством операций механической обработки (сверление отверстий, подготовка торцов, посадочных мест под коллектор и т. д.). После сборки рубашка подвергается калибровке.

Одной из сложных операций при изготовлении рубашки нижней части КС является установка коллектора с патрубками, состоящего из отдельных участков полутороидальной формы, свариваемых друг с другом, так как она содержит большое количество слесарно-пригоночных работ и ручной сварки. Вместе с тем, к этой части КС предъявляются высокие требования по герметичности, прочности и надежности.

### **6.3.5. Изготовление гофрированных проставок**

Гофрированные проставки служат для соединения оболочек (стенки и рубашки) между собой и формирования межрубашечного пространства — тракта для протекания охлаждающего компонента топлива. После сборки и пайки проставок с оболочками обеспечивается необходимая жесткость КС. Исходя из условий работы, сборки и пайки к гофрированным проставкам (рис. 42) предъявляются следующие требования: 1) правильность геометри-

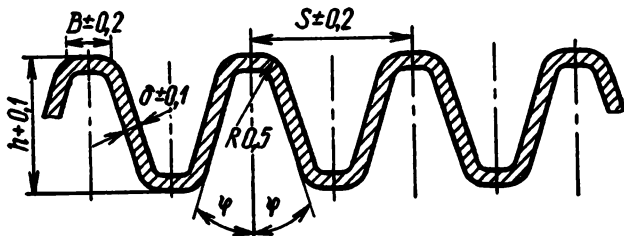


Рис. 42. Профиль гофрированных проставок

ческой формы и точность размеров проставок по профилю и длине; 2) не допускается несимметричность профиля (завал гофров); 3) утонение гофров должно быть не более 0,1 мм; 4) прилегание проставок к оболочкам или объемному шаблону должно соответствовать ТУ; 5) зазоры между соседними поясами проставок по длине профиля КС после сборки должны соответствовать ТУ; 6) после механической обработки торцов поясков не допускается наличие заусенцев на гофрах, торцы поясков имеют фаску  $45^\circ$ ; 7) продольный сварной шов на поясах гофров должен быть зачищен заподлицо с гофрами и находиться в сборке со стороны рубашки; 8) поверхность проставок перед сборкой под пайку должна быть тщательно очищена и обезжирена; 9) на поверхности гофров не допускаются царапины и другие поверхностные дефекты.

В камере сгорания имеется значительное количество поясков гофрированных проставок (до 10 ... 20 и более), которые могут отличаться по форме, углу наклона и количеству гофров в пояске. По форме применяются цилиндрические, конические и фасонные по длине пояски проставок. Проставки обычно изготавливаются с прямыми параллельными оси КС гофрами, но иногда, например, в критическом сечении, проставки могут быть с наклонными (винтовыми) гофрами. В ряде случаев на криволинейных участках камеры сгорания проставки вместо фасонных могут выполняться коническими или цилиндрическими, но при этом ширина поясков гофров должна быть такой, чтобы зазор между прямолинейной образующей проставки и криволинейной образующей оболочки был не более 0,1 ... 0,2 мм (рис. 43). Такая замена существенно улучшает технологичность КС, это может служить одним из оснований при назначении количества поясков в фасонной ее части. При проектировании двигателей следует по возможности избегать применения фасонных поясков проставок из-за сложности их изготовления и сборки.

Заготовки гофров в виде лент вырезаются на механических ножницах по шаблону с припусками по длине и ширине и зачищаются.

Формообразование проставок производится двумя методами: на кривошипных прессах в штампах; прокаткой в профилированных валах.

*Формообразование проставок на прессах в штампах наиболее простой, универсальный и распространенный метод (рис. 44). Об-*

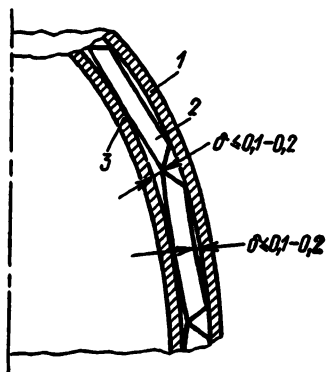


Рис. 43. Замена фасонных поясков коническими поясками проставок:

1—рубашка; 2—проставка; 3—стенка

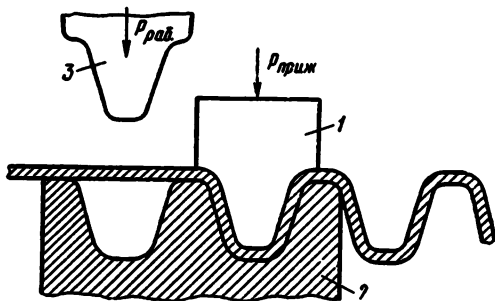


Рис. 44. Формообразование гофрированных проставок на кривошипных прессах в штампах:

1—прижимной пуансон; 2—матрица; 3—рабочий (гибочный) пуансон

разование гофра происходит за один ход пресса. Штмп имеет два пуансона: рабочий (гибочный), жестко закрепленный на плите ползуна пресса, и прижимной, связанный с ползуном через пружину. Прижимной пуансон, опускаясь раньше рабочего, прижимает ленту по профилю выполненного гофра, что сохраняет изготовленные гофры от втягивания в ручьи гибочного пуансона. После прижима гофров опускается рабочий пуансон, который отштамповывает один гофр. Подъем пуансонов происходит в обратном порядке. Метод штамповки проставок при ручной подаче малопродуктивен, имеются конструкции штампов для штамповки проставок с автоматической подачей ленты, однако их конструкция сложна. Несмотря на малую производительность метод универсален и точен. Этим методом можно получать цилиндрические проставки с прямыми и наклонными гофраами и конические проставки с прямыми гофраами.

*Прокатка гофров в профилированных валках* дает возможность получать цилиндрические проставки с прямыми гофраами. Для формообразования применяются установки с профилированными валками. Зубья валков эвольвентного профиля с корригированием: они имеют утонение по ширине зуба, равное половине толщины ленты, расстояние между осями валков увеличено на толщину ленты заготовки. Изготовление гофрированных проставок методом прокатки в профилированных валках очень продуктивно. Но этот метод имеет ряд недостатков, которые ограничивают широкое применение его в производстве: искажается профиль проставки по ширине вследствие прогиба профилированных валков под действием значительных сил при прокатке; поскольку эвольвентное зацепление не обеспечивает полной обкатки и имеется проскальзывание, то во избежание задиоров на поверхности и утонений гофров необходимо применять обильное смазывание заготовки или прокладывание за-

готовки с обеих сторон целлофаном (слюдой); быстро изнашиваются профилированные валки, что приводит к большим задирам на поверхности и искажению формы гофров; практически невозможно изготовление конических поясов проставок из-за большой сложности и стоимости профилированных валков.

После формообразования гофров от гофрированной ленты по шаблону отрезается полоса необходимых размеров, подготавливаются кромки под сварку в поясок. Сварка концов пояса производится либо роликовой, либо ручной аргоно-дуговой сваркой без присадки, после чего производят правку проставки и зачистку шва. Придание необходимых размеров по длине и снятие фасок на торцах производится на специальных оправках, на которых проставка крепится бандажами, на токарном станке. После механической обработки необходимо удаление заусенцев. Контролю подвергаются размеры проставок, профиль гофров, качество сварки и зачистки кромок.

Конические проставки часто получают из цилиндрических путем заготовки гофров в специальных штампах, при этом изменяются шаг и высота гофров; разница в высотах гофров по концам пояса допустима до 0,2 мм. При большой разнице диаметров конического пояса приходится их штамповать на специальных штампах из серповидной заготовки, получая непосредственно конические пояска. В тех случаях, когда фасонные пояска не удается заменить прямолинейными, их обычно перештамповывают из цилиндрических или конических. Для окончательного уточнения формы гофрированных проставок они подвергаются калибровке чаще всего методом штамповки резиной.

После окончательной калибровки и контроля гофрированные проставки подвергаются травлению и в ряде случаев никелированию поверхности с толщиной покрытия 7 ... 16 мкм. Подготовка проставок под пайку имеет следующие этапы: промывка в горячей воде; электролитическое обезжиривание; 3-кратная промывка в горячей воде; промывка в холодной воде; травление; промывка в холодной воде; нейтрализация в щелочной ванне.

### **6.3.6. Нанесение припоя и сборка комплектов под пайку**

Обычно отдельно осуществляется сборка средней и нижней частей, а затем друг с другом. На сборку детали подаются после контроля размеров, форм, качества сварных швов, качества поверхности, с очищенными и обезжиренными поверхностями, с подготовленными под сварку кромками, с нанесенными покрытиями. Стенки и рубашки комплектуются по диаметральным размерам.

Иногда производится проверка прилегания комплекта по мелу: наружная поверхность стенки и внутренняя поверхность рубашки обмазываются мелом; на стенку устанавливаются гофрированные проставки, на сборку надевается (запрессовывается) рубашка; после разборки комплекта проверяются отпечатки мела по всей поверхности, кроме цилиндрической части, которые должны быть на 75% поверхности. При необходимости наносится гальваническое

покрытие с предварительной очисткой поверхности оболочек. Подготовка поверхностей оболочек под пайку включает электролитическое обезжиривание и травление поверхности.

Нанесение припоя может производиться различными методами в зависимости от применяемого припоя: металлизацией (шоопированием); гальваническим методом; нанесением припоя в виде фольги.

*Нанесение припоя металлизацией.* Этим методом наносятся припой на медной основе (№ 87, МНЦ-5,5-11,5 и др.), низкая пластичность которых в холодном состоянии не позволяет получать их в виде фольги. Нанесение припоя производится при помощи аппарата-металлизатора проволочного типа (ГИМ-1). Проволока припоя непрерывно подается через головку металлизатора в зону высокой температуры, создаваемой электрической дугой или кислородно-ацетиленовым пламенем, припой расплавляется и струей газа (воздуха) в расплавленном состоянии направляется на поверхность нагретой до определенной температуры детали. Скорость движения частиц припоя достигает 200 ... 250 м/сек. Ввиду малого расстояния от поверхности до головки металлизатора (~50 мм) частицы расплавленного припоя не успевают остыть и, ударяясь о поверхность, растекаются и прочно пристают к ней. Места, не подлежащие покрытию припоем, защищаются накладными технологическими кольцами.

Нанесение припоя производится в несколько проходов. Качество контролируется по массе, толщине, сплошности.

Метод нанесения припоя металлизацией обеспечивает достаточно равномерную толщину, высокую производительность и возможность нанесения припоя на поверхности сложной формы. Недостатком этого метода является повышенное содержание окислов, что может отрицательно сказаться на качестве пайки.

*Нанесение припоя гальваническим методом* производится осаждением припоя на поверхности детали из гальванической ванны; в некоторых случаях припой может осаждаться в виде многослойного покрытия, состоящего из компонентов припоя. Преимуществом метода является равномерность толщины слоя нанесенного припоя на всех участках поверхности без загрязненности его окислами. Гальваническим методом могут наноситься не все припои.

*Нанесение припоя в виде фольги* применяется для припоев, поддающихся прокатке в ленты толщиной 0,05 ... 0,12 мм. При этом методе припой (№ 2, 40) толщиной примерно 0,1 мм нарезается лентами шириной 15 ... 20 мм, которые наматываются и прихватываются к поверхности стенки при помощи точечной сварки конденсаторными сварочными аппаратами ТКМ-7. После насадки гофров на стенку припой аналогично наносится на наружную поверхность гофров или на внутреннюю поверхность рубашки и прихватывается. Перед нанесением припоя производится дополнительное обезжиривание поверхности.

*Сборка комплекта средней части КС* производится на специальной оправке под прессом. Основные этапы сборки: 1) установка стенки на оправке; 2) нанесение припоя на стенку и прихватка его; 3) установка гофрированных проставок на стенку, допускаются зазоры между соседними поясками до 0,5 мм; 4) нанесение припоя на наружную поверхность проставок; кроме кольцевых лент припоя, устанавливаются и прихватываются продольные полоски припоя, предупреждающие опускание поясков при установке рубашки; 5) установка рубашки под прессом; 6) нанесение припоя на горловину рубашки и установка верхнего пояска проставок с припоем; 7) развальцовка горловины; 8) прихватка компенсатора у горловины; 9) снятие собранного узла с оправки; 10) роликовая сварка компенсаторов со стенкой; 11) приварка трубопровода вакуумной системы; 12) пневмоиспытания для проверки герметичности узла.

### 6.3.7. Пайка

Пайка КС является наиболее сложным и ответственным этапом. На качество ее влияют как правильное проведение самого процесса, так и качество изготовления и подготовки деталей. Пайка КС производится в печах при созданном в межрубашечном пространстве вакууме с целью достижения более плотного прилегания собранных элементов, для чего иногда пайку ведут в компрессионно-вакуумных печах, где в межрубашечном пространстве создается вакуум, а снаружи — избыточное давление до  $(3 \dots 4) \cdot 10^2$  кПа.

Собранная КС устанавливается на загрузочное приспособление. Вся сборка помещается в контейнер, к которому приварены трубки для подвода защитного газа. Перед загрузкой собранного узла в печь производится откачка воздуха из межрубашечного пространства КС до вакуума  $(3 \dots 6) \cdot 10^{-2}$  гПа. После этого собранная КС загружается в печь. Перед загрузкой узла в печь для вытеснения воздуха из контейнера через него продувается защитный газ (аргон или азот). Для обеспечения равномерного нагрева узла и во избежание стекания припоя в нижнюю его часть, вся сборка приводится во вращении со скоростью около 20 об/мин.

В зависимости от применяемого припоя устанавливаются следующие режимы пайки: припой ПМНЦ-5,5-11,5:  $T = 1190 \dots 1245^\circ \text{C}$ ; выдержка 10 ... 12 мин; припой № 2 (Г70НХ):  $T = 1170 \dots 1190^\circ \text{C}$ ; выдержка 15 ... 20 мин; припой № 40 (Г40НХ):  $T = 1180 \dots 1220^\circ \text{C}$ ; выдержка 15 ... 20 мин.

По окончании выдержки производится выгрузка контейнера из печи при продолжении откачки и вращения приспособления. Остывание контейнера производится на воздухе. Вскрытие контейнера и прекращение подачи защитного газа производится при  $T = 100 \dots 150^\circ \text{C}$ . После охлаждения узла срезаются прихватки контейнера и трубопровод вакуумной системы. После пайки КС подвергаются контролю внешним осмотром и обмером КС.

Аналогично средней части производится сборка, подготовка под пайку и пайка блока нижней сопловой части камеры сгорания.

### 6.3.8. Сборка КС из блоков средней и нижней частей

После пайки блоки средней и нижней части КС подвергаются контролю и испытаниям. 1. *Гидроиспытания* по полости межрубашечного пространства. Давление воды  $1,1 \dots 1,2 P_{\text{раб}}$ ; выдержка 10 ... 15 мин. При испытаниях не допускается деформация оболочек (отрыв стенки, вспучивание и т. д.), а также выпотевание жидкости на наружную поверхность узла. 2. *Пневмоиспытания* межрубашечного пространства для определения герметичности блока после пайки. Испытания проводятся погружением блока к воду. Давление воздуха в тракте  $(3 \dots 15) \cdot 10^3$  гПа. 3. *Рентгеноконтроль* имеет целью выявить дефекты пайки (непропай, заплавления). 4. *Механическая обработка торцов блоков*. После испытаний и контроля производится механическая обработка торцов (срезание компенсато-

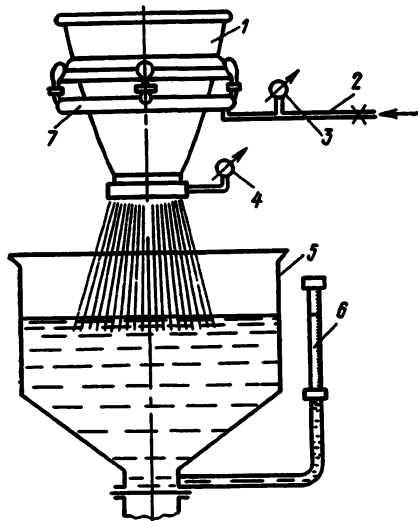


Рис. 45. Пролит блока КС:

1—блок КС; 2—напорный трубопровод; 3—входной манометр; 4—выходной манометр; 5—мерная емкость; 6—водомерная трубка; 7—технологический коллектор

ров, обточка для проливов или стыковки и т. д.) на токарных станках по шаблонам. 5. *Пролит блоков КС* производится с целью определения расхода жидкости через тракт охлаждения и перепада давления между входным и выходным сечениями тракта на специальных гидростендах (рис. 45). В качестве рабочей жидкости применяется питьевая вода. По данным о расходе и перепаде давлений производят комплектровку блоков при сборке КС. 6. *Комплектовка блоков* средней и нижней части для сборки производится по результатам обмеров стыковочных диаметров и данных проливов.

Блоки устанавливаются на приспособление и свариваются аргоно-дуговой сваркой. Сварной шов зачищается снаружи и внутри и контролируется. В зависимости от конструкции КС стыковка производится либо без установки дополнительной проставки, либо с установкой разрезного пояска гофрированной проставки (рис. 46). Затем устанавливается и приваривается разрезное соединительное кольцо. Эти соединительные кольца могут выполнять роль компенсаторов — дросселирующих элементов, регулирующих скорость протекания компонента через тракт охлаждения. Собранный КС также проходит цикл контроля и испытаний.

#### 6.4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТРУБЧАТЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ

**Конструкция.** Трубчатые КС находят широкое применение в отечественных и зарубежных двигателях. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с КС с гофрированными проставками: надежное и строгое формирование тракта для охлаждающего компонента благодаря более точному технологическому обеспечению проходных сечений в профилированных трубках, что обеспечивает эффективное охлаждение стенки; снижение массы КС (на 10 ... 20%); повышение удельной тяги двигателя; меньшая трудоемкость; значительное уменьшение (~ в 10 раз) технологической оснастки; уменьшение объема сборочных и механических работ.

Конструктивно трубчатые КС состоят из профилированных по профилю камеры сгорания трубок переменного сечения (200 ... 500 штук), спаянных между собой (см. рис. 40). Трубки в наиболее на-

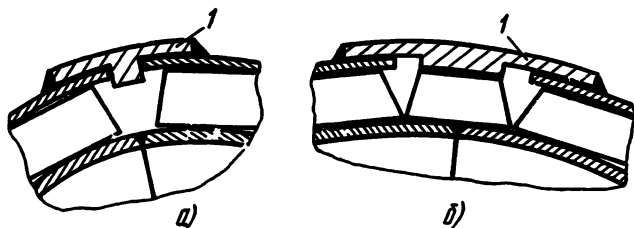


Рис. 46. Соединение блоков средней и нижней части КС:

*a* — без дополнительной проставки; *b* — с дополнительной проставкой; 1 — соединительное кольцо

пряженных сечениях скрепляют бандажами, приваренными к трубчатому корпусу через промежуточные кольца. У среза сопловой части припаивается концевое кольцо, являющееся в некоторых конструкциях также коллектором. Для соединения с форсуночной головкой верхняя цилиндрическая часть КС заканчивается обычно соединительным кольцом, припаянным к трубчатому корпусу. В некоторых конструкциях производится скрепление цилиндрической части КС намоткой металлической проволоки (пайкой) или стекловолокна с пропиткой синтетическими смолами. Кроме обычной трубчатой конструкции КС известны так называемые двухходовые схемы охлаждения трубчатых КС, когда наиболее теплонапряженная часть стенки камеры состоит из двух (наружного и внутреннего) рядов трубок, которые постепенно к сопловой части переходят в однорядную конструкцию. В некоторых случаях трубки могут быть спирально закручены по оси КС, что увеличивает скорость протекания компонента.

Материалами для трубок служат нержавеющие стали (типа Х18Н9Т, Х18Н10Т), никелевые, медные, иногда алюминиевые и титановые сплавы и т. д. Материалами для усиливающих колец, коллекторов, силовых стыковочных колец и патрубков являются в основном нержавеющие и жаропрочные, а в ряде случаев титановые сплавы.

*Изготовление трубок.* В качестве исходных заготовок для трубчатых КС применяются цельнотянутые трубки, диаметр и толщина которых определяются условиями прочности и теплопрочности и обычно находятся соответственно в пределах 2 ... 10 мм и 0,3 ... 0,8 мм.

К трубкам предъявляются высокие требования по качеству и шероховатости поверхности, по утонению стенок, не допускаются трещины, царапины, задиры и другие концентраторы напряжений на поверхности.

Для изготовления профилированных трубок применяют различные методы формообразования: гидроформование, протягивание через профильную фильеру (холодная протяжка), обкатка, штамповка из листа и др. Задачей формообразующих операций является получение необходимой формы сечения трубки, переменного сече-



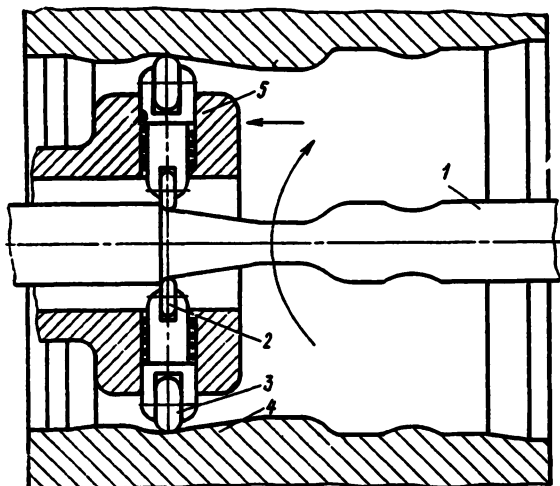


Рис. 47. Схема получения трубки переменного по длине сечения методом обкатки:

1—профилируемая трубка; 2—обкатные ролики; 3—опорные ролики; 4—копир; 5—оправка обкатного приспособления

Для снятия внутренних напряжений. Для придания необходимой формы поперечному сечению полученные трубки переменного сечения подвергаются гидроформованию в специальной матрице при помощи гидростатического давления  $(2 \dots 4) \cdot 10^5$  гПа. Профильные трубки переменного сечения и формы можно получить в несколько переходов гидроформованием.

Распространен способ протягивания трубок через фильеру на специальных станах с гидравлическим или механическим приводом. Для получения трубок переменного сечения по длине применяются составные, регулируемые фильеры вместо жестких, применяемых для постоянных по сечению трубок.

Для изготовления трубок, предназначенных для КС с большой степенью расширения, иногда применяется метод штамповки из листа. Продольный стык кромок сваривают роликовой или аргонодуговой сваркой. Гибка трубок по профилю КС производится в гибочных штампах на прессах.

После формообразующих операций (иногда производится подсечка концов трубок) выполняется механическая обработка торцов фрезерованием или шлифованием. После изготовления трубки подвергают визуальной контроле и испытаниям на прочность гидроопрессовкой и проливу для определения гидравлических потерь. По результатам пролива трубки разбиваются на ряд групп. Комплектация трубок для одной КС производится из одной группы.

Изготовление коллекторов, концевых и усиливающих колец производится из листовых заготовок разметкой, раскроем, гибкой, штамповкой. В ряде случаев необходима механическая обработка кромок под сварку. Изготовление усиливающих и стыковочных ко-

ния и заданного профиля трубки по длине в соответствии с профилем КС.

При обкатке на профильно-обкатных станках роликами, положение которых определяется профилем камеры, исходная цилиндрическая трубка приобретает переменное по длине сечение (рис. 47). Оправка с роликами вращается и перемещается вдоль оси.

Во избежание недопустимого утонения при значительных перепадах диаметров трубок переменного сечения обкатка может производиться в несколько переходов с промежуточным отжига-

лец, патрубков и других жестких деталей производится механической обработкой.

**Сборка КС.** После комплектовки трубки поступают на сборку. Предварительно на внутреннюю поверхность концов трубок (на 20...30 мм) наносят меловой раствор (или раствор  $Al_2O_3$ ) для предотвращения затекания припоя внутрь трубок, а также зачищают и обезжиривают.

Сборка трубок производится на специальных технологических оправках, имеющих форму КС. Вначале устанавливается нижнее кольцо, далее трубки. Зазоры между трубками (менее 0,1 мм), требования к которым весьма высоки, обеспечиваются ручной подгонкой. Для фиксации трубок при сборке и подгонке применяются технологические кольца и бандажи (рис. 48). После подгонки трубок устанавливаются конструктивные скрепляющие бандажи: на поверхность собранных трубок устанавливаются кольца из тонкого (0,15...0,3 мм) листа, которые привариваются к трубкам точечной конденсаторной сваркой, после чего на сборку устанавливаются с натягом конструктивные бандажи, которые фиксируются на тонкостенных кольцах с помощью сварки. После установки верхнего соединительного кольца и фиксации верхнего и нижнего колец с бандажами, технологические бандажи снимаются и сборка может быть снята с оправки и отправлена на пайку.

**Пайка КС.** Припой чаще всего наносится на внутреннюю поверхность сборки металлизацией (напылением) или в виде ленты (в зависимости от типа). Так как растекание припоя в зазоре обеспечивается за счет капиллярного эффекта, то для создания дополнительных капилляров в местах с большими зазорами (например, места соединения кольцевых деталей с трубками) применяются припой с порошкообразными наполнителями, не плавящимися при температуре пайки, но хорошо смачивающимися жидким припоем. Подобный пастообразный припой наносится с помощью специальных шприцев или лопаточек.

Для пайки трубчатых КС чаще всего применяются высокотемпературные припой группы Ni-Mn-Cr, серебряные, медные, молибдено- и хромоникелевые коррозионностойкие и др. В последнее время разработаны высокотемпературные твердые припой с добавками палладия, лития, золота, бора и др., которые отличаются высокой коррозионной стойкостью, жаропрочностью, смачиваемостью с большинством конструкционных материалов. Температура пайки лежит в пределах 1100...1225°С.

Типовая технология пайки предусматривает кроме режимов пайки минимальное растворение материала трубок припоем, одно-

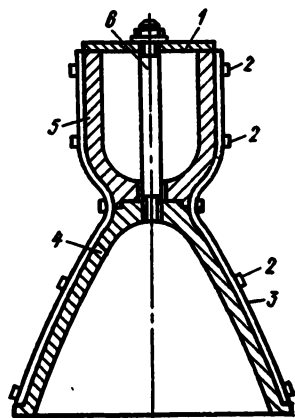


Рис. 48. Оправка для сборки КС трубчатой конструкции:

1—диск; 2—технологические кольца; 3—трубки; 4—нижняя часть; 5—верхняя часть; 6—стяжка

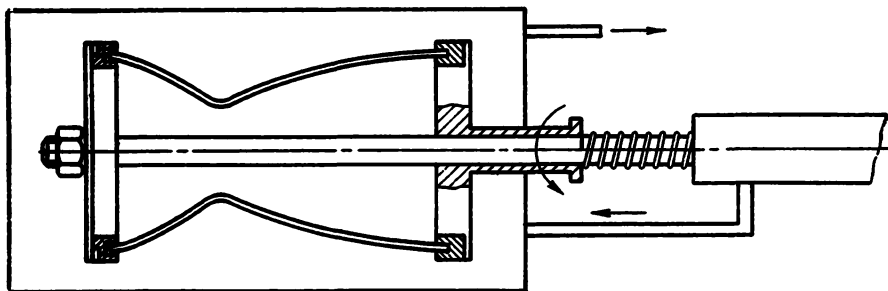


Рис. 49. Пайка трубчатых камер сгорания в контейнере

временность и равномерность нагрева и остывания элементов камеры, равномерность растекания припоя, минимальные деформации паяемых элементов и т. д.

В настоящее время почти всегда применяется пайка в печи контролируемой атмосфере инертных газов (аргон, гелий и др.) или азота, которая осуществляется двумя методами: с горизонтальным положением и вертикальным положением КС.

Вертикальная пайка применяется чаще всего при изготовлении крупных КС. Паяемая КС устанавливается вертикально на оправке контейнера, который после герметизации (например, сваркой) помещается в печь. Нагрев может быть газовым или электрическим. Достоинствами вертикальной пайки являются отсутствие перемещения паяемого узла в процессе пайки, отсутствие нагрузки на КС, что исключает нежелательные деформации. Недостаток — сложность и высокая стоимость оборудования для пайки и потребность в больших производственных площадях. Отметим, что каждая вертикальная печь для пайки крупных КС является уникальным сооружением.

Для пайки небольших КС чаще применяется горизонтальная пайка, сходная с пайкой КС с гофрированными проставками. КС устанавливается на оправке манипулятора (рис. 49). Для создания контролируемой атмосферы (смесь аргона и фтористого бора) паяемый узел помещается в герметичный сварной контейнер. Для обеспечения равномерного нагрева и растекания припоя сборка вращается. Нагрев до температуры пайки производится в течение 1 ... 1,5 ч, выдержка в течение 15 мин, охлаждение сборки в печи до 800° С, затем извлечение контейнера из печи и охлаждение на воздухе.

*Контроль КС.* После пайки производится контроль качества пайки визуально (внешним осмотром), «на свет» (внутри КС вводится источник света с целью определения непропаянных участков), ультразвуковым методом, рентгено- и  $\gamma$ -излучением. Исправимые дефекты пайки устраняются ремонтной пайкой с помощью газовой горелки или методом инфракрасного нагрева с помощью инфракрасного пистолета для пайки, который обеспечивает фокусирование луча от кварцевой лампы мощностью 1200 Вт на поверхности 100×2,5 мм и предохраняет поверхность от окисления благодаря

подаче аргона. Ремонтная пайка производится припоями, температура пайки которых на 60 ... 100° С ниже, чем у основного припоя. После ремонтной пайки КС подвергается испытаниям на прочность и контролю герметичности по полости охлаждающего тракта, затем контролируется прочность и плотность паяных швов трубок.

Для определения перепада давления производится холодный пролив камер по установленной методике. По данным пролива производится разбивка КС на группы для комплектации их с форсуночными головками или для подбора комплектующих элементов. После пролива КС просушиваются продувкой сухим горячим воздухом или в специальных сушильных вакуумных печах шахтного типа.

*Конечные операции.* После испытаний КС поступают на механическую обработку торцов под стыковку с форсуночной головкой. Обрабатываются также посадочные поверхности под приварку патрубков и других деталей. На внутреннюю поверхность КС во избежание эрозии горячими газами и для предохранения от коррозии, оплавления, растрескивания наносят термостойкие покрытия из двуокиси циркония, карбида вольфрама или других композиций. Покрытия наносят обычно газопламенным или плазменным напылением. В тех случаях, когда эти покрытия оказываются пористыми (например, двуокись циркония), для защиты от действия атмосферной влаги на них наносится специальное лаковое покрытие.

В последнее время скрепление КС производится намоткой стекловолоконных материалов, пропитанных различными смолами. Эта операция выполняется в конце процесса изготовления КС. Скрепление стекловолоконными материалами по сравнению с металлическим снижает вес КС, стоимость, уменьшает цикл изготовления, обеспечивая в то же время необходимые прочностные характеристики. После намотки производится отверждение связующего стеклопластика, контроль, окраска упрочняющего покрытия, сушка.

После контрольных испытаний КС поступает на сборку с форсуночной головкой.

## 6.5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ КС С ВЫШТАМПОВКАМИ

*Конструкция.* КС с выштамповками конструктивно представляет собой камеру, состоящую из гладкой огневой стенки и рубашки, соединенных между собой сваркой через выштамповки, имеющиеся на рубашке (см. рис. 37). За счет выштамповок на рубашке в межрубашечном пространстве формируется тракт для протекания охлаждающего компонента. Выштамповки на рубашке располагаются рядами, число которых исчисляется десятками. Количество выштамповок на разных участках камеры различно: от 10 ... 15 до 40 ... 50 штук в ряду. Выштамповки по форме представляют конусообразные выступы высотой 3 ... 7 мм, диаметром у основания 6 ... 10 мм. В некоторых конструкциях КС в закритической сопловой части выштамповки имеют форму продольных выступов по всей длине сопла. КС с выштамповками находят применение в неболь-

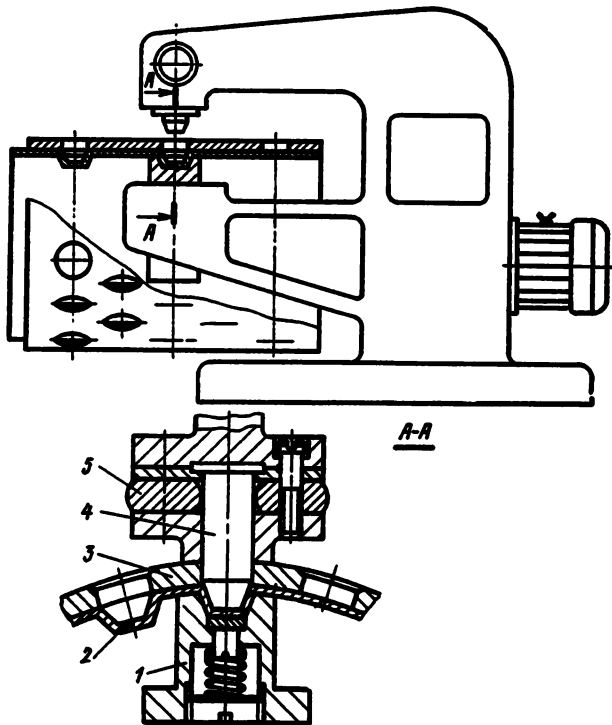


Рис. 50. Штамповка выштамповок:

1—матрица; 2—рубашка; 3—кондуктор (шаблон); 4—пуансон; 5—резиновый буфер

ших и средних двигателях, они обладают высокими надежностью, прочностными и массовыми характеристиками.

Исходя из условий работы и технологии изготовления (штамповка и сварка) материалами для оболочек назначают низкоуглеродистые стали Ст08кп, Ст10кп, СТ20, в ряде случаев высокопрочные нержавеющие стали и сплавы, обладающие хорошей штампуемостью и свариваемостью.

*Изготовление КС.* Общая схема заключается в изготовлении на первом этапе кольцевых двухстеночных блоков (обечаек), которые на втором этапе собираются и свариваются в КС.

Обечайки стенок и рубашек получают штамповкой или раскаткой цилиндрических или конических заготовок, получаемых из листов толщиной 2,5 ... 6,5 мм. Обечайки могут иметь продольный шов, который должен быть зачищен и отожжен. После штамповки или раскатки обечайки приобретают форму соответствующей части КС (блок цилиндрической части, сопла, насадки). Торцы обечаек механически обрабатываются под сварку и контролируются с помощью шаблонов. Далее заготовки рубашек поступают на операцию штамповки выступов (выштамповок). Расположение их задается чертежом или схемой расположения. Требования по точности диаметров невысоки, а по высоте выштамповок строги, с расположением

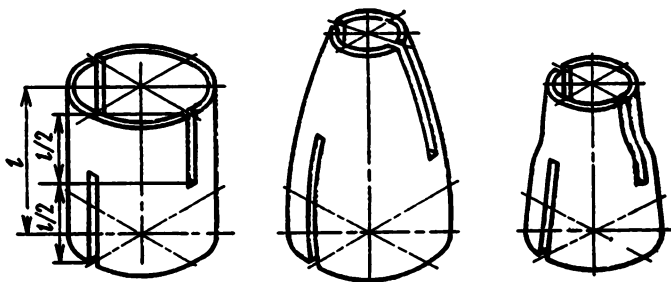


Рис. 51. Оболочки камеры сгорания после прорезки пазов

ем долусков в плюсовую сторону. Штамповка их производится с помощью специальных шаблонов на механических прессах (рис. 50). Необходимо избегать расположения выштамповок на сварном шве. Штамповка производится с ручной передвижкой заготовок.

Контроль размеров и форм выступов производится с помощью шаблонов. После штамповки рубашки подвергаются отжигу, правке и зачистке. Далее они поступают на сборку и сварку со стенками. Для обеспечения более плотного прилегания выштамповок рубашки к стенкам КС рубашка прорезается в осевом направлении несколько более половины длины с каждого торца в двух диаметрально противоположных местах (рис. 51). При одевании пружинящей благодаря разрезам рубашки на стенку обеспечивается плотное прилегание выштамповок к стенке, и компенсируются диаметральные погрешности. Собранные блоки устанавливаются в приспособлении и подаются на сварку на машинах для точечной сварки типа МТП-75, МТП-150, МТП-200. Сварка выштамповок производится в определенном порядке, обеспечивающем наименьшее коробление камеры. После контроля качества точечной сварки прорезы в рубашке завариваются ручной или полуавтоматической аргоно-дуговой сваркой. После отпуска и зачистки швов блоки поступают на механическую обработку торцов под сварку. К блоку сопла на этой стадии привариваются коллектор и концевое кольцо у среза сопла. К блоку цилиндрической части в некоторых конструкциях приваривается соединительное кольцо для стыковки камеры с форсуночной головкой. Здесь же привариваются и другие конструктивные элементы (кронштейны, уголки и т. д.). Готовые блоки — обечайки — подвергаются контролю герметичности и прочности по полости межрубашечного пространства, а также проливу, по результатам которого комплектуются блоки КС и подбираются компенсирующие элементы.

Скомплектованные блоки устанавливаются в приспособлении на манипуляторе, состыковываются кромки стенок и блоки закрепляются. Стенки блоков свариваются аргоно-дуговой сваркой, после чего швы контролируются и зачищаются. Сварка рубашек блоков производится через соединительные разрезные кольца (рис. 52), которые выполняют роль компенсирующих элементов для регули-

рования расхода охлаждающего компонента через межрубашечное пространство. После сварки кольцевых швов на рубашках блоков производится контроль качества сварки, отпуск на снятие внутренних напряжений. Готовые КС поступают на испытания на герметичность и прочность, проливы по межрубашечному пространству и другие испытания.

Недостатком технологии подобных КС является большое количество ручных операций (слесарных, сварочных), правок, пригонок и т. д., длительный цикл изготовления, трудность контроля сварных соединений, особенно сварных точек, что заставляет строго соблюдать технологические режимы.

## 6.6. ИЗГОТОВЛЕНИЕ КС С ФРЕЗЕРОВАННЫМИ ПАЗАМИ

*Конструкция.* КС с фрезерованными пазами конструктивно представляет собой камеру, состоящую из стенки, на наружной поверхности которой вдоль образующей профрезерованы пазы переменного сечения по длине, и гладкой рубашки, соединенных пайкой (см. рис. 39). В некоторых конструкциях пазы фрезеруются под некоторым углом к образующей, что за счет эффекта закрутки увеличивает скорость протекания охлаждающего компонента.

Иногда встречаются комбинированные конструкции КС: цилиндрическая, критическая и закритическая зоны сопловой части выполняются с фрезерованными пазами, а раструб сопла имеет трубчатую или с гофрированными проставками конструкцию.

Материалом стенки в большинстве случаев являются сплавы на медной основе, которые хотя и обладают меньшей прочностью, но имеют высокую теплопроводность, что в условиях работы КС позволяет достигнуть достаточно высокой конструктивной прочности, вследствие того что температура медной стенки значительно ниже, чем у стенки из стали с низкой теплопроводностью (рис. 53). Распространенным материалом для стенки является бронза БрХ08, которая удовлетворительно штампуются, обрабатывается резанием, паяется, сваривается. Материалом для рубашки, часто являющейся несущим элементом камеры, назначают высокопрочные стали (ЭП-57), титановые сплавы и др.

*Технология изготовления.* Общая схема заключается в изготовлении на первом этапе отдельных блоков КС (блоки средней и закритической частей) и сборке и соединении блоков друг с другом пайкой на втором этапе.

Заготовка стенки получается из листа горячей штамповкой-вытяжкой на прессах с припусками под механическую обработку, к которой предъявляются высокие требования по точности. В начале механической обработки отрезаются оставшиеся после штамповки днище и отбортовки. Расточка и обточка стенки производится на токарно-копировальных станках с базами соответственно по наружной и внутренней поверхности. Контролируются как диаметральные размеры и профиль, так и толщина стенки в различных сечениях.

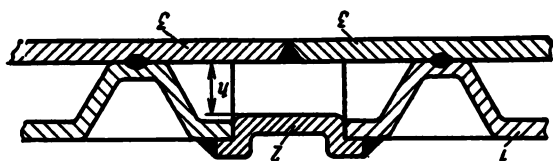


Рис. 52. Соединение блоков камеры сгорания по рубашке:

1—рубашка; 2—соединительное кольцо; 3—стенка

Фрезерование пазов на наружной поверхности стенки производится на копировально-фрезерных полуавтоматах с гидроследящей системой. Пазы стенки прямоугольной формы, переменного сечения по длине (изменяются как ширина, так и глубина пазов), к ним предъявляются высокие требования по точности и шероховатости поверхности, на кромках не допускаются заусенцы и надрезы. Фрезерование производится дисковыми фрезами шириной 2,0... 2,5 мм в три перехода. После фрезерования пазов их подвергают слесарной обработке и контролю.

Заготовка рубашки получается чаще всего из листового материала штамповкой-гибкой с подогревом и сваркой, иногда горячей штамповкой (вытяжкой). Расточка и обточка рубашки проводится аналогично стенке. Механически обработанные оболочки КС после очистки и обезжиривания комплектуются по диаметральным размерам и поступают на операцию покрытия — никелирования — гальваническим способом (толщина слоя 0,12... 0,15 мм). После установки стенки на оправке манипулятора на внешнюю поверхность ее наносится припой в виде ленты, закрепляемой конденсаторной сваркой. На стенку напрессовываются рубашки, выступающие края стенки отбортовываются и завариваются и ввариваются трубки вакуумной системы.

В качестве припоя применяется припой ПСР38МНЦ. Пайка производится в печи, в межрубашечном пространстве создается вакуум. После пайки качество швов проверяется рентгеноконтролем, проводятся испытания на герметичность и прочность. Далее блоки подаются на механическую обработку торцов под стыковку и сварку, привариваются коллекторы, заваривается сопловой срез, к блокам привариваются все наружные элементы, после чего они подвергаются проливу для определения перепада давлений и по результатам пролива комплектуются.

После слесарной доработки скомплектованные блоки поступают на сборку и после обезжиривания устанавливаются на приспособлении для сварки. Соединение блоков производится электронно-лучевой сваркой, обеспечивающей высокое качество сварного шва. Для сварки рубашек устанавливается наружное соединительное

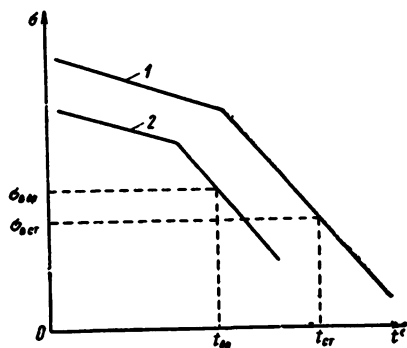


Рис. 53. Конструктивная прочность стенок:

1—сталь; 2—бронза



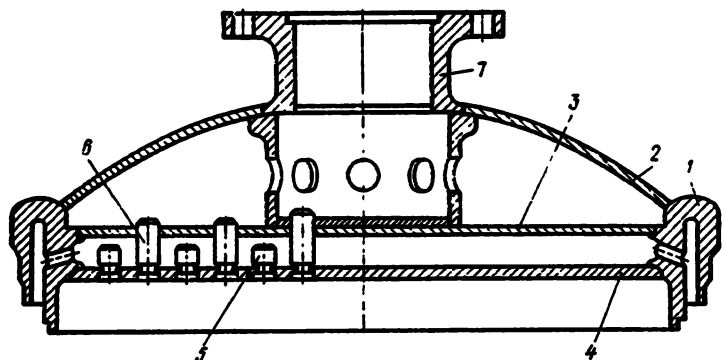


Рис. 54. Конструкция форсуночной головки с плоским днищем:

1—силовое кольцо; 2—верхнее днище; 3—среднее днище; 4—огневое днище; 5—форсунки горючего; 6—форсунки окислителя; 7—патрубок

кольцо. После контроля и зачистки сварных швов КС подвергается гидро- и пневмоиспытаниям и проливу, после чего подается на сборку с форсуночной головкой.

#### 6.7. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И СБОРКА ФОРСУНОЧНЫХ ГОЛОВОК И ФОРСУНОК

Конструктивно ФГ состоит из следующих основных деталей (рис. 54): силового кольца, являющегося основным несущим элементом головки, верхнего, среднего и нижнего (огневого) днищ, приваренных к силовому кольцу и формирующих две полости окислителя и горючего, форсунок горючего и окислителя, впаянных в днища, и ряда других мелких жестких деталей (патрубки, втулки, фланцы, штуцера, кронштейны, элементы жесткости и т. д.) общемашиностроительного типа. Наибольшее распространение получили головки с плоским огневым днищем, как наиболее простые и технологичные.

К конструкции ФГ предъявляются весьма высокие требования, главными из которых являются: прочность, жесткость и герметичность полостей окислителя и горючего, особенно по среднему днищу; высокая точность в расположении форсунок ( $\pm 0,1 \dots 0,3$  мм); высокое качество пайки форсунок; обеспечение заданного значения как суммарного расхода компонентов топлива через головку, так и расхода через каждую форсунку; совпадение оси факела смеси с осью камеры сгорания; равномерность распыла компонента через каждую форсунку.

Материалами для деталей ФГ наиболее часто служат: для силовых колец сплавы типа ЭИ654, ЭИ711, для днищ (верхнего и среднего) сплавы типа ЭИ811, нержавеющей стали, для огневого днища сталь Х18Н9Т, иногда сплавы на основе меди типа бронзы БрХ0,8, БрХ0,9. В некоторых случаях при применении топлива с малоагрессивными компонентами материалами колец и днищ (кро-

ме огневого) могут служить малоуглеродистые стали, обработка которых значительно проще. Материалами для форсунок служат нержавеющие и жаропрочные стали.

*Изготовление силовых колец ФГ.* Конструкция силового кольца определяется конструкцией ФГ и обычно представляет собой монолитную кольцевую деталь сложного сечения (см. рис. 54). Точность обработки по наружным размерам 5 ... 7 класс, посадочные места по 3 ... 5 классу точности, шероховатость обработанных поверхностей по 5 ... 6 классу (ГОСТ 2789—73). Заготовками для колец служат штамповки квадратного или прямоугольного сечения, поэтому коэффициент использования металла у них очень низок (0,2 ... 0,3). Раскатанные из исходных литых или кованных колец профильными роликами кольцевые заготовки имеют сечение, близкое к сечению готового кольца, и поэтому коэффициент использования металла достигает для них значения 0,5 ... 0,7. Гнутые и сваренные кольцевые заготовки из прокатанных или пресованных профилей за счет меньших припусков имеют коэффициент использования металла до 0,7 ... 0,85.

Механическая обработка кольцевых заготовок производится на токарных лобовых или карусельных станках с базой по наружным и торцовым или по внутренним и торцовым поверхностям. При проектировании технологического процесса необходимо учитывать малую жесткость колец, а также необходимость обработки посадочных мест под нижнее и среднее днище с одной установки. Сверление боковых отверстий для подвода горючего производится в конце технологического процесса на сверлильном станке с применением поворотного кондуктора. После слесарной доработки и контроля кольца поступают на сборку ФГ.

*Изготовление днищ.* Для днищ используются листовые круглые заготовки, вырезанные на гильотинных или роликовых ножницах или вырубленные в штампах.

Верхнее днище, имеющее обычно сферическую или эллиптическую форму, изготавливается штамповкой с одновременной вырубкой центрального отверстия под патрубок, оно же служит для базирования днища при последующей механической обработке кромок под сварку с кольцом. В конце процесса изготовления производится сверление отверстий под штуцера; обработка посадочных мест под приварку различных деталей и обработка кромок для приварки центрального патрубка. После слесарной доработки и контроля верхнее днище поступает на сборку ФГ.

Среднее и нижнее днища во многих случаях по конструкции схожи и отличаются количеством отверстий под форсунки и формой кромок под сварку с кольцом. Так как наружная обточка днищ для повышения производительности обработки производится в комплекте или в пакетах, то в начале обработки сверлится и разворачивается центральное отверстие (иногда несколько отверстий) для сборки днищ в пакет и стяжки их болтами. Эти отверстия являются при дальнейшей обработке установочной базой. При необходимости может быть предусмотрена обработка торцовых поверхностей днищ.

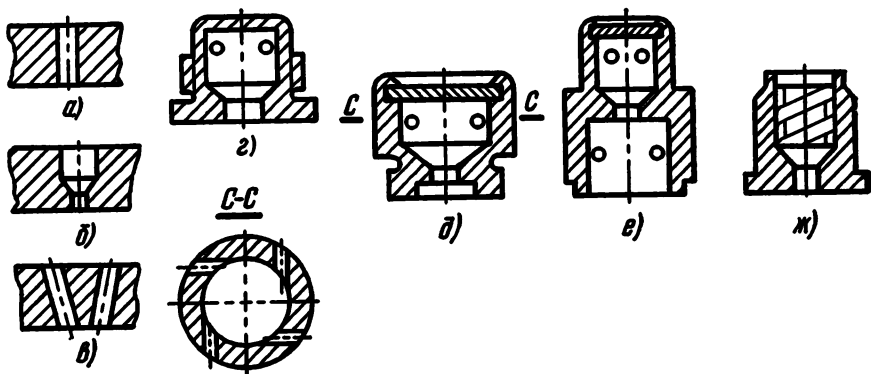


Рис. 55. Типы форсунок

Наиболее ответственная операция при обработке днищ — сверление отверстий под форсунки: они должны быть соосны в среднем и нижнем днище. Для этого чаще всего среднее днище предварительно приваривают к силовому кольцу, а нижнее прихватывается к кольцу, и с помощью накладного кондуктора отверстия просверливаются в обоих днищах одновременно. При раздельном сверлении отверстий в каждом днище с целью обеспечения требуемой точности должна использоваться одна и та же кондукторная плита с направляющими втулками, изготовленными не ниже 2 класса точности. Дальнейшая обработка отверстий (зенкерование, развертывание, обработка кольцевых канавок, выточек под припой, фаски и т. д.) производится раздельно. В опытном и мелкосерийном производстве сверление отверстий под форсунки в днищах целесообразно производить на станках с программным управлением. При крупносерийном производстве днищ целесообразно сверление отверстий в них производить на специальных агрегатных станках с применением приспособлений. После слесарной доработки и контроля днища поступают на сборку ФГ.

*Изготовление форсунок.* Конструктивно форсунки можно разбить на два класса: струйные, когда горючее впрыскивается в КС в виде тонких струй, и центробежные, когда поток компонента закручивается в форсунке и впрыскивается в камеру в виде конической распыленной струи (рис. 55).

Струйные форсунки представляют собой форсунки с просверленными точными отверстиями небольшого диаметра; иногда их сверлят в самих огневых днищах (рис. 55, а, б, в). Основным требованием к подобным струйным форсункам является обеспечение точности и прямолинейности внутреннего канала, так как они относятся к глубоким отверстиям, у которых отношение длины к диаметру больше трех. В ряде случаев для ухода от глубокого сверления применяются ступенчатые отверстия (рис. 55, б). Образование форсуночных отверстий в днище можно производить электроискровым или другим электрофизическим способом с одновременным получением всех отверстий, что обеспечивает высокую точность их взаимного расположения. Недостатками таких методов являются низкая

стойкость электродов и нестабильность формы каналов отверстий.

Центробежные форсунки (рис. 55, *г, д, е, ж*) по способу закручивания потока компонента делятся на форсунки с тангенциальным вводом компонента во внутреннюю полость и форсунки со специальными завихрителями потока (чаще всего шнекового типа). Корпуса центробежных форсунок изготавливаются из пруткового материала на специальных автоматах или револьверных станках, на которых полностью обрабатываются наружные и внутренние поверхности, после чего корпуса отрезаются от прутка. Для сверления тангенциальных отверстий во избежание искривления их осей и частых поломок сверл успешно применяется вибрационное сверление, когда на постоянную подачу сверла накладываются вынужденные колебания вдоль оси частотой 150 ... 200 Гц и амплитудой 5 ... 80 мкм в зависимости от подачи.

Изготовление тангенциальных отверстий в этого типа форсунках может производиться электроискровым способом на станках типа ЭП-5М с автоматизированным циклом обработки.

Наиболее часто применяемые в форсунках цилиндрические завихрители шнекового типа изготавливаются или на токарно-револьверных станках с нарезкой винтовых канавок определенного профиля, или, что более производительнее и просто, накаткой спиральных канавок на резьбонакатном станке типа РН-10К профилированными роликами. Для этого калиброванные прутки нарезают в заготовки длиной 100 ... 150 мм, шлифуют и накатывают спиральные канавки, после чего их разрезают на детали по длине завихрителей, шлифуют торцовые поверхности и зачищают заусенцы и кромки. После этого они устанавливаются в корпусе и закрепляются путем завальцовки кромок корпуса.

Все типы форсунок после изготовления контролируются по геометрическим размерам, секунднему расходу жидкости (вода) на специальных проливочных стендах, где также определяется угол, качество и равномерность распыла (рис. 56); по результатам испытаний форсунки группируются по классам. В последнее время для контроля и проливов форсунок применяют специальные автоматизированные установки, которые имеют высокую производительность, точность и надежность контроля. После проливов форсунки поступают на сборку ФГ.

*Сборка ФГ.* Общая схема сборки ФГ строится на принципе раздельной сборки отдельных узлов ФГ и общей компоновочной сборки собранных и испытанных узлов в готовую ФГ с последующими испытаниями ее. Такая схема обусловлена сложностью конструкции ФГ и весьма высокими требованиями по точности и надежности как к одному из самых ответственных узлов жидкостных двигателей.

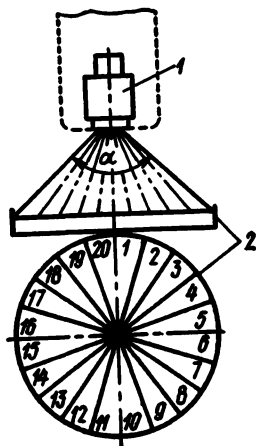


Рис. 56. Схема испытания форсунок:

1—форсунка; 2—приемник

Характерными узлами типовой конструкции ФГ с плоским огневым днищем являются верхняя часть головки, куда обычно включают верхнее днище с патрубками, фланцами, штуцерами, кронштейнами и т. д., и нижняя часть головки, состоящая из кольца, среднего и огневого днищ, форсунок, распорок и т. д.

В начале технологического процесса сборки производится комплектация всех деталей по геометрическим размерам и собираемости (проверка посадок и предусмотренных зазоров, подбор форсунок по классам). После подготовки (зачистка кромок, промывка и обезжиривание, продувка форсунок воздухом и проверка их на ротаметре и т. д.) детали поступают на сборку.

Сборка верхней части головки производится сваркой: фланец приваривается к патрубку, патрубок к верхнему днищу; затем все остальные детали (штуцера, кронштейны и т. д.) к днищу. Контролируются качество сварных швов и геометрическая точность верхней части.

Сборка нижней (форсуночной) части головки начинается с хватки сваркой в 3—4 точках среднего днища к кольцу и кольцевой сварки в специальных приспособлениях. После сварки и зачистки швов проверяется герметичность соединений. Далее производится сборка нижней части под пайку: устанавливаются форсунки окислителя в среднем днище, припой для пайки форсунок устанавливается в выточках в виде колец, аналогично устанавливаются форсунки горючего и кольца припоя в нижнем днище; для фиксации форсунок они кернятся в 3—4 местах или делается кольцевая обжимка днища вокруг форсунки, иногда кольца припоя прихватываются конденсаторной сваркой. Нижнее (огневое) днище соединяется с кольцом сваркой или пайкой. При пайке одновременно со сборкой устанавливается и прихватывается припой для пайки днища с кольцом, при сварке нижнее днище с установленными форсунками, распорками или втулками прихватывается в нескольких местах с кольцом. Вся собранная нижняя часть после осмотра и контроля поступает на пайку. Пайка производится или в вакууме в специальных контейнерах с привариваемыми для герметичности крышками, или в среде защитного газа в контейнере с песчаными затворами между корпусом и крышкой. Пайка производится при температуре 1180 ... 1225° С (в зависимости от припоя) с выдержкой 10 ... 15 мин и последующим охлаждением до 150 ... 200° С в контейнере. После пайки проводятся контроль качества, пневмиспытания на герметичность и гидрониспытания.

Сборка (сварка) верхней части головки с нижней производится в специальных приспособлениях с поворотной планшайбой. После сварки и зачистки швов собранная ФГ проходит прочностные гидрониспытания, пневмоиспытания на герметичность швов, проливы по трактам окислителя и горючего с замером секундных расходов, давлений, промывку и сушку, после чего ФГ поступает на общую сборку КС. Выявленные при проливах дефектные форсунки могут высверливаться и заменяться на ремонтные, пайка которых производится горелками.

## 6.8. ОБЩАЯ СБОРКА КАМЕР СГОРАНИЯ

На общую сборку камеры сгорания обычно поступают форсуночные головки, собственно камеры сгорания и детали, которые не могут быть присоединены при сборке этих узлов. Все остальные детали должны быть собраны с головкой и камерой на этапе предварительной сборки. В редких случаях камера сгорания поступает на общую сборку раздельно средней и сопловой частью.

Если на общую сборку средняя и сопловая часть подаются раздельно, то общая сборка начинается с соединения этих частей, осуществляемого сваркой в приспособлениях с базой по внутренней поверхности, обеспечивающей соосность собираемых частей камеры. Иногда сборка средней и сопловой части может выполняться пайкой или болтами. Сборка подвижных сопловых блоков с камерой производится с обеспечением, кроме соосности блоков, предусмотренных углов отклонения сопла, герметичности места стыка (с помощью сильфонов), возможности регулировки и т. д.

Основным этапом общей сборки камеры сгорания является сборка форсуночной головки с камерой, которая в большинстве случаев осуществляется сваркой, изредка пайкой или болтовым соединением. Камера и головка поступают на сборку с обработанными под сварку стыковочными кромками. Сварка производится в приспособлении для сварки кольцевых швов, которое обеспечивает необходимый поджим элементов в процессе сварки и точное базирование их по внутренним поверхностям с целью обеспечения соосности головки и камеры. Иногда головка и камера поступают на сборку с нанесенными на стыкуемых участках рисками, совпадение которых должно быть достигнуто при монтаже в приспособлении.

После сборки камеры с головкой производится присоединение опор и кронштейнов, служащих для соединения (подвески) КС с несущей рамой или корпусом (силовым кольцом) космического аппарата. Одновременно с опорами могут устанавливаться ряд других конструктивных элементов (кронштейны, штуцера, патрубки и т. д.). Посадочные места опор после сварки обрабатываются с базой по внутренней поверхности камеры.

В последнее время на внутренние поверхности огневых стенок КС с целью защиты от воздействия потока горячих газов наносят защитные покрытия. Нанесение их производится или при предварительной сборке камеры, или при общей сборке КС. Покрытия бывают из тугоплавких металлов или сплавов на их основе (молибден, тантал, вольфрам, колумбий, бериллий и т. д.), из тугоплавких керамических материалов ( $ZrO_2$ ,  $ThO_2$ ,  $HfO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ), из неметаллических композиционных материалов, работающих как абляционная защита, из теплопроводных металлов (медь, серебро, бериллий), а также комбинацией из нескольких материалов (многослойные покрытия). Защитные покрытия могут наноситься металлизацией, гальваническим осаждением, осаждением из газовой фазы, плазменным напылением и некоторыми другими методами в зависимости от применяемых материалов.

Собранная камера сгорания направляется на испытания, которые включают в себя: прочностные гидроиспытания (0,3 ... 1%-ным водным раствором хромпика) с давлениями на 20 ... 40% выше штатных; пневмоиспытания на герметичность воздухом или гелиевой смесью; проливы водой с целью определения секундного расхода и величины гидравлических сопротивлений (перепада давления на входе и выходе) по каждому тракту отдельно и при одновременной работе обоих трактов.

После проведения испытаний внутренние полости по обоим трактам продуваются обезжиривающими смесями и горячим воздухом для очистки, обезжиривания и удаления влаги, и КС поступает на сушку в специальные сушильные воздушные или вакуумные печи. После этого все отверстия внутренней полости по обоим трактам заглушаются специальными заглушками и мембранами, производится консервация по специальной инструкции и КС поступает на сборку ДУ и аппарата.

## **Глава 7. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ЕМКОСТЕЙ И БАКОВ**

Одними из наиболее характерных и ответственных агрегатов летательных аппаратов являются баки и емкости различного назначения, которые представляют собой тонкостенные герметичные сосуды, подвергающиеся внутреннему давлению. Условия их работы характеризуются наличием длительного или кратковременного однократного или многократного внутреннего давления при нормальной, высокой или очень низкой температуре часто в контакте с агрессивными средами. Кроме того, они часто подвергаются различным внешним воздействиям, динамическим инерционным нагрузкам, вибрациям, во многих случаях аэродинамическому нагреву и т. д. В летательных аппаратах они занимают от 25 до 30% и более объема и массы, представляя во многих случаях, кроме полезной нагрузки, основу их конструкции. Все это обусловило выделение их в отдельное специфическое производство при изготовлении летательных аппаратов.

### **7.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И МАТЕРИАЛЫ БАКОВ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ**

В зависимости от назначения конструкции баков многообразны. По форме внешних обводов баки и емкости бывают цилиндрическими (редко коническими) со сферическими или эллиптическими днищами; сферическими, сваренными из двух полусфер; торовыми, которые иногда komponуются в пакеты и блоки торовых баков; эллиптическими, сваренными из двух эллиптических днищ; в последние годы появились эластичные сильфонные баки (рис. 57). По функ-

циями, выполняемым в конструкции аппаратов, баки могут быть несущими, когда они являются корпусом аппарата, формирующим его обводы и воспринимающим нагрузки, приходящиеся на корпус аппарата, и подвесными, когда они помещаются внутри несущего корпуса аппарата. В космических аппаратах последние значительно распространены. По конструкции стенок баки могут быть с гладкими листовыми стенками без силового набора или с силовым набором сборной конструкции, со стенками из монолитных (например, вафельных или только с продольным набором) панелей, из различного типа слоистых панелей, которые иногда выполняют теплозащитные функции. Кроме того, в баках обычно имеется много различных конструктивных усложнений: промежуточные днища, мембранные вытеснители компонентов, перегородки, препятствующие завихрению компонента при подаче, фланцы, патрубки, кронштейны, датчики уровня, заборники и т. д., которые, как правило, усложняют изготовление и сборку.

Баки и емкости можно классифицировать по применяемым материалам, что существенно влияет на технологию их изготовления. Требования к материалам баков и емкостей, особенно для КА, весьма высоки и иногда даже противоречивы; они должны обладать высокой прочностью и жесткостью, удельной прочностью, противостоять как высоким, так и криогенным температурам, должны быть коррозионностойкими по отношению к компонентам топлива, иметь высокую плотность (непроницаемость) для обеспечения герметичности по стенкам, что особенно важно для емкостей, работающих в глубоком вакууме, и в то же время они должны обладать приемлемыми технологическими свойствами: пластичностью (штампруемостью), свариваемостью, хорошей обрабатываемостью резанием и т. д. Наиболее распространенными материалами для баков и емкостей являются деформируемые сплавы (АМгЗМ, АМг6, АМг6М, АМг6Н, Д16АМ, Д20, АК-6, АК-8, В95АМ и т.д.), нержавеющие и высокопрочные стали (30ХГСНА, 12Х18Н9Т, 20Х13Н4Г9, 12Х18Н10Т, 15Х18Н12С4ТЮ, ВНС-2 и др.), титановые (ОТ-4, ОТ4-1, ВТ-6, ВТ-14 и др.), иногда магниевые сплавы (МА1-М, МА8-М), ряд других сплавов. В последнее время для емкостей высокого давления начинают находить применение никелевые (ХН60ВТ, ХН77ТЮР), молибденовые и бериллиевые сплавы.

Особую перспективную группу материалов для емкостей составляют неметаллические (стеклопластики на различной основе, различные композиционные материалы). Иногда с целью массового выигрыша в одной конструкции бака применяют комбинации материалов для различных деталей; в этом случае необходимо согласовывать коэффициенты линейного температурного расширения этих материалов.

Общими требованиями к бакам и емкостям являются: высокая прочность и жесткость, особенно для несущих баков и емкостей высокого давления, вибропрочность и сохранение эксплуатационных качеств при циклических нагрузках; минимальная масса; герметичность не только по швам, но и самих материалов (герметичность по



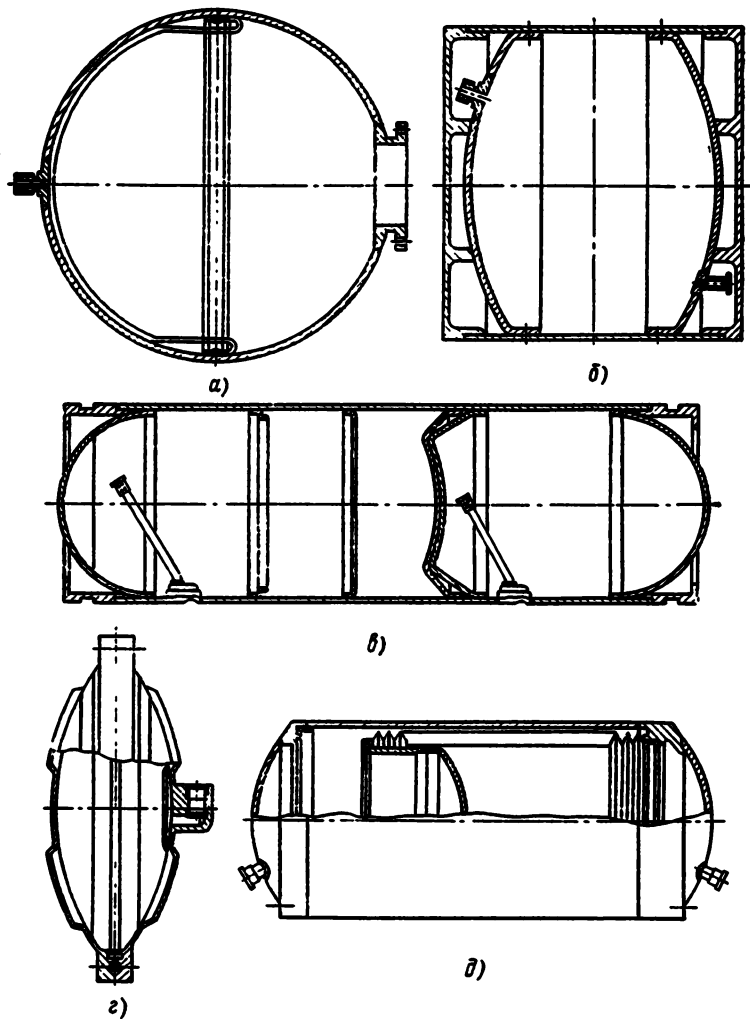
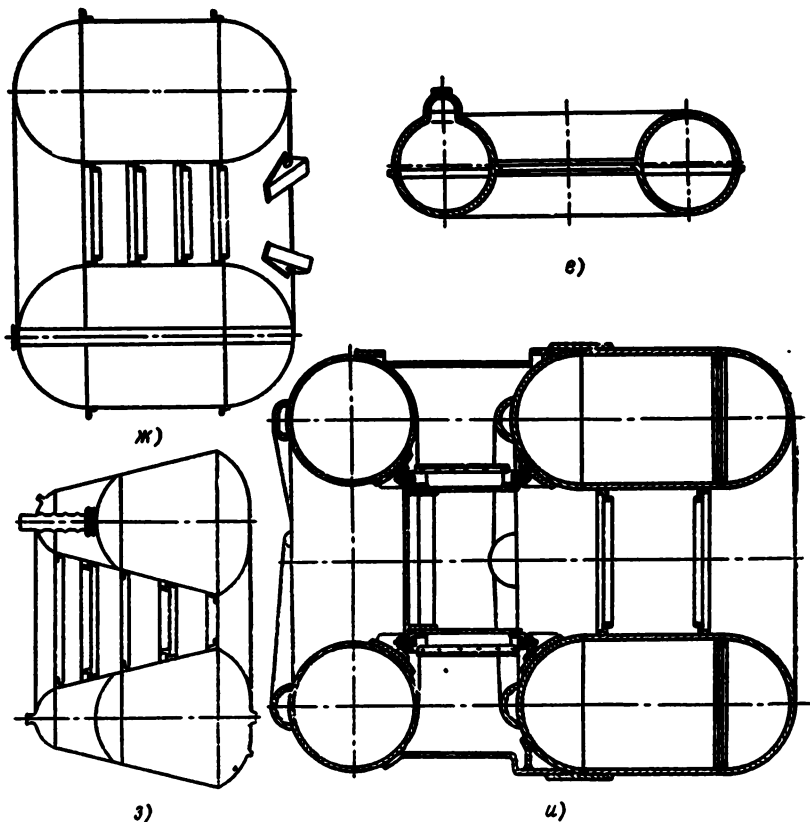


Рис. 57. Типы баков:

*а*—сферический бак с вытеснителем; *б*—цилиндрический бак; *в*—блок цилиндрических баков; *г*—чечевицеобразный бак с болтовым соединением дна; *д*—бак с сильфонным вытеснителем; *е*—торовый сферический бак; *ж*—торовый цилиндрический бак; *з*—пакет торových баков; *и*—блок торových баков

стенкам); стойкость против агрессивного воздействия компонентов; сохранение эксплуатационных качеств в широком диапазоне температур, иногда при циклическом температурном воздействии; простота и технологичность конструкции, обеспечение изготовления не на предельных возможностях производства; обеспечение требуемой точности изготовления, назначенного ресурса; на внешних и внутренних поверхностях баков не допускаются повреждения, царапины, заусенцы, острые кромки; внутренние полости должны быть чистыми от стружки, металлических частиц и пыли, остатков обработки, что может нарушить работу клапанов, форсунок и т. д. Все эти и другие требования должны обеспечиваться как самой конст-



рукцией баков и емкостей, так и соответствующей технологией и принятой системой контроля и испытаний.

Характерные детали типовых конструкций баков и емкостей можно разделить по назначению на две группы. К первой группе относятся детали, входящие в силовую схему (корпус) бака: обечайки, шпангоуты, стыковочные кольца, стрингеры, днища, соединительные юбки, детали подвески баков. Ко второй группе относятся детали арматуры, обеспечивающие заправку бака или емкости и надежную подачу компонента: детали заборных устройств, датчиков уровней жидкости, клапанов, кронштейны, фланцы, заборники, штуцера, патрубки и т. д. Ко второй группе относятся и специфические с точки зрения технологии детали: жесткие и гибкие трубы (сильфоны). Приведенная классификация является конструктивно-технологической.

## 7.2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ БАКОВ И ЕМКостей

Общая схема изготовления баков и емкостей состоит из этапа изготовления отдельных деталей обеих групп и этапа сборки.

Обечайки являются одним из основных элементов цилиндрических и конических баков. Технология их изготовления аналогична

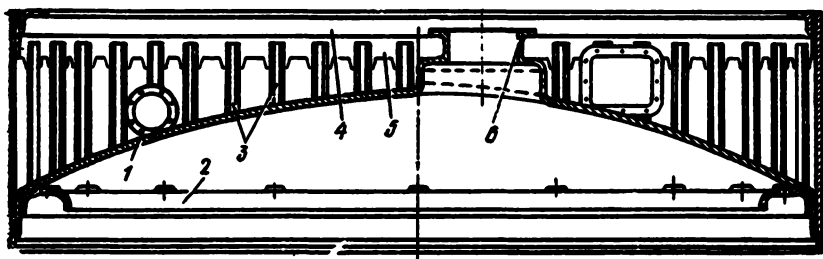


Рис. 58. Конструкция стыковочной части несущего бака:

1—днище; 2—усиливающая диафрагма; 3—стрингеры; 4—стыковочный шпангоут; 5—обечайка; 6—патрубок

изготовлению обечаек корпусов, рассмотренных выше, которыми они и являются. В подвесных баках обечайки имеют меньшую толщину. Для цилиндрических обечаек баков, особенно несущих, в последнее время применяются монолитные и слоистые панели.

Длинные обечайки собираются обычно из отдельных цилиндрических секций, число которых может быть значительно, при их сборке одновременно устанавливаются и поперечные силовые элементы, кронштейны, перегородки и т. д., сборка производится в специальных стапелях вследствие малой жесткости обечаек. После контроля швов и приварки всех арматурных и установочных деталей обечайка поступает на сборку бака.

*Стыковочные и промежуточные шпангоуты и кольца корпусов баков* изготавливаются вышеописанными методами, они предназначаются для стыковки обечаек с днищами и с соединительными юбками. К ним могут предъявляться более высокие требования по точности, герметичности, коррозионной стойкости. Поперечные сечения этих шпангоутов могут быть весьма сложными. Промежуточные шпангоуты обычно подаются на сборку обечаек, а стыковочные — на общую сборку баков.

*Стыковочные юбки (обечайки)* служат для стыковки баковых отсеков с другими. По конструкции они представляют собой цилиндрические (редко конические) короткие сборные обечайки (рис. 58), подкрепленные стрингерами и заканчивающиеся стыковочными шпангоутами. Технология юбок аналогична технологии корпусных сборных обечаек. Часто они имеют различные технологические и конструктивные лючки с крышками, усиливающие элементы и другие местные усложнения. После сборки они подаются на общую сборку баков.

*Днища* являются наиболее специфичными и характерными деталями почти всех типов баков и корпусов. Многообразие и сложность конструкций, а также методов изготовления заставляет выделять их в особую группу даже среди типовых деталей ракетно-космической техники.

По форме обводов днища, применяемые в ракетно-космических системах, могут быть (рис. 59) плоскими (или с плоским дном),

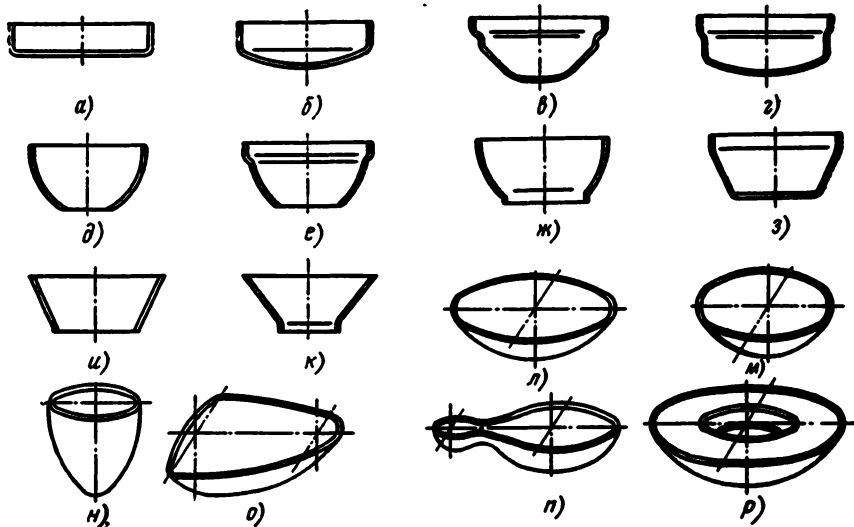


Рис. 59. Классификация днища по виду поверхности стенки:

*а*—с плоским дном; *б*—сферические; *в*—куполообразные; *г*—эллиптические;  
*д*, *е*, *ж*—сферические с плоским дном, открытые; *з*, *и*, *к*—конусообразные с  
 плоским дном, открытые; *л*—эллипсоидальные (с неравными осями в плане);  
*м*—гиперболюидальные; *н*—параболические; *о*, *п*—скорлупообразные; *р*—полу-  
 торовые

сферическими, эллиптическими, параболическими, куполообразными и полуторовыми с бортами различной формы и без бортов. Большинство днищ имеют отверстия с отбортовками или без них для приварки деталей арматуры.

По диаметру различают малогабаритные (до 300 мм), среднегабаритные (300 ... 1000 мм) и крупногабаритные (более 1000 мм) днища. По составу исходных заготовок различают простые цельноформованные (цельноштампованные) и сложные штампованные конструкции днищ, сваренные из отдельных сегментов, лепестков или других элементов, число которых для очень крупных днищ может достигать до 15 ... 20. На технологию изготовления оказывают существенное влияние относительная толщина стенок (отношение толщины стенки к диаметру днища) и требуемая точность изготовления по размерам и форме днищ.

Для днищ в большинстве случаев используются листовые заготовки различной толщины (от 0,5 мм до 30 мм и выше). Основой изготовления днищ являются, как правило, методы холодного формообразования. Общие требования к днищам такие же, как и к бакам.

Несмотря на большое разнообразие конкретных технологических процессов изготовления днищ и значительное количество методов их формообразования можно сформулировать обобщенную схему их изготовления, содержащую следующие этапы:

1. Листы освобождают от обертки, протирают смазку и осматривают поверхность: не допускаются царапины, вмятины, трещины

и другие поверхностные дефекты; при необходимости производят контроль толщины.

2. Разметка очищенного листа производится с помощью разметочного инструмента, проверяется с помощью шаблона заготовки. Здесь же отрезаются образцы для механических испытаний и химического анализа; производится клеймение листов и образцов. Разметка применяется в единичном или мелкосерийном производстве.

3. Раскрой заготовок днищ производится на гильотинных или роликовых ножницах, на фрезерных или карусельных станках, иногда газовой или пламенной резкой. Для сложных штампосварных днищ вырезаются треугольные или сегментные заготовки элементов днищ. Для крупных малонагруженных днищ могут применяться сварные (с последующей зачисткой и отжигом швов) листовые заготовки. Для ряда операций раскроя (вырубка в штампах, обработка на карусельных станках, фрезерных станках с программным управлением и т. д.) разметка не требуется, особенно в крупносерийном производстве.

4. Если раскрой заготовки производится на ножницах или резкой, то контур ее обрабатывается механически. Кроме того, на этом этапе иногда производится механическая обработка (фрезерование на копировально-фрезерных станках) поверхности заготовок для получения вафельных или другой формы карманов с целью облегчения днища; иногда применяется для этого химическое фрезерование. При формообразовании в эти карманы закладываются деревянные или пластиковые плитки во избежание огранки. В последнее время для получения равномерной толщины стенок в операциях формообразования заготовка полусферических днищ предварительно профилируется по сложному контуру на токарном или карусельном станке с уменьшением толщины заготовки от периферии к центру.

5. Заготовки после слесарной доработки тщательно протираются, обезжириваются и подвергаются отжигу.

6. После отжига поверхности тщательно очищают, производят травление, промывку, сушку. Если операция формообразования производится со смазкой, то наносится соответствующая смазка.

7. В настоящее время известно много методов формообразования днищ.

Наибольшее распространение среди методов формообразования днищ находят *методы холодной листовой штамповки*, наиболее освоённые производством: формовка, которая преимущественно выполняется за один переход (рис. 60) и рекомендуется для днищ большой относительной толщины и малой относительной глубины; вытяжка различными способами: прямая вытяжка без прижима или с прижимом фланца заготовки (рис. 61), вытяжка эластичным или жестким пуансоном (рис. 62), но с противодавлением эластичной или жидкой среды, вытяжка за несколько переходов с предварительным набором (рис. 63), реверсивная вытяжка (рис. 64) и т. д. Методы холодной штамповки днищ рассмотрены в специальной литературе\*.

---

\* Мельников Э. Л. Холодная штамповка днищ. М.: Машиностроение, 1976. 184 с.

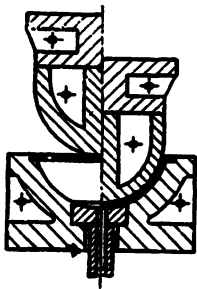


Рис. 60. Схема формовки днищ

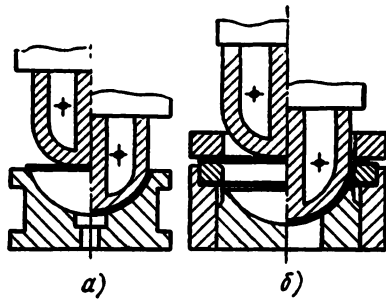


Рис. 61. Вытяжка днищ без прижима (а), с прижимом (б) фланца заготовки

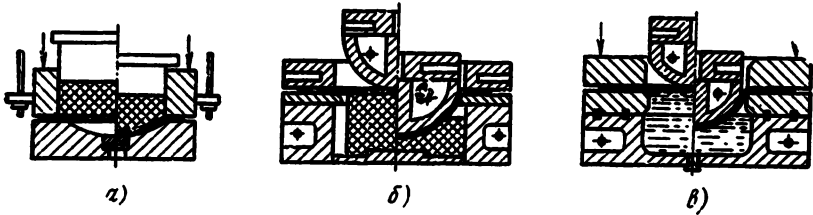


Рис. 62. Вытяжка с прижимом фланца заготовки:

а—жесткий прижим в сочетании с эластичным пуансоном; б—с противо-  
давлением эластичной средой; в—с противо-  
давлением жидкостной средой

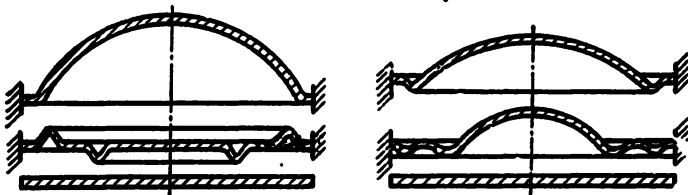


Рис. 63. Технологические схемы вытяжки с предвари-  
тельным набором

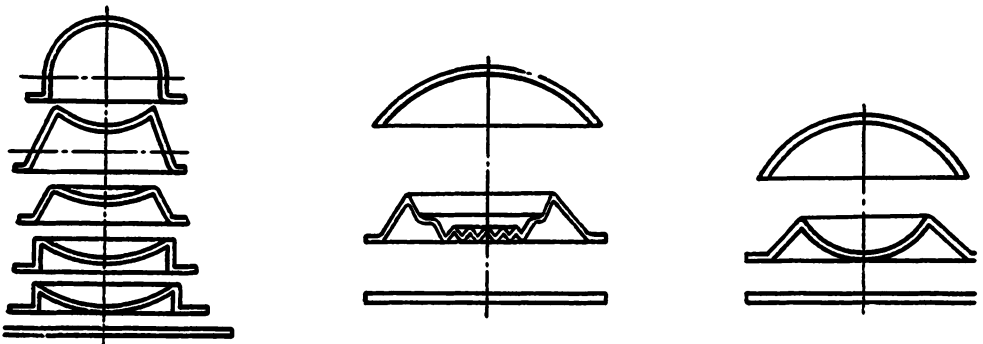


Рис. 64. Технологические схемы реверсивной вытяжки

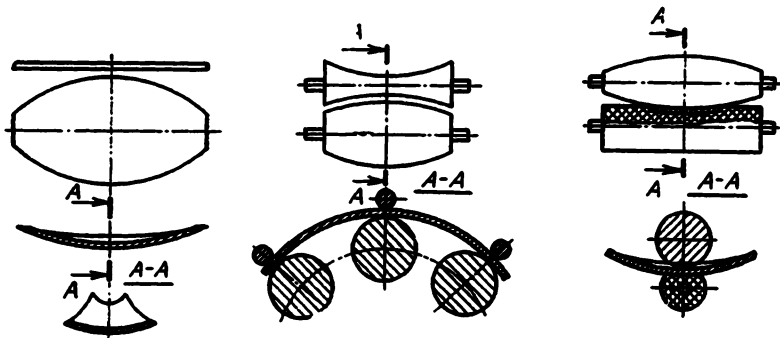


Рис. 65. Схемы ротационной гибки-формовки

При изготовлении днищ из малопластичных материалов (магнелиевые и титановые сплавы) или из высокопрочных сталей с большой относительной толщиной применяют метод вытяжки с подогревом всей заготовки или фланцевой части. Температура нагрева заготовки зависит от свойств материала: например, для сплава ВТ1-2—350 ... 400° С, сплавов ОТ4 и ОТ4-1—500 ... 650° С, сплава ВТ6С — до 800° С; магниевые сплавы нагревают до 350 ... 400° С. В некоторых случаях подогревается сам штамп до 200 ... 300° С и выше. Применение штамповки с подогревом позволяет увеличить коэффициент вытяжки и уменьшить число переходов при изготовлении днищ с большой относительной глубиной.

Метод обтяжки применяется для изготовления треугольных (секторных) и сегментных элементов сложных днищ, он обеспечивает высокое качество и точность. Способы обтяжки были рассмотрены выше. Для обтяжки элементов крупных днищ требуется увеличение мощности существующих обтяжных прессов.

Методы ротационного выдавливания и обкатки применяются для формования днищ малого и среднего размера из различных материалов. Заготовки из высокопрочных и малопластичных материалов подогреваются. Эти методы применяются в опытно и мелкосерийном производстве днищ, но, учитывая технологическую отработанность их и выпуск специализированного оборудования, а также простоту и экономичность этих процессов, они могут рекомендоваться и для крупносерийного производства днищ.

Для изготовления секторных и сегментных элементов крупных днищ находит применение ротационная гибка-формовка на многовалковых станках (рис. 65). В некоторых случаях гибка-формовка производится на двухвалковых станках, у которых один из валков имеет полиуретановое покрытие толщиной 0,15 ... 0,35 диаметра валка; в этом случае диаметр жесткого валка в 2—3 раза больше диаметра эластичного валка.

Штамповка взрывом находит широкое применение не только в опытно и мелкосерийном, но и в крупносерийном производстве благодаря таким преимуществам, как высокая точность, универсальность, небольшие расходы на подготовку и осуществление операции, возможность быстрой переналадки оборудования, большая универсальность по материалам, неограниченность габаритов штампуемых деталей и т. д.

Штамповка взрывом бризантных взрывчатых веществ (БВВ) нашла наиболее широкое распространение среди импульсных методов обработки.

Для передачи энергии взрывной волны при штамповке взрывом БВВ на заготовку наиболее часто служит вода, хотя возможно применение и различных сыпучих веществ, коллоидов или смесей, состоящих из наполнителя (глина, мел), связующих материалов (солидол, машинное масло) и отвердителей (парафин, какиноль). В отличие от обычных при взрывных методах штамповки на механизм деформирования заготовки оказывают решающее действие волновые процессы и инерционные силы, следствием чего является вытяжка днища в основном за счет деформации фланца, что обеспечивает значительно меньшие утонения донной час-

ти детали. Выяснено, что при скоростях деформации, близких к критической скорости разрушения, металлы становятся более пластичными, что позволяет штамповать взрывом днища из хрупких материалов или производить штамповку достаточно глубоких днищ за один переход. При штамповке взрывом пружинение материала незначительно; при этом методе можно совмещать ряд операций формообразования, например штамповку днища совмещать с пробивкой отверстий, с получением местных выштамповок и т. д. Штамповкой взрывом получают полуторонидальные днища, что значительно дешевле штамповки их обычными методами. БВВ (тротил, аммонит, гексоген и др.) выпускаются различной формы (детонирующие шнуры, шашки, зерна и т. д.); из них можно формовать заряды рассчитанной формы, которые подрываются с помощью электродетонаторов. Для осуществления штамповки взрывом создаются специальные полигоны, оснащенные бассейнами, наземными резервуарами, складами ВВ и т. д.

**Штамповка взрывом порохов** (и взрывчатых газовых смесей) обычно производится в замкнутом объеме и применяется для формообразования небольших днищ даже в заготовительных цехах. В некоторых случаях формообразование производится непосредственно давлением пороховых газов, но в большинстве случаев энергопередатчиком является жидкость или твердые формообразующие элементы (рис. 66).

Для изготовления днищ иногда применяют и другие импульсные методы: *электродинамическая штамповка, электромагнитная (магнитно-импульсная) штамповка* и др.

**Вибрационная штамповка** основана на наложении вибраций частотой от 25 Гц до 25 кГц и амплитудой порядка десятых долей миллиметра на статические процессы формообразования, что позволяет обрабатывать высокопрочные мало-пластичные металлы с меньшими усилиями за счет уменьшения внешнего и внутреннего трения и разупрочнения металла. Вибрационная штамповка позволяет при обработке мало- и среднегабаритных днищ увеличить коэффициент вытяжки и уменьшить число переходов.

В опытным и мелкосерийном производстве для формообразования средне- и крупногабаритных тонкостенных днищ из малопрочных пластичных материалов применяют метод *гидроштамповки*, когда в штампе жесткий металлический пуансон заменяет жидкость, нагнетаемая в рабочую полость штампа под высоким давлением. Преимуществами гидроформовки являются низкая себестоимость изделий, возможность штамповки крупных днищ, сокращение затрат и сроков на подготовку и переналадку производства; недостатками — малая производительность вследствие увеличенного вспомогательного времени на подготовку операции, невозможность штамповки участков с малым радиусом кривизны, увеличенное утонение заготовки в центральной части. Кроме обычной гидроштамповки существует ряд ее разновидностей: *реверсивная гидроформовка*, состоящая из двух переходов, когда в первом переходе центральная часть днища формируется в одном направлении (накопление металла), а во втором — эта часть выворачивается до изготовления окончательной формы днища, что уменьшает складкообразование и утонение центральной части; *гидромеханическая штамповка*, сочетающая гидроштамповку со штамповкой в инструментальных штампах, что позволяет уменьшить число переходов при изготовлении глубоких днищ из высокопрочных мате-

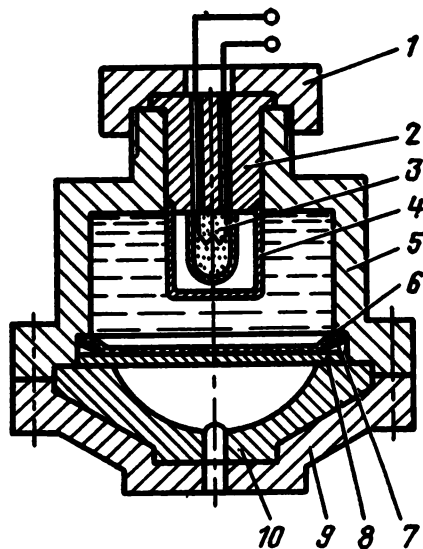


Рис. 66. Схема штамповки взрывом пороха:

1—затвор; 2—гильза; 3—заряд; 4—камера; 5—крышка; 6—диафрагма; 7—кольцо; 8—заготовка; 9—корпус; 10—матрица



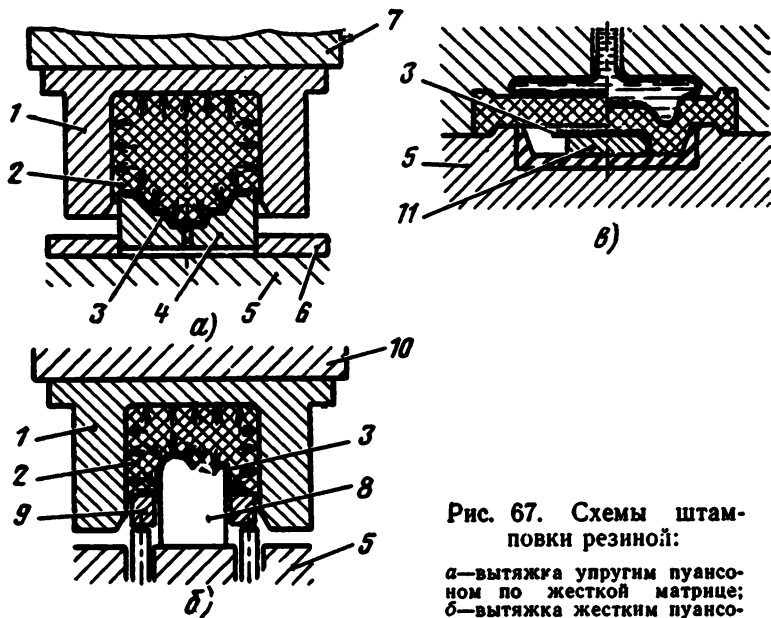


Рис. 67. Схемы штамповки резиной:

*а*—вытяжка упругим пуансоном по жесткой матрице; *б*—вытяжка жестким пуансоном по упругой матрице; *в*—

формовка резиновой оболочкой, заполненной жидкостью; 1—контейнер; 2—резиновая подушка; 3—формируемая деталь; 4—матрица; 5—стол; 6—плита; 7—стессель молота; 8 и 11—пуансон; 9—складкодержатель; 10—ползун прессы

риалов, например титановых сплавов. Эти разновидности гидроштамповки увеличивают технологические возможности этого метода формообразования днищ.

Среди специальных методов формообразования днищ отметим еще методы *штамповки резиной*, когда в отличие от гидроштамповки роль жидкости выполняет резина, которая в замкнутом объеме ведет себя как несжимаемая жидкость (рис. 67). Преимуществами этого метода являются восстановление начальной формы резины после процесса штамповки, отсутствие насосных систем нагнетания жидкости, упрощение и удешевление оснастки. Недостатком резин является их разрушение при больших усилиях, потребность в больших усилиях, чем при обычной штамповке. Разновидностями штамповки резиной являются: *гидрорезиноштамповка* (рис. 67, *в*), *резиноштамповка с эластичной матрицей*, или с эластичным пуансоном, *статическая резиноштамповка* при скоростях до 3 м/с и *динамическая (ударная) резиноштамповка* на падающих молотах, фрикционных прессах и т. д. Во многих случаях метод штамповки резиной позволяет уменьшить число переходов при формообразовании днищ до одного перехода.

8. При многопереходном формообразовании днища подвергаются промежуточному отжигу. После операции формообразования днища или элементы сложных днищ проходят окончательную термообработку (отжиг, закалка, отпуск).

9. Формообразованные элементы сложных днищ после термообработки подвергаются механической обработке под кромкам под сварку на специальных кромкофрезерных станках.

10. После механической обработки производится слесарная доработка кромок, зачистка их, обезжиривание и подготовка под сварку.

11. Порядок сборки и сварки элементов днищ определяется их количеством и возможностью установки в одном приспособлении, которое должно обеспечить точное базирование элементов и воз-

возможность автоматической сварки по стыкам. После сварки производится отжиг сварных швов и контроль их методами неразрушающего контроля.

12. Сваренное днище поступает на операцию окончательной калибровки и правки. Элементы днищ до сварки проходят индивидуальную калибровку. Правка и калибровка может производиться различными способами, аналогичными методам формообразования, но наиболее широко в последнее время применяется калибровка и правка взрывом, которая, кроме производительности, обеспечивает минимальное пружинение, и электромагнитным способом, которая вследствие отсутствия непосредственного контакта заготовки с матрицей обеспечивает получение поверхности без дефектов. Затем днища поступают на механическую обработку, при которой отрезаются фланцы днища с обеспечением заданной его высоты, после чего производится зачистка кромок и удаление стружки и металлической пыли.

13. Для пробивки отверстий в днищах, число которых может быть значительно, применяют пробивные штампы. Отбортовку отверстий осуществляют в специальных штампах на прессах простого действия или на установках для отбортовки. В опытном и мелкосерийном производстве отбортовка может осуществляться на оправках вручную. Минимальное расстояние между краями отбортованных отверстий рекомендуется назначать не менее 20 толщин днища. Для обеспечения высокого качества отборонок в маложестких днищах предварительно приваривают усиливающие окантовочные конструктивные или технологические кольца.

14. При изготовлении крупных днищ для обеспечения массовых характеристик они часто подвергаются химическому фрезерованию. Эта операция может выполняться или до формообразования (в этом случае усложняется операция формообразования: карманы заполняются пластиковыми плитками или легкоплавким металлом), или сразу после формообразования до сварки и вырубки отверстий.

15. Иногда наружная поверхность крупных днищ шлифуется или полируется.

16. Днища поступают на операцию нанесения покрытий (анодирование, кадмирование и т. д.) по особой технологии.

17. У готовых днищ диаметры контролируются с помощью специальных обкатных приборов и устройств (рис. 68); точность формы контура в поперечном сечении с помощью шаблонов ШКС; толщина стенок днищ — индикаторами, ультразвуковыми толщиномерами и т. д.; глубина поверхностных дефектов с помощью индикаторных глубиномеров; вмятины и волнистость с помощью каркасных шаблонов.

18. Перед сборкой-сваркой днища с элементами арматуры и корпусными деталями производится подготовка кромок отверстий и фланцев под сварку: механическая доработка, зачистка, обезжиривание и т. д.

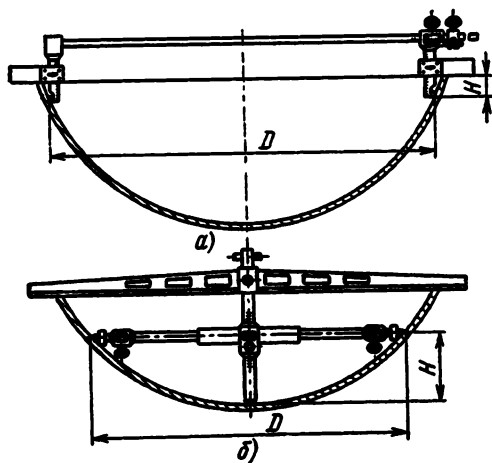


Рис. 68. Устройства для контроля диаметра жестких днищ:

а—специальный штангенциркуль; б—универсальный диаметромер

19. Сборка-сварка днища со стыковочными шпангоутами, приварка перегородок, диафрагм, деталей арматуры производится в несколько этапов в различных сборочных приспособлениях, обеспечивающих точное базирование собираемых деталей. Иногда в этих приспособлениях производится прихватка деталей, а сварка осуществляется в более простых приспособлениях, обеспечивающих закрепление прихваченной сборки и манипуляции для осуществления автоматической сварки.

20. После сварки производится зачистка швов, обезжиривание.

21. Контроль качества сварки производится методами неразрушающего контроля, после чего швы отжигаются.

22. Собранные днища поступают на испытания, которые проводятся на специальных стендах с заглушенными отверстиями по специальной программе, включающей в себя испытания на прочность и герметичность.

После испытаний днища промываются, продуваются горячим воздухом и поступают на сборку бака.

*Детали арматуры, установочные и соединительные детали, служащие для заправки и подачи компонентов, а также для соединения отдельных элементов силовой схемы и крепления различных коммуникаций, приборов и устройств (фланцы, штуцера, кронштейны, заборники, уголки, накладки, горловины, лючки, крышки, перегородки, воронкогасители, патрубки, кольца, ребра и т. д.), относятся в большинстве случаев к жестким деталям общемашиностроительного типа. Они обычно изготавливаются из тех же материалов, что и основные баковые конструкции и иногда из высокопрочных коррозионностойких сталей. Ряд деталей этой группы изготавливают методами холодной штамповки из листовых и профильных заготовок; большинство же их изготавливают механической обработкой с применением групповых методов обработки. Повышению эффективности их производства служит широкая стандартизация и унификация. После контроля их размеров и форм они поступают на соответствующие стадии сборки узлов или агрегатов.*

### 7.3. ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СБОРКИ ОСНОВНЫХ ТИПОВ БАКОВ

После изготовления отдельных элементов и деталей баков и сборки некоторых сборочных единиц (узлов): обечаек, днищ, сты-

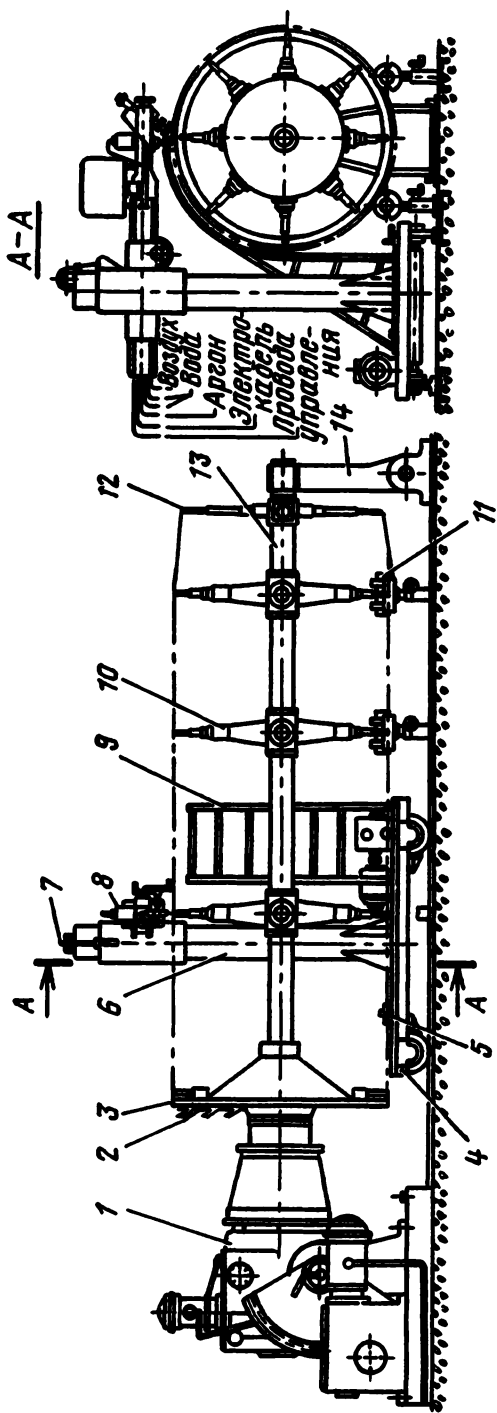


Рис. 69. Приспособление для сварки поперечных швов металлических баков:

1—привод (манипулятор); 2—краны печематические для включения разжимных устройств; 3—диск для крепления изделия; 4—тележка со сварочным оборудованием; 5—тормоз тележки; 6—колонна, несущая сварочную головку; 7—ролик противовеса; 8—сварочная головка; 9—лестница; 10—разжимные промежуточные устройства; 11—регулируемые ролики, поддерживающие изделие; 12—концевое разжимное устройство; 13—вал; 14—поворотная концевая опора

ковочных юбок, стыковочных шпангоутов — они подаются на общую (агрегатную) сборку баков. С целью сокращения цикла изготовления и общей сборки все детали арматуры, установочные и соединительные детали должны по возможности собираться и привариваться к основным элементам баков на стадии узловой сборки.

*Схема сборки цилиндрических (конических) металлических баков* определяется конструкцией бака и чаще всего состоит в последовательной приварке днищ к цилиндрической обечайке, стыковочных шпангоутов, если они не были приварены раньше к днищам, стыковочных юбок, деталей арматуры и установочных и соединительных деталей; далее после испытаний на прочность, герметичность и др. наносят теплоизоляционные покрытия, окрашивают, консервируют и подают на общую сборку аппарата. В некоторых случаях от этой общей схемы могут быть отступления.

Общая сборка баков производится в специальных приспособлениях — стапелях, предназначенных для точного базирования собираемых элементов друг относительно друга: базами при установке в приспособление обечайка и днищ часто являются внутренние поверхности, что обеспечивает лучшую соосность при сборке, но в то же время существенно усложняет сборочный стапель за счет наличия различных оправок и других базирующих и фиксирующих элементов. В ряде случаев в сборочном стапеле собираемые элементы после базирования только прихватываются в нескольких точках, что упрощает их конструкцию, а сварка производится в более простых поддерживающих приспособлениях, обеспечивающих вращение уже прихваченных элементов для осуществления кольцевой автоматической сварки (рис. 69). Перед сваркой элементов производится соответствующая подготовка кромок (зачистка, обезжиривание и т. д.), которая может включать в себя с целью более точной стыковки операцию механической торцовки собираемых элементов с базой по внутренней поверхности, для чего на стыкуемых поверхностях оставляется небольшой припуск. После сварки баки проходят сплошной контроль на качество сварных швов методами неразрушающего контроля, а также производится зачистка, отжиг и правка сварных швов.

Баки, которые имеют в конструкции туннельные и дренажные трубы, требуют для обеспечения необходимой точности после сварки днищ механической доработки отверстий под трубы или, когда она невозможна, повышенной точности стыковки днищ с обечайками, так как эти трубы привариваются к днищам после сборки их с обечайками. Многие современные цилиндрические топливные баки имеют внутреннюю полусферическую разделительную перегородку, представляющую часто двухстенную металлическую конструкцию, внутри которой устанавливается теплоизоляционный слой.

Во многих случаях в крупногабаритных баках предусматривают специальные технологические люки для выноса сварочных приспособлений из внутренней полости после сварки замыкающего шва бака, а сами выносимые приспособления должны быть разборными.

*К группе сферических баков* относятся кроме собственно сфери-

ческих емкостей, чаще всего состоящих из двух сваренных полу-сфер, баки, собираемые из двух днищ любой формы (эллипсной, овальной и т. д.). Сферические баки, как и цилиндрические, имеют в своем составе различные детали арматуры (штуцера, вытеснительные диафрагмы, кронштейны и т. д.).

Специфической группой среди сферических баков являются емкости высокого [до  $(3 \dots 4) \cdot 10^4$  кПа и выше] давления, которых в конструкции КА может быть до нескольких десятков. Особенности таких емкостей являются большая толщина стенок (до 10 ... 15 мм), относительная простота конструкции (наличие штуцеров с клапаном и кронштейнов крепления), высокие требования к прочности и герметичности сварных швов, количество которых должно быть сведено до минимума; материалами для них назначают высокопрочные сплавы и стали, иногда титановые сплавы. Технологические особенности: изготовление полусфер часто производится методом горячей объемной штамповки заодно со штуцерами, что исключает приварку штуцера и обеспечивает большую плотность материала емкости; сварка полусфер производится в несколько (до шести) слоев с последующей прокаткой швов для уплотнения и тщательной зачисткой; зона шва иногда усиливается за счет кольцевого утолщения. Особенно высокие требования предъявляются к емкостям, рассчитанным для длительной эксплуатации в условиях глубокого вакуума (КА для дальнего космоса или длительных полетов).

Детали сферических баков (днища, кольца, диафрагмы, арматура), поступающие на сборку, подвергаются входному контролю. После комплектации днища поступают на проточку торцов под сварку. В некоторых конструкциях сферических баков днища соединяются через промежуточное кольцо, составляющее часть сферического обвода бака. Для обеспечения требуемой массы днища могут подвергаться механической обработке или химическому фрезерованию по наружной поверхности с оставлением большей толщины под усиление зоны швов.

После подготовки кромок производится сборка днищ с деталями арматуры и крепления в два этапа: базирование деталей в специальных приспособлениях и прихватка в нескольких точках, а затем окончательная сварка в несколько проходов (слоев). На этом же этапе обычно к меньшему днищу приваривается и переходное кольцо. После сборки днищ с арматурой они поступают на общую сборку — сварку. Сварные швы подвергаются зонному индукционному отжигу высокой частоты, зачистке, выглаживанию и т. д. После этого производится окончательная термообработка бака, включая закалку, двухкратный отпуск с охлаждением в различных средах и т. д. Сварные швы подвергаются сплошному рентгено- или другому неразрушающему контролю, контролируются геометрические размеры и толщина стенок. В некоторых случаях у малонагруженных баков (например, водяные баки) днища могут соединяться болтами, для чего они имеют точно обработанные фланцы со стыковочными отверстиями; в этом случае предусматривается специ-

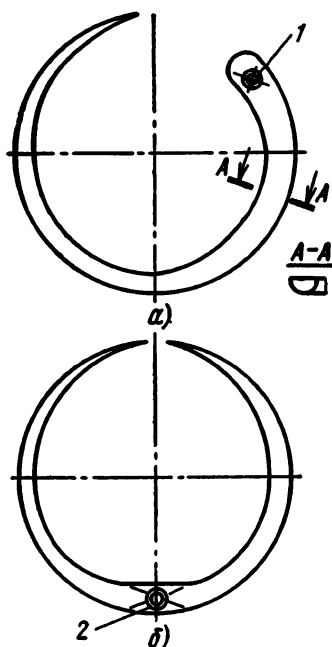
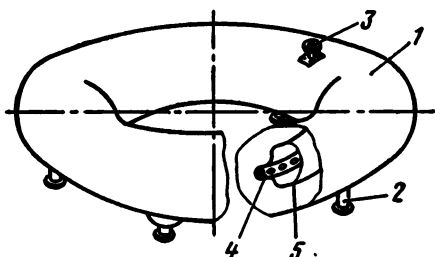


Рис. 70. Схемы заборников торовых баков:

а—с серповидным желобом; б—с подковообразным желобом; 1—выходной патрубок; 2—патрубок

Рис. 71. Схема торового бака с разделительным мешком:

1—корпус торового бака; 2—выходной патрубок; 3—патрубок подачи газа; 4—торовый распределитель газа; 5—мешок



альная герметизация бака по стыку, например резиновой диафрагмой. После испытаний наносятся теплоизоляционные и теплозащитные покрытия и производится ряд заключительных операций (продувка горячим воздухом, окраска, сушка, осмотр и т. д.).

*Торовые баки и емкости*, несмотря на сложность их изготовления, находят довольно широкое применение в КА благодаря удобству компоновки двигательной установки, что дает выигрыш в объеме и массе агрегата. Конструктивно торовые баки могут быть как простыми, состоящими из одной торовой емкости, так и сложными, состоящими из нескольких простых одинаковых (торовые пакеты) или различных (торовые блоки) емкостей (см. рис. 57). Простые торовые баки могут быть двух типов: сферические, состоящие из двух полуторовых днищ, и цилиндрические, состоящие из двух полуторовых днищ, между которыми имеется цилиндрическая торовая обечайка. Полуторовые днища изготавливаются почти во всех случаях (кроме очень крупных) из кольцевых листовых заготовок штамповкой в несколько переходов. В случае применения титановых или магниевых сплавов чаще применяется штамповка с подогревом. Внутри торовых баков обычно устанавливаются демпфирующие устройства, представляющие, например, плоскую листовую деталь с большим количеством отверстий и ребер жесткости, изготавливаемую холодной штамповкой из листовой заготовки. Демпферы устанавливаются в одном из днищ, после чего днища в специальном приспособлении собираются между собой. Аналогично другим конструкциям баков почти все мелкие детали арматуры и установочные детали должны привариваться заранее. Специфичными для торовых баков являются конструкции заборников, кото-

рые бывают двух типов: с подковообразным желобом, когда выходной патрубок заборного устройства располагается в центре желоба, и серповидным желобом, когда выходной патрубок располагается на расширенном конце желоба (рис. 70); такая конструкция заборного устройства с желобом по поверхности тора обеспечивает надежный и непрерывный забор компонента. Изготовление желобов с переменным сечением производится штамповкой. Так как изготовление поршневых вытеснительных систем для торовых баков весьма сложно и их работа вследствие возможных перекосов и заклиниваний ненадежна, то наиболее часто применяются вытеснительные устройства мешкового типа, когда в мешке может находиться или компонент топлива, или вытесняющий газ, подаваемый через специальный штуцер в торовый распределитель газа, устанавливаемый с мешком внутри бака (рис. 71). Сборка цилиндрических торовых баков начинается с соединения полуторового днища с цилиндрическими обечайками (в ряде случаев через усиливающие кольца—шпангоуты), после чего в специальных стапелях привариваются второе полуторовое днище и ряд установочных деталей (кронштейны, уголки и т. д.). В полости цилиндрических баков устанавливаются (сваркой) несколько перегородок — демпферов — кольцевых листовых деталей с отверстиями. Для увеличения жесткости у цилиндрических торовых баков устанавливаются по внутреннему обводу наружные шпангоуты, которые привариваются к внутренней обечайке.

При наличии в конструкции КА нескольких одинаковых простых торовых баков с целью увеличения жесткости и конструктивной завершенности они связываются в пакет емкостей (см. рис. 57, з). При наличии различных простых торовых баков они объединяются в сложные блоки (см. рис. 57, и). Обычно баки соединяются по внешним обводам сваркой через обечайки, имеющие люки для обслуживания и сборки, элементы жесткости, установочные детали. По внутренним обводам баки соединяются с помощью балок, прикрепляемых с помощью болтов к кронштейнам, приваренным к соединяемым бакам. После соединения торовых баков в блок к ним приваривается ряд установочных деталей и деталей арматуры. Далее на баки наносятся теплозащитные и теплоизоляционные покрытия. При сборке все отверстия заглушаются технологическими заглушками во избежание засорения и загрязнения внутренних полостей баков. После окончания общей сборки блоки поступают на испытания.

*Неметаллические баки и емкости* благодаря специфике применяемых материалов и технологии их изготовления, а также некоторым конструктивным особенностям выделяются в особую группу.

Расширяющееся применение композиционных материалов в космических аппаратах обусловлено рядом их преимуществ, главными из которых являются малая удельная масса и высокие удельная прочность, удельная жесткость, теплоемкость, диэлектрические свойства, хорошие теплоизоляционные свойства, низкая теплопроводность (в сотни раз меньше, чем у металлов), отсутствие магнит-



ных свойств. В последнее время разрабатываются высокопрочные и жаропрочные композиционные материалы, армированные асбестом, волокнами бора, углерода и т. д. Кроме того, большинство композиционных материалов обладает хорошей виброустойчивостью, стойкостью против агрессивных сред, они нечувствительны к царапинам, могут выдерживать значительные температурные градиенты, особенно при кратковременном воздействии высоких температур, обладают пониженной испаряемостью в условиях вакуума. Эти свойства позволяют рассматривать композиционные материалы как перспективные для КА. Отметим также, что достижения в технологии их изготовления позволяют получать относительно простыми способами и средствами детали сложной конструкции и формы. Применение композиционных материалов для баков и емкостей высокого давления дает выигрыш в массе до 15 ... 20% и больше.

Широкое применение композиционных материалов в космической технике сдерживается некоторыми отрицательными особенностями и, в первую очередь, негерметичностью их, особенно при высоких внутренних давлениях и длительном хранении, что объясняется пористостью терморепактивных связующих, а также склонностью связующих к растрескиванию при деформациях, что еще больше способствует негерметичности композиционных материалов. Кроме того, большинство современных композиционных материалов может работать в условиях длительного воздействия только до температур 200 ... 250° С. К недостаткам их относится и изменение физико-механических характеристик в процессе длительного (годы) хранения и анизотропность свойств. Эти недостатки преодолеваются, с одной стороны, правильным построением технологии изготовления изделий из композиционных материалов, например обеспечение необходимой ориентации волокон армирующего материала в направлении действия сил (геодезия намотки), подбор оптимального соотношения связующего и армирующего материалов, оптимальное натяжение волокон при намотке, оптимальные режимы полимеризации и т. д., с другой стороны, некоторыми конструктивными решениями, учитывающими недостатки и особенности композиционных материалов. К ним относятся, главным образом, включение в конструкцию емкости изоляционного герметизирующего слоя, который может быть металлическим или полимерным на основе различных каучуков. Герметизирующий слой должен обеспечивать совместность деформаций этого слоя и композиционной оболочки во избежание деформаций и вспучивания и разрушения внутренней герметизирующей оболочки. Наиболее полно этим требованиям отвечает тонкая (0,1 ... 0,2 мм) металлическая внутренняя облицовка, приклеенная к намотанной композиционной стенке.

В конструкциях КА композиционные материалы применяют для изготовления сферических емкостей высокого давления вытеснительной системы. Сферические емкости для газов вытеснительной системы (например, гелиевые емкости) могут быть до 500 ...

... 700 мм в диаметре и рассчитаны на давления до  $5 \cdot 10^4$  кПа. Они обычно состоят из герметизирующей и композиционной оболочек, штуцеров с шайбами, прижимными гайками (рис. 72). Несущей является композиционная оболочка. Штуцера служат для подвода к емкости соединительных труб, крепления емкостей в изделии; они служат также технологическими базовыми поверхностями при установке емкости на намоточном станке. Гайки и шайбы фиксируют положение штуцера и обеспечивают надежное его соединение с оболочкой.

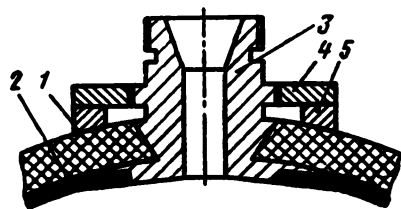


Рис. 72. Конструкция стеклопластиковой емкости:

1—стеклопластик; 2—герметик; 3—штуцер; 4—прижимная гайка; 5—шайба

фиксируют положение штуцера и обеспечивают надежное его соединение с оболочкой. Наибольшее распространение для емкостей высокого давления находят стеклопластики, технологический процесс изготовления цилиндрических, сферических и других емкостей из которых содержит следующие этапы. 1. *Изготовление сферической оправки*, на которую производится намотка оболочки, из легкоудаляемого материала: водорастворимые соли ( $KNO_2$ ), легкоплавкие металлы (сплав Вуда), смесь кварцевого песка с поливиниловым спиртом, гипс, органические соединения (парафин, воск) и т. д. 2. *Установка штуцеров* производится или методом наклейки на оправку, или заливкой в тело оправки с помощью выступающих элементов. 3. *Нанесение герметизирующей облицовки* (герметики полимерного типа в жидком или пастообразном состоянии) производится пульверизацией, поливом, окутанием или шпателем до получения необходимой толщины, после чего оправка с облицовкой направляется для вулканизации при соответствующей температуре. Толщина герметика должна быть постоянной, а поверхность ровной без дефектов. 4. *Намотка оправки стекловолокнами* производится на специальных намоточных станках, оснащенных устройствами, обеспечивающими необходимую кинематику для получения заданного оптимального геодезического рисунка намотки, который определяется прочностными расчетами. Стеклонити при подаче с бобин проходят через пропиточно-натяжной тракт, обеспечивающий пропитку ниток связующим и необходимое натяжение их. Контроль осуществляется взвешиванием оправки до и после намотки. 5. *Установка шайб и гаек* на штуцера производится после окончания намотки. 6. Оправка с оболочкой подается на *полимеризацию*, которая обеспечивает затвердевание оболочки, монолитность структуры ее, получение заданных прочностных свойств. 7. *Удаление оправки* производится после окончания полимеризации оболочки вымыванием струей воды, плавлением при нагревании и т. п. 8. После удаления оправки производятся *отделочные финишные операции*: зачистка заусенцев, удаление наплывов связующего, концов нитей, зачистка штуцеров, нанесение лакокрасочных покрытий, окраска, сушка, маркировка и т. д. 9. *Испытания на прочность, герметичность* и др. производятся аналогично металлическим емкостям.

10. *Контроль на соответствие качества емкости техническим условиям* включает внешний осмотр, взвешивание, измерение емкости, контроль резьбы и поверхности штуцеров. С целью полного контроля качества герметизирующей облицовки одна емкость из партии подвергается разрезке в различных направлениях и осмотру по специальной технологии.

Схема изготовления торовых стеклопластиковых емкостей с металлической герметизирующей облицовкой состоит из следующих этапов: *штамповка двух полуторовых днищ* из листа нержавеющей стали толщиной 0,1—0,2 мм; *изготовление штуцеров* из той же марки стали механической обработкой; *приварка штуцеров* контактной сваркой к полуторам; *сварка полуторов* между собой контактной сваркой; *испытания на герметичность* полученной емкости гелиевым течеискателем; *заливка торовой емкости* гипсом или другим легкоудаляющимся материалом для обеспечения необходимой жесткости при намотке; *химическая очистка поверхности* в щелочной и кислой ваннах; *нанесение на поверхность торовой емкости клея*, марка которого подбирается в зависимости от типа связующего; *намотка стекловолокон*, пропитанных связующим, на металлическую торовую оболочку на намоточных станках; *полимеризация и отверждение* композиционной оболочки по определенной технологии; *удаление внутреннего гипсового слоя* раствором горячей уксусной кислоты или другим способом; *отделочные операции*; *контроль внешним осмотром, взвешивание, контроль на соответствие техническим условиям, испытания на прочность, герметичность* и т. д.

Емкости из композиционных материалов благодаря появлению новых их типов, армированных бором, углеродом, тугоплавкими металлами и т. д., находят все более широкое применение в КА.

#### 7.4. СИСТЕМА ИСПЫТАНИЙ БАКОВ И ЕМКостей КА

С целью обеспечения соответствия баков и емкостей высоким требованиям, предъявляемым к ним, в технологическом процессе их изготовления большое место занимают контрольно-испытательные работы. Определение объема, программы и технологии испытаний баков и емкостей является чрезвычайно сложной задачей, решаемой конкретно для данной емкости в соответствии с требованиями, назначением и условиями эксплуатации. Несмотря на значительное отличие испытаний различных емкостей и баков, они составляют определенную систему, состоящую из отдельных этапов, которые выполняются по специальным программам.

*Конструкторско-доводочные испытания (КДИ)*, целью которых является отработка конструкции бака или емкости, уточнение отдельных конструктивных решений, проверка функционирования отдельных элементов и соответствия конструкции основным предъявляемым требованиям. КДИ проводятся для небольшой партии (3 ... 6) емкостей. Программа КДИ включает в себя испытания на прочность емкости и отдельных элементов (перегородок, сильфонов, диафрагм и т. д.), на герметичность, циклические испытания на

повторные нагрузки, вибро- и ударные испытания, испытания на функционирование отдельных элементов, определение фактического давления разрушения и т. д.

*Чистовые доводочные испытания (ЧДИ)*, целью которых является окончательное уточнение всех конструктивных особенностей емкостей, проверка их технологичности и возможности экономичного изготовления, соответствия конструкции всем требованиям, определение ресурсов работы. ЧДИ обычно проводятся для небольшой партии емкостей, но большей, чем КДИ (6 ... 9). Программа ЧДИ несколько шире КДИ и включает в себя определение массы и величины емкости бака, прочностные испытания бака и отдельных элементов, испытания на герметичность, циклические испытания повторным нагружением, вибро- и ударные испытания, испытания на функционирование (срабатывание) отдельных элементов, определение объема невыработываемого остатка компонента, определение фактического давления разрушения емкости (на части емкостей из партии) и т. д. Часть емкостей подвергается коррозионным испытаниям в среде компонента по специальным программам для определения возможного срока хранения заправленной емкости.

*Испытания установочной партии (ИУП)*, целью которых является проверка отработанности и стабильности технологического процесса изготовления и сборки. ИУП проводятся при постановке в производство новых изделий для небольшой партии (3 ... 5) емкостей, которые изготавливаются по разработанной технологии и проходят предварительно обычные приемные испытания. Программа ИУП включает в себя испытания на прочность и герметичность емкостей и отдельных элементов, вибро- и ударные испытания, испытания на функционирование, циклические испытания на повторную нагрузку, определение фактического давления разрушения и т. д. При положительных результатах ИУП дается разрешение на производство штатных образцов емкостей.

*Приемо-сдаточные (приемные) испытания (ПСИ)* проводятся для всех изготовленных емкостей и баков с целью проверки соответствия каждого бака требованиям ТУ. Особенностью их является обеспечение минимального ущерба качеству и надежности емкостей от проводимых испытаний, например вместо обычной воды при испытаниях применяется дистиллированная с антикоррозионными добавками, тщательно проводится контроль чистоты и целостности емкостей после испытаний, не допускается наличие паров спирта (после промывки) или газов, используемых при отдельных испытаниях и т. д. Программа ПСИ в наибольшей степени зависит от конструкции и требований к конкретным емкостям и бакам и включает в себя в общем случае следующие виды контроля и испытаний: геометрический контроль размеров, определение массы и величины емкости, испытания на прочность и герметичность баков и отдельных элементов, определение объема невыработанного остатка компонента в емкости, проверка функционирования отдельных элементов бака, контроль чистоты внутренних полостей, контроль на отсутствие паров спирта и газов, контроль внешним осмотром целост-

ности элементов, поверхностей и ТЗП и т. д. После ПСИ производится консервация емкостей.

*Контрольно-выборочные (типовые) испытания* (КВИ) проводятся с целью периодического контроля стабильности технологического процесса и качества баков и емкостей. Обычно КВИ проводятся выборочно для небольшого числа баков от партии; количество их зависит от размеров и стоимости и может быть от одного бака до 10% от партии. Повторные КВИ (в случае неудовлетворительных результатов и устранения их причин) проводятся на удвоенном количестве баков. На КВИ поступают емкости, успешно прошедшие ПСИ. Программа КВИ включает в себя следующие виды испытаний: проверка функционирования отдельных элементов, испытания герметичности емкости и отдельных элементов, циклические испытания, виброиспытания на прочность и определение разрушающих нагрузок. Таким образом, главное отличие КВИ от ПСИ заключается в испытании выбранных емкостей до разрушения.

Приведенные этапы испытаний составляют единую систему испытаний при постановке в производство новых изделий. Иногда некоторые этапы испытаний могут совмещаться (например, КДИ и ЧДИ) или вообще отсутствовать, может отличаться от приведенных программ отдельных этапов. Готовые баки и емкости, идущие на общую сборку изделия, подвергаются только приемным (ПСИ) и они входят во всех случаях в программу ПСИ. Испытания на

## 7.5. ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ ЕМКостей

Как показано выше, в программы отдельных этапов системы испытаний входят различные виды испытаний баков и емкостей, основными из которых являются испытания на прочность и герметичность.

Для проведения испытаний на прочность и герметичность необходима подготовка испытываемых объектов. Они должны пройти геометрический контроль, не иметь лакокрасочных покрытий, загрязнений, жировых пятен, влаги, механических повреждений, все трубопроводы, штуцера должны быть герметично заглушены, сами емкости должны пройти промывку, обезжиривание, сушку по специальной технологии, особое внимание должно уделяться на удаление влаги и грязи из микронеплотностей.

Помещение цеха или участка испытаний должно быть чистым, светлым; состав воздуха должен соответствовать нормам, так же как и температура (около 25° С) и влажность (не более 80%), должна быть принудительная приточно-вытяжная вентиляция, дренажная система для вывода воздушно-гелиевой (и других контрольных) смеси после испытаний, помещение не должно быть загазовано испытательными газами. Испытательные участки должны быть оборудованы защитными броневыми щитами, камерами, боксами и другими средствами безопасности. При проведении испытаний на прочность и герметичность должны неукоснительно соблюдаться все требования и правила техники безопасности и охраны труда.

*Испытания на прочность* (опрессовка) являются одним из основных видов испытаний емкостей. Им подвергаются все емкости, и они входят во всех случаях в программу ПСИ. Испытания на прочность, как правило, предшествуют испытаниям на герметичность и динамическим испытаниям; проводятся при давлениях:

$P_{исп} = (1,15 \dots 1,25) P_{раб}$ , где  $P_{раб}$  — максимальное рабочее давление в емкости. Иногда для КА, работающих в трудных условиях, испытательное давление назначают на 30 ... 40% выше рабочего.

Испытания на прочность (рис. 73) производятся жидкостью [дистиллированная (ПСИ), обычная питьевая или вода с ингибиторами] или газом. После предварительного внешнего осмотра на отсутствие повреждений испытываемая емкость устанавливается на

специальную подставку, позволяющую наблюдать за изделием. Заполнение жидкостью производится до появления ее из штуцера для выпуска воздуха из емкости, после чего штуцер заглушается, и начинают с помощью специального насоса создавать избыточное давление. Вначале производится предварительная опрессовка под давлением  $P_{пред} = (0,1 \dots 0,2) P_{исп}$ , но не более  $3 \cdot 10^3$  кПа, в течение 2—3 мин для проверки плотностей соединений. В случае наличия утечек давление сбрасывается, дефекты устраняются и производится повторное испытание. В случае отсутствия утечек давление доводится до  $P_{исп}$  и производится выдержка под этим давлением в течение 10 ... 15 мин, после чего давление стравливается до рабочего, при котором производится осмотр емкости. Емкость считается годной, если отсутствуют места истечения воды и изменение объема емкости не больше допустимого по техническим условиям, что проверяется или мерной емкостью, или массовым методом. После сброса давления и слива воды производится сушка емкости.

Испытания на прочность емкостей газом (воздухом), применение которых в последнее время возрастает, производятся при тех же испытательных давлениях и условиях, что и в первом случае. Емкости считаются годными, если отсутствуют падение давления, контролируемое манометром, в течение пяти минут (при отключенной системе наддува) и очаги негерметичности, определяемые по звуку истекающей струи воздуха. Осмотр емкости производится при рабочем давлении. В этом случае также контролируется изменение испытываемого объема.

*Испытания на длительную прочность* (длительная опрессовка) проводятся для некоторых ответственных емкостей КА, которые в процессе эксплуатации длительное время находятся под действием рабочего давления. Такие же испытания проводятся обычно на этапе чистовых доводочных испытаний, испытаний установочной партии или при контрольно-выборочных испытаниях. Сущность их заключается в том, что емкость наполняется рабочей жидкостью или газом и выдерживается при рабочем давлении в течение времени, вдвое

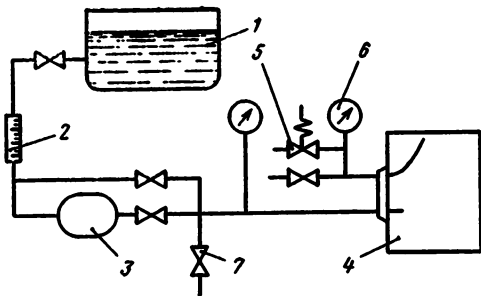


Рис. 73. Схема испытаний емкости на прочность:

1—ванна с жидкостью (вода, спирт); 2—мерная шкала; 3—гидронасос; 4—испытываемое изделие; 5—предохранительный клапан; 6—манометр; 7—вентиль

большого, времени эксплуатации емкости под рабочим давлением. Эти испытания позволяют выявить дефекты и даже разрушения от коррозии под напряжением от ползучести, от водородной хрупкости и т. д., которые при обычных испытаниях могут остаться незамеченными. В некоторых случаях часть емкостей при КДИ подвергается рабочему давлению весьма длительное время (или до разрушения, или в 5 ... 10 раз превышающее эксплуатационное время).

*Циклические испытания емкостей КА*, так же как и испытания на длительную прочность, проводятся или при отработке конструкции и технологии изготовления емкостей, или при выборочных (КВИ) испытаниях и не проводятся при ПСИ. Сущность циклических испытаний заключается в повторно-статическом нагружении емкостей от атмосферного до испытательного давления с числом циклов, в три раза превышающим ожидаемое число циклов нагружения в процессе эксплуатации и приемных испытаний. Каждый цикл испытаний состоит из подъема давления до испытательного, выдержки при этом давлении в течение 2 ... 3 мин, сброса давления до атмосферного и выдержки емкости при атмосферном давлении в течение 1 ... 2 мин. Испытательное давление выбирается, как правило, равным рабочему, но в некоторых случаях, исходя из условий эксплуатации, режим испытаний может быть более сложным, ряд циклов проводится при  $P_{исп} = P_{раб}$ , ряд при  $P_{исп} = (1,1 \dots 1,2) P_{раб}$ , ряд при  $P_{исп} < P_{раб}$ . Общее число циклов может достигать нескольких тысяч. При КДИ и ИУП циклические испытания могут проводиться для определенного числа емкостей до разрушения с целью определения максимального числа циклов, которое может выдержать данная конструкция емкости. Циклические испытания могут быть как гидравлическими, так и пневматическими. Годность емкости при циклических испытаниях определяется отсутствием течей и остаточных деформаций, поэтому они предшествуют испытаниям на герметичность.

*Испытания на разрушение* проводятся обычно для ограниченно-го числа емкостей в период постановки их на производство и при выборочных испытаниях (КВИ). Обычно они проводятся гидравлическим давлением. Режим постепенного, иногда ступенчатого, повышения давления зависит от конструкции и назначения емкости. Испытания производятся в специальных бронекамерах после проведения обычных ПСИ. При испытаниях емкость вначале выдерживается при рабочем или испытательном  $[(1,15 \dots 1,4) P_{раб}]$  давлении, после чего проводится увеличение давления до разрушения. Целью этих испытаний является определение реального запаса прочности данной партии емкостей.

Значительное место в системе испытаний емкостей занимают динамические, наиболее широко применяемыми из которых являются вибрационные и ударные испытания.

*Вибрационные испытания* емкостей являются обязательными на всех этапах испытаний, кроме ПСИ. Важность их определяется тем, что космические аппараты на всех стадиях эксплуатации подвергаются вибрационному воздействию в широком спектре частот.

Целью виброиспытаний емкостей является проверка вибропрочности — сохранения работоспособности после воздействия заданных вибраций в течение определенного времени, и виброустойчивости — правильного функционирования отдельных устройств и элементов емкостей в условиях действующих вибраций. В процессе виброиспытаний проверяются крепления штуцеров, прочность, герметичность и качество крепления диафрагм, воронкогасителей, заборных устройств, кронштейнов и т. д. и вибропрочность самих корпусов (особенно сварных швов) емкостей. Поэтому после виброиспытаний должны проводиться испытания на прочность и герметичность. Предел частот колебаний и амплитуд (перегрузок) определяется из условий эксплуатации изделия и отражается в методике испытаний; они могут быть в пределах от 5 до 2500 Гц и перегрузки до 15 ... 20 единиц. Вибрационные испытания производятся с заправленными емкостями и заглушенными штуцерами на вибростендах, которые в зависимости от массы и требуемых режимов вибраций могут быть различной конструкции: электродинамические, электро-механические, электрогидравлические, гидравлические и т. д. Установленная емкость обезвешивается при помощи системы различных амортизирующих пружин. Режим задания частот колебаний может быть различным: дискретным в заданном пределе, методом «качающейся частоты», случайным узкополосным внутри заданного предела, случайным широкополосным (сплошным спектром частот в заданном пределе). Наиболее часто применяется режим «качающейся частоты», когда частота плавно изменяется во всем заданном пределе, а перегрузки изменяются дискретно, образуя ряд (10 ... 15) ступенек, характеризующихся одним значением перегрузки и небольшим пределом частот колебаний. Как правило, виброиспытания емкостей проводятся в двух взаимно перпендикулярных направлениях и реже в трех направлениях. Годность бака определяется после испытаний на прочность и герметичность.

*Ударные испытания* емкостей (испытания на ударную прочность) являются одним из видов динамических испытаний и проводятся на некоторых этапах, кроме ПСИ, при отработке конструкции. Иногда (методом сброса) они могут входить и в ПСИ. Ударные испытания проводятся для проверки работоспособности емкости и ее элементов после воздействия на нее значительных пиковых (часто многократных) перегрузок. Они проводятся или на специальных стендах, воссоздающих ударные нагрузки определенной перегрузки и времени воздействия, или сбросом емкости, помещаемой в специальный контейнер, с заданной высоты на металлическую или иную поверхность, характеризующуюся заданными упругими характеристиками. Режим ударных испытаний устанавливает направления и количество ударов, величины перегрузок и время воздействия. Режим испытаний может быть многоступенчатым. Годность емкости после ударных испытаний определяется целостностью емкости и ее элементов, а также сохранением ее работоспособности и герметичности.



## 7.6. ИСПЫТАНИЯ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

Испытания на герметичность относятся к основным видам испытаний баков и емкостей, обеспечивающих надежность и качество их в эксплуатации, проводятся для всех без исключения емкостей, после всех испытаний на прочность и динамических.

Герметичностью называют свойство емкости или бака не пропускать рабочий компонент (жидкость или газ) через соединения или через поры основного материала. Хотя герметичность связана с отсутствием утечек реального рабочего компонента, называемого рабочей средой, испытания обычно проводятся с помощью контрольных веществ (жидкостей или газов), называемых контрольными (пробными или индикаторными) средами и обладающих, как правило, большей проникающей способностью и меньшей стоимостью. Кроме экономических преимуществ это обеспечивает более высокую надежность контроля, безопасность при испытаниях и меньшее влияние (например, коррозионное) на испытываемое изделие, что особенно важно для штатных (применяемых в изделиях) емкостей.

Герметичность характеризуется количественным параметром, называемым степенью герметичности (негерметичностью), под которой понимается объемное или массовое количество вытекающего через места утечки компонента в единицу времени при определенных условиях (размерность в СИ — ватт). Допускаемая степень герметичности задается конструктором исходя из условий правильного функционирования и эксплуатации изделия.

При контроле герметичности важнейшей характеристикой метода и аппаратуры (схемы испытаний) является чувствительность, которая определяется минимальным потоком контрольной среды через места утечек, надежно регистрируемой при испытаниях. Чувствительность схемы испытаний должна быть выше, чем заданная (контролируемая) степень герметичности емкости; определяется с помощью контрольной течи—установки, с помощью которой создается поток контрольной среды заданной величины. Степень герметичности, определяемая в результате испытаний, должна быть меньше, чем заданная; в этом случае емкость удовлетворяет ТУ и считается годной.

Все методы испытаний герметичности можно разделить на две группы: определения суммарной негерметичности, которая определяет степень герметичности изделия в целом, не определяя места утечек, и методы определения локальной негерметичности, связанные с определением мест утечек контрольной (или индикаторной) среды. В ТУ могут задаваться степень как суммарной, так и локальной негерметичности по отдельным местам емкости (сварные швы, места разъемных соединений и т. д.), а иногда то и другое вместе.

*Методы контроля суммарной негерметичности* основаны на определении или падения давления в емкости в течение определенного времени с помощью манометров или других приборов, или присутствия контрольного газа, просочившегося через неплотности емкостей в контролируемый объем, с помощью различного типа инди-

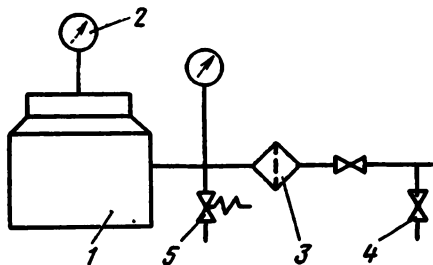


Рис. 74. Схема контроля герметичности по падению давления:

1—испытуемое изделие; 2—манометр; 3—фильтр; 4—вентиль; 5—предохранительный клапан

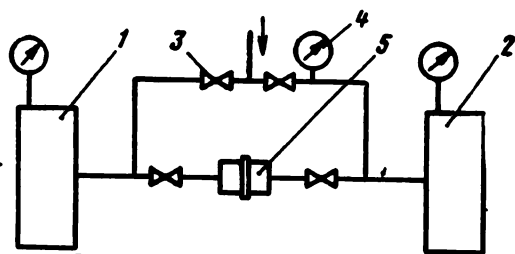


Рис. 75. Схема испытания герметичности дифференциальным методом:

1—контролируемое изделие; 2—эталонная емкость; 3—вентиль; 4—манометр; 5—дифференциальный манометр

каторных приборов (течеискателей). Рассмотрим некоторые методы определения суммарной негерметичности.

*Метод замера падения давления (манометрический)* — один из распространенных — относится к методам с низкой чувствительностью ( $10^{-1} \dots 10^{-3}$  Вт). Суть его заключается в создании в контролируемой емкости избыточного давления от источника сжатого газа и выдержки в течение заданного промежутка времени. В начале и в конце испытаний замеряется манометрами величина давления. Обычно для более точной и объективной характеристики герметичности в емкости устанавливаются два манометра (рис. 74) высокого класса точности. Точность определения негерметичности зависит от температуры газа и внешнего барометрического давления, которые необходимо специально измерять. Этот метод эффективен для емкостей небольшого объема с невысокими требованиями по герметичности. Преимуществами его являются простота и низкая стоимость и дистанционность (возможность выноса манометра за пределы зоны испытаний).

*Дифференциальный метод контроля (метод дифференциального манометра)* является развитием метода замера падения давления. Суть его заключается в использовании в схеме испытаний дополнительной эталонной емкости (рис. 75), которая заполняется одновременно с испытуемой емкостью контрольной средой, в результате чего в обеих емкостях создается одинаковое давление. При утечке контрольной среды (воздух, азот) из контролируемой емкости получающаяся разность давлений в емкостях фиксируется дифференциальным манометром. Чувствительность схемы испытаний составляет  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  Вт. Преимущества метода: простота схемы, более высокая производительность и возможность дистанционного измерения давления. Недостаток — существенное влияние на точность показаний температуры газов.

*Метод замера повышения давления в вакуумной камере* заключается в том, что после помещения испытуемой емкости в вакуумную камеру в емкости создается рабочее давление (воздух, азот), а камеру вакуумируют до  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  Па. Вследствие утечки газа за определенное время из испытуемой емкости давление в вакуумной камере повышается, что фиксируется измерительной аппаратурой (рис. 76). Чувствительность схемы определяется точностью измерительных устройств и лежит в пределах  $10^{-6} \dots 10^{-7}$  Вт. На общую величину натекания газа в вакуумную камеру влияет также негерметичность самой камеры и газоотделение с внутренней поверхности камеры и наружной поверхности емкости в условиях вакуума.

*Метод замера изменения величины вакуума* в испытуемой емкости применяется для емкостей, допускающих по прочностным показателям глубокое вакуумирование. Суть его заключается в создании в испытуемой емкости вакуума  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  гПа, выдержке замкнутого вакуумированного объема в течение заданного времени и определения величины изменения вакуума вследствие натекания га-

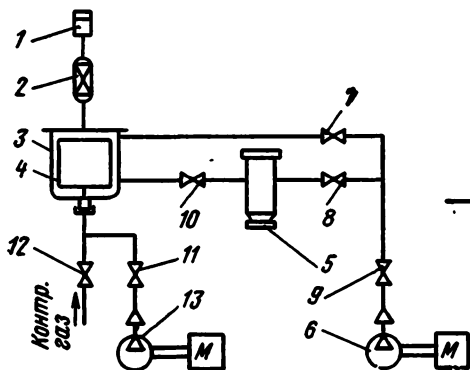


Рис. 76. Схема измерения герметичности методом измерения повышения давления в вакуумной камере:

1—вакуумметр; 2—манометрическая нони-  
зационная лампа; 3—вакуумная камера;  
4—испытуемое изделие; 5—пароструйный  
вакуумный насос; 6, 13—механический ва-  
куумный насос; 7... 12—вентиль

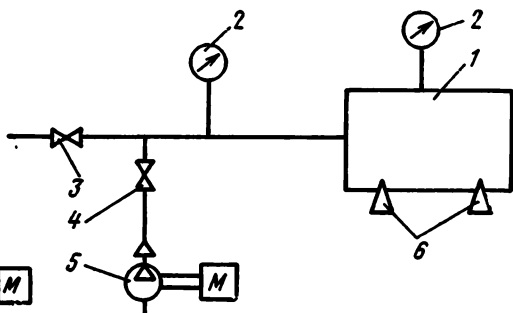


Рис. 77. Схема контроля герметично-  
сти методом замера изменения вели-  
чины вакуума:

1—испытуемое изделие; 2—вакуумметр; 3,  
4—вентиль; 5—механический вакуумный  
насос; 6—подставка

за в емкость через места течей. По разнице значений вакуума в начале и в конце испытаний можно определить суммарную негерметичность емкости (рис. 77). Чувствительность метода составляет  $6 \cdot 10^{-7}$  Вт.

Значительно более высокой чувствительностью (по сравнению с рассмотренными) обладают методы определения негерметичности с помощью специальных течейскаателей и индикаторных газов, которые основаны на определении наличия и концентрации определенного индикаторного газа в заданном объеме. Наиболее распространенными типами течейскаателей являются масс-спектрометрические с использованием в качестве индикаторного газа гелия (гелиево-воздушная или азотно-гелиевая смеси). Преимуществами гелия как индикаторного газа являются малое содержание его в атмосфере ( $5 \cdot 10^{-4}\%$ ), высокая проникающая способность, химическая инертность, безвредность и взрывобезопасность, невоспламеняемость и т. д. Гелиевые течейскаатели состоят из трех основных узлов: ионного источника, в котором молекулы газа, сталкиваясь с электронами, ионизируются в ионы с положительным зарядом  $e$ ; анализаторной камеры, в которой ионы ускоряются под действием электрического поля и приобретают скорость, зависящую от их массы  $m$ , и разделяются под действием магнитного поля на компоненты в зависимости от отношения  $m/e$  и скорости; коллектора с регистрирующим устройством, определяющим интенсивность выделенного ионного пучка данного газа. Кроме этих основных узлов течейскаатели имеют выносные пульты управления (ВПУ) с приборами-указателями и рабочий шуп для забора смеси газов в контролируемой точке, откачные системы с вакуумными насосами и устройствами для создания контрольной течи для калибровки течейскаателей.

Существует много различных конструкций течейскаателей масс-спектрометрического типа с высокой чувствительностью ( $10^{-11}$  ...

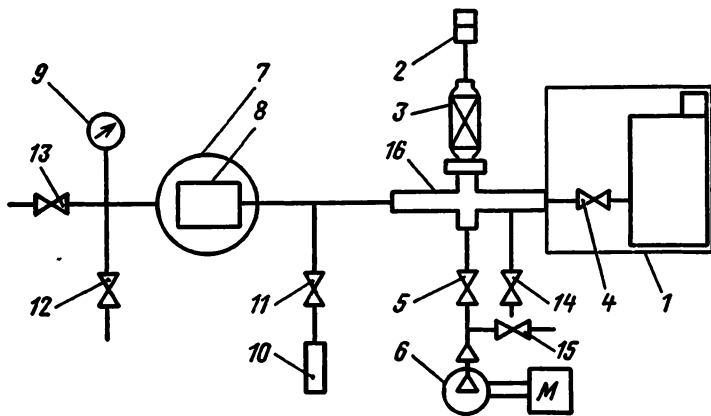


Рис. 78. Схема контроля герметичности методом вакуумирования изделия, помещенного в гелиевую камеру:

1—течейскатель; 2—вакуумметр; 3—термопарная лампа; 4, 5, 11 ... 15—вентили; 6—механический вакуумный насос; 7—гелиевая камера; 8—испытуемое изделие; 9—манометр; 10—контрольный течь; 16—приставка

$10^{-13}$  Вт) и достаточной разрешающей способностью. В последнее время разрабатываются конструкции течейскаателей с автоматизированным процессом контроля, перестраивающиеся (с помощью кнопок) на различные индикаторные газы (аргон, водород, неон), малогабаритные, портативные течейскаатели и т. д. Кроме течейскаателей масс-спектрометрического типа, известны течейскаатели, построенные на других принципах.

Рассмотрим некоторые методы определения суммарной негерметичности с использованием масс-спектрометрических течейскаателей.

Контроль герметичности емкостей с использованием вакуумных камер заключается в том, что испытываемая емкость, подсоединенная к системе заправки индикаторным газом, устанавливается в герметичной вакуумной камере, которая соединена с откачной насосной системой и с течейскаателем (ПТИ-6, ПТИ-7). После заправки испытываемой емкости индикаторным газом под небольшим давлением и вакуумирования камеры до давления  $1 \cdot 10^{-3}$  гПа индикаторный газ вследствие разности давлений в емкости и камере проникает через неплотности емкости в вакуумную камеру и далее в камеру течейскаателя, где сигнал от индикаторного газа регистрируется на ВПУ. Контроль суммарной герметичности емкостей в вакуумной камере может осуществляться сравнением потока, создаваемого за счет утечек из емкости, с известным потоком от контрольной течи или сравнением концентрации гелия в вакуумной камере, создаваемой негерметичностью емкости, и в эталонной емкости.

Оценка суммарной негерметичности емкостей может производиться также методом накопления контрольного газа в фиксированном объеме при атмосферном давлении. Чувствительность схемы в этом случае составляет  $(0,1 \dots 0,6) \cdot 10^{-5}$  Вт

*Метод вакуумирования емкости, помещенной в гелиевую камеру, заключается в том, что испытываемая емкость вакуумируется до давлений  $10^{-3}$  гПа и к ней подключается течейскаатель (рис. 78), а в камеру, куда помещена испытываемая емкость, нагнетается гелиевая смесь, которая через неплотности емкости проникает в нее, оттуда в камеру течейскаателя и регистрируется на ВПУ. Предварительно определяется чувствительность схемы по контрольной течи; чувствительность этого метода достигает  $0,1 \cdot 10^{-10}$  Вт.*

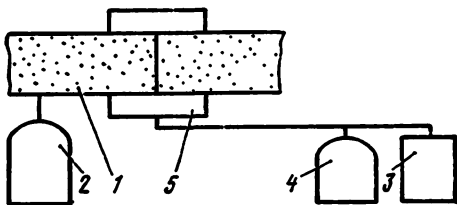


Рис. 79. Схема контроля герметичности с применением разъемных вакуумных камер:

1—изделие; 2—баллон с контрольным газом; 3—теченскатель; 4—вспомогательная откачная система; 5—вакуумная разъемная камера

*Метод вакуумирования с применением разъемных вакуумных камер* (рис. 79) заключается в том, что эти разъемные камеры монтируются на контрольном участке емкости и вакуумируются до давлений  $10^{-1} \dots 10^{-3}$  ГПа, а в емкости создается избыточное давление индикаторного (контрольного) газа, который через микронеплотности проникает в полость вакуумной камеры, соединенной с теченскателем, и регистрируется на ВПУ. Этим способом можно контролировать кольцевые сварные швы, разъемные фланцевые соединения, стыки емкостей и т. д.

*Метод вакуумирования с применением вакуумной присоски* (рис. 80), представляющей собой герметичную камеру, соединенную с откачной системой и теченскателем и снабженную уплотнительной вакуумной резиной, заключается в том, что после установки присоски на контролируемом участке, она (присоска) вакуумируется, а в емкости создается избыточное давление контрольного (индикаторного) газа. После выдержки в течение 3 ... 5 мин по показаниям теченскателя определяется суммарная негерметичность емкости.

*Метод вакуумирования одной полости емкости при избыточном давлении в другой* применяется для определения суммарной негерметичности перегородок между полостями в сложных емкостях. При этом методе в одной полости, соединенной с откачной системой и теченскателем, создается вакуум порядка  $10^{-3}$  ГПа, а в другую полость надувается контрольный газ.

Суммарная негерметичность емкостей — важнейшая оценочная характеристика конструкции, но в производстве часто возникает потребность определения конкретного места утечек — локальной негерметичности изделия, методов определения которой много.

Одним из простейших и грубых методов определения крупных локальных течей является прослушивание мест утечек из емкости (шипение вытекающего воздуха), находящейся под избыточным давлением, медицинским стетоскопом пере-

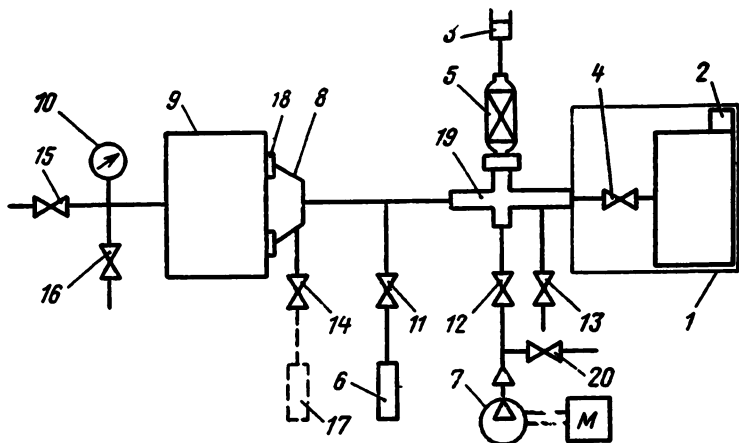


Рис. 80. Схема контроля герметичности с применением вакуумных присосок:

1—теченскатель; 2—выносной прибор ВПУ; 3—вакуумметр; 4—вентиль; 5—термопарная лампа; 6, 17—контрольная течь; 7—вакуумный насос; 8—вакуумная присоска; 9—испытуемое изделие; 10—манометр; 11 ... 16, 20—вентиль; 18—резиновая уплотнительная прокладка; 19—приставка

мещением его вдоль сварных швов, мест разъема. Метод не позволяет дать количественной оценки, субъективен и применяется редко.

К грубым, качественным относится также *гидростатический метод* (метод керосиновой пробы или меловой обмазки), когда в качестве контрольной среды применяется жидкость с хорошей проникающей способностью, например керосин, вода, которая под давлением нагнетается в испытываемую емкость. На поверхность емкости (или на места предполагаемых утечек) наносится меловая обмазка специального состава, выполняющая роль индикатора течей. Через заданное время выдержки в местах течей проникающая жидкость вызывает потемнение мелового покрытия, что регистрируется визуально.

К методам качественной оценки локальной негерметичности, применяющимся в производстве, относится *метод контроля герметичности с помощью деформирующихся масс*, выполняющих роль индикатора течей (методы обмыливания, пенного индикатора). Суть его заключается в том, что на поверхность емкости, находящейся под избыточным (рабочим) давлением контрольного газа (азот, воздух) в местах ожидаемых течей после зачистки и обезжиривания наносится слой пенной массы толщиной 1 ... 3 мм. Проникающий через микropоры емкости контрольный газ накапливается под слоем массы и приводит к образованию пузырей или группы пузырьков, что через заданное время (не менее 5 мин) регистрируется визуально. Метод характеризуется простотой технологии, экономичностью, широкими возможностями для применения в емкостях различной конфигурации, обладает чувствительностью  $10^{-3} \dots 10^{-7}$  Вт.

*Метод аквариума* также относится к качественным методам определения локальной негерметичности. Суть его заключается в том, что емкость, находящаяся под давлением газа (воздух, азот, водород), погружается в ванну с жидкостью (вода, спирт) на определенное (около 5 мин) время, после чего визуально определяются места негерметичности по выделяющимся пузырькам газа (рис. 81). Перед погружением в емкость подается давление порядка 0,1 ... 0,2 от испытательного. Погружение производится на глубину, не превышающую 5 ... 20 см от поверхности жидкости до верхней точки емкости, после чего давление доводится до испытательного. После выдержки давление снижается на 10% от испытательного и при вращении или поворотах емкости определяются места выделения пузырьков газа. Чувствительность метода составляет около  $5 \cdot 10^{-3}$  Вт.

Для определения мест утечек и количественной оценки локальной негерметичности широкое применение находят методы, основанные на использовании масс-спектрометрических (и других типов) течейскаателей.

*Метод шупа* является среди них одним из самых распространенных. Суть его заключается в том, что вдоль проверяемых участков (сварные швы, места стыковки и т. д.) емкости, находящейся под давлением контрольного газа, перемещают шуп, соединенный специальным вакуумным шлангом с течейскаателем. При наличии утечек контрольного газа (гелиевой смеси) из емкости в данном месте газ засасывается шупом, попадает в анализатор течейскаателя и регистрируется (рис. 82). Скорость перемещения шупа 1 ... 5 мм/с, которая снижается до минимального значения при повторном проходе с целью уточнения места течи. Зазор между наконечником шупа и проверяемой поверхностью 1 ... 2 мм. После устранения утечек испытания повторяются. Чувствительность метода около  $5 \cdot 10^{-7}$  Вт.

*Метод вакуумирования объекта с последующим обдувом его контрольным газом* находит применение в промышленности, особенно для емкостей, для которых недопустимо создание внутреннего давления. Суть его заключается в том, что емкость, внутри которой создается вакуум, обдувается тонкой струей контрольного

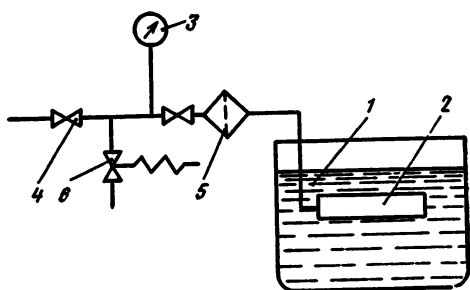


Рис. 81. Схема контроля герметичности методом аквариума:

1—ванна с жидкостью (вода, спирт); 2—испытуемое изделие; 3—манометр; 4—вентиль; 5—фильтр; 6—предохранительный клапан

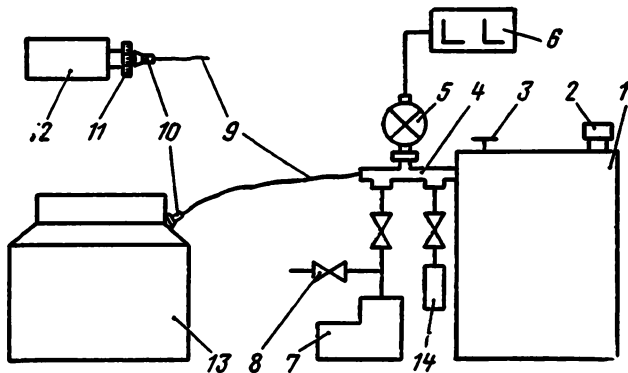


Рис. 82. Схема контроля герметичности методом шупа:

1—течексатель; 2—ВПУ (выносной пульт управления); 3—вентиль; 4—приставка к ПГИ; 5—манометрическая лампа термомпарная; 6—вакуумметр; 7—вакуумный насос; 8—вентиль; 9—трубка вакуумная; 10—шуп с насадкой; 11—мерная шкала; 12—контрольная капиллярная трубка; 13—испытуемое изделие; 14—контрольная течь

газа. Вследствие разности давлений контрольный газ через микронеплотности проникает внутрь испытуемой емкости, соединенной с масс-спектрометрической камерой течексателя (рис. 83). Обдув поверхности производится с помощью пистолета-обдувателя со скоростью перемещения не более 5 мм/с. Для контроля правильности определения места течи оно обдувается струей сжатого воздуха под давлением  $(4 \dots 6) 10^2$  кПа, дается выдержка для откачки гелия из вакуумированной емкости, после чего место течи повторно обдувается струей гелия и фиксируется показание ВПУ. Чувствительность метода составляет  $10^{-9}$  Вт.

Кроме масс-спектрометрических течексателей находят применение так называемые галогидные течексатели (ГТИ), основанные на увеличении эмиссии ионов в присутствии галогенов. Чувствительным элементом подобных течексателей является датчик, имеющий диод, платиновый анод которого нагрет до температуры около  $900^\circ\text{C}$  и эмитирует положительные ионы. С помощью вентилятора или вакуумного насоса контрольный газ, содержащий галогены, пропускается через межэлектродное пространство и вызывает увеличение тока эмиссии ионов, что и регистрируется выносным прибором течексателя. В качестве контрольного газа чаще всего применяется фреон в чистом виде или в смеси (10%) с воздухом или азотом. Могут применяться и другие галогены. Чувствительность метода достаточно

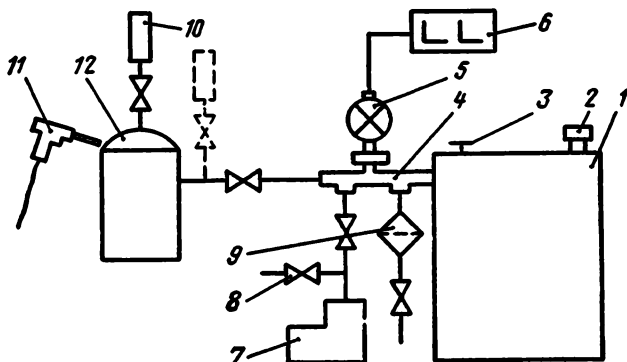


Рис. 83. Схема контроля герметичности методом вакуумирования изделия с последующим обдувом его контрольным газом:

1—течексатель; 2—ВПУ; 3—вентиль; 4—приставка к ПТИ; 5—манометрическая лампа термомпарная; 6—вакуумметр; 7—вакуумный насос; 8—вентиль; 9—фильтр; 10—контрольная течь; 11—пистолет-обдуватель; 12—испытуемое изделие

высока и равна  $10^{-7}$  Вт. Метод галоидных теченскателей может применяться как для определения местных утечек (способ шупа), так и для определения суммарной негерметичности (способ вакуумирования).

Кроме галоидных разрабатываются и другие типы теченскателей, основанные на различных методах обнаружения контрольных газов.

В последние годы в связи с развитием КА встали новые задачи перед испытаниями на герметичность: повышение чувствительности схем испытаний до  $10^{-13}$  ...  $10^{-15}$  Вт, увеличение производительности испытаний за счет уменьшения времени вакуумирования больших емкостей (повышения производительности откачных систем), уменьшение времени запаздывания стабильного регистрирующего сигнала выносных приборов, механизация и автоматизация испытаний на герметичность, уменьшение стоимости испытаний и повышение надежности их и т. д. Эти требования заставляют разрабатывать новые методы испытаний на герметичность.

К ним относятся химические методы контроля герметичности, основанные на химическом взаимодействии нанесенного индикаторного слоя с контрольным газом, находящимся под давлением в емкости, с образованием новых, отличных по цвету от индикаторного слоя соединений. Измеряя размеры этих пятен, можно также и количественно оценить негерметичность объекта. Чувствительность химических методов достигает  $10^{-8}$  ...  $5 \cdot 10^{-9}$  Вт. В последнее время находят применение люминесцентный метод, когда в качестве контрольной смеси применяют люминесцентные антикоррозионные жидкости на водной основе (чувствительность метода  $10^{-9}$ — $10^{-10}$  Вт); радиоактивный метод с применением радиоактивного газа и счетчиков Гейгера или специальных полупроводниковых счетчиков, чувствительность которого достигает  $10^{-13}$  Вт; метод металлической фольги, когда фольга, приклеенная к испытуемой емкости, проводит ток к индикаторным лампам, и в случае наличия утечек контрольной жидкости (вода) из-за замыкания цепи ток лампы прерывается.

## 7.7. ЗАВЕРШАЮЩИЕ ИСПЫТАНИЯ И ОПЕРАЦИИ

В общую систему испытаний баков и емкостей кроме испытаний на статическую и динамическую прочность и на герметичность входит ряд других контрольно-проверочных и испытательных работ, необходимых для обеспечения соответствия ТУ. К ним относятся следующие работы.

*Измерение массы*, которое производится взвешиванием на точных весах пустого бака. В системе испытаний может быть предусмотрено несколько взвешиваний на различных стадиях изготовления, сборки и испытаний баков. Требования по массе могут быть очень жесткими (до 0,05 кг).

*Определение объема (емкости) бака* может производиться объемным или массовым методом. При первом методе бак заливается дистиллированной водой из мерной емкости, с последующим определением количества залитой воды с точностью до 0,5 л. Чаще применяется массовый метод, когда определяется масса пустого бака ( $G_1$ ), залитого до полного объема дистиллированной водой бака ( $G_2$ ), но по этим значениям масс с учетом температуры воды подсчитывается объем бака:  $V = (G_2 - G_1) / \gamma_t$ , [л], где  $\gamma_t$  — плотность воды при температуре  $t^\circ$  С испытаний.



*Определение невыработанного остатка* производится для емкостей и баков, из которых при эксплуатации компонент подается под давлением через диафрагмы различной конструкции. Емкость располагается в определенном (имитирующем эксплуатационные условия) положении, заливается дистиллированной водой, а в полость наддува подается давление и производится слив воды (выработка) до полного прекращения слива. После сброса давления до атмосферного бак с невыработанным остатком взвешивается и по этой массе и массе сухого бака определяется невыработанный остаток. Этот показатель является одной из важнейших эксплуатационных характеристик баков и емкостей КА.

*Проверка чистоты полости баков* производится многократно в процессе различных испытаний и перед консервацией. Обычно такая проверка производится контрольным сливом спирта из проверяемой полости на батист, сложенный в 4 слоя, и визуальным контролем всех слоев на отсутствие различных механических включений, цветных пятен и т. д. После этого бак проверяется на отсутствие паров спирта.

*Сушка баков* также производится многократно в процессе различных испытаний. В настоящее время существует много способов и методов сушки: термические, радиационные с использованием инфракрасных лучей, горячим сухим воздухом под давлением  $(4 \dots 6) \cdot 10^2$  кПа. Одной из наиболее часто применяемых и надежных является термовакуумная сушка, производимая в специальной стационарной вакуумной камере, имеющей вакуумную откачную насосную систему и кольцевые электронагреватели. В камере создается вакуум порядка  $(0,2 \dots 0,4) \cdot 10^2$  кПа после помещения в нее испытываемой емкости, на которую в различных местах прикреплены несколько контрольных термодатчиков. Температура сушки порядка  $100 \dots 110^\circ \text{C}$ , время 8 ... 12 ч. Преимуществом термовакуумной сушки является удаление влаги даже из микронеплотностей стенок емкости.

После окончания всех испытаний и контроля производится консервация бака по специальной инструкции, упаковка, опломбирование, составление паспортной документации, и бак (емкость) подается на общую сборку КА.

## **Глава 8. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ**

### **8.1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ**

В конструкциях космических аппаратов трубопроводы в топливных, пневматических, масляных и других системах занимают большое место. Значительна и трудоемкость их изготовления и монтажа.

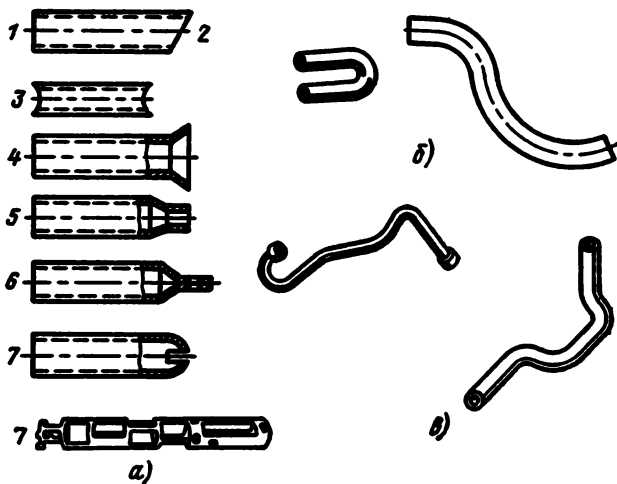


Рис. 84. Классификация трубопроводов:

*а*—прямые: 1—с прямым торцом; 2—с косым торцом; 3—с фасонным торцом; 4—с развальцованным концом; 5—с обжатым концом; 6—со сплюсненным концом; 7—с вырезами в стенках;  
*б*—изогнутые в одной плоскости; *в*—изогнутые в двух плоскостях

Требования к трубопроводам весьма высоки и включают в себя кроме прочностных и жесткостных, требования по герметичности, коррозионной стойкости, стойкости при криогенных температурах, надежности и т. д., а также по геометрической точности и шероховатости поверхности.

Материалами для трубопроводов являются алюминиевые сплавы (АМг6, АМг6Т, Д16, В95 и др.), нержавеющие стали (12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т), титановые сплавы (ОТ4, ОТ4-1, ВТ6, ВТ14), жаропрочные стали и сплавы на основе никеля (15Х18Н12С4ТЮ, ВНС-2, ХН60ВТ, ХН77ТЮР) и в некоторых случаях цветные сплавы (латунь, бронза, магниевые).

По конструкции (форме, размерам, способам заделки концов, соединениям) трубопроводы весьма разнообразны, что определяется их назначением и условиями монтажа и эксплуатации. По конфигурации трубопроводы делятся на прямые, криволинейные в одной плоскости и криволинейные в двух или нескольких плоскостях (рис. 84). Они могут быть простыми, состоящими из одного трубопровода, и составными, собираемыми из нескольких трубопроводов, с разъемными или неразъемными соединениями.

Разъемные соединения могут быть резьбовыми (соединения с помощью накидной гайки, развальцованного конца со штуцером, ниппельное соединение), муфтовыми, замковыми. Неразъемные соединения трубопроводов бывают сварными (чаще встык) или паяными (телескопически или с помощью накладного отрезка трубы — бужа). Трубы отличаются и по виду разделки концов: прямой, косой, фасонный срез, развальцованный, обжатый, сплюсненный конец. В некоторых случаях в трубах могут быть вырезы и отверстия. Все эти конструктивные особенности трубопроводов, так же как и

требования к ним, определяют технологические особенности их изготовления.

Общая схема изготовления трубопровода в значительной степени зависит от вида исходной заготовки. Наиболее распространенными видами заготовок для трубопроводов являются бесшовные стандартные трубы и листовые заготовки. Известны также методы изготовления сложных трубопроводов литьем, осаждением металлов из газовой фазы или напылением, а также намоткой из композиционных материалов, но эти методы применяются пока редко.

Общая схема изготовления трубопроводов из стандартных бесшовных труб состоит из следующих этапов: отрезка труб по заданной длине; зачистка заусенцев и очистка труб; гибка; вырезка отверстий; разделка концов; сварка или пайка трубопроводов и арматуры; зачистка после сварки или пайки; испытания; промывка, сушка, консервация.

Отрезка труб заданной длины в мелкосерийном производстве осуществляется чаще всего маятниковыми дисковыми пилами, которые позволяют получать как прямые, так и косые торцы. Точность и производительность резки ленточными пилами меньше. Производительным методом отрезки труб является отрезка их абразивными кругами (с вулканитовой связкой) со скоростями резания до 100 м/с. Абразивная отрезка обеспечивает более высокую точность и меньшие заусенцы. В единичном производстве отрезку мелких труб можно производить на токарных или револьверных станках резцами, что дает хорошую точность и качество торцов, но низкую производительность. В серийном производстве целесообразно применять специальные трубоотрезные станки типа С-246М, которые позволяют отрезать трубы диаметром до 280 мм, а также анодно-механические станки, которые обеспечивают высокую точность, отсутствие заусенцев и деформаций даже у тонкостенных труб.

После отрезки необходимо удалить образовавшиеся заусенцы вручную (в единичном производстве) или механически. Кроме того, здесь же производят очистку поверхностей труб химическими методами (обезжиривание, травление в щелочной и кислой ванне и т. д.), гидроабразивным или ультразвуковым способом (на агрегатах типа УЗА-2), что необходимо для обеспечения высокого качества при гибке.

Если в стенках трубопроводов имеются различные окна, прорези, пазы, то их изготовление производится до гибки, когда они малы по размерам и остаются на прямолинейной части трубы, а в случае крупных окон, попадающих в криволинейную часть трубы — после гибки. В мелкосерийном производстве изготовление их осуществляется на горизонтально- и вертикально-фрезерных станках пальцевыми или дисковыми фрезами. При больших объемах выпуска пазы, прорези и т. д. могут выполняться в штампах, прошиваться на электроискровых станках или получаться методом размерного химического травления.

Одной из главных формообразующих операций в изготовлении трубопроводов является гибка, сложность которой заключается в

том, что режимы и условия обработки подбираются эмпирически или по производственным РТМ в зависимости от большого числа факторов: свойств материала, размеров трубопровода, радиуса гибки и т. д. При неправильном подборе режимов и условий гибки появляется ряд отрицательных явлений: под действием возникающих напряжений наружная стенка утоняется, а внутренняя утолщается, что для труб высокого давления не допускается; внутренняя стенка под действием сжимающих напряжений после некоторого утолщения теряет устойчивость и на ней появляются складки (эти дефекты иногда приводят к разрыву стенок трубы в процессе гибки); кроме того, совместное действие растягивающих и сжимающих напряжений вызывает появление поперечной сжимающей силы, под действием которой круглое сечение трубы приобретает овальную форму. Степень деформации материала трубы при гибке определяется относительным радиусом изгиба  $\rho = R/d_{cp}$ , где  $R$  — радиус изгиба по нейтральному слою;  $d_{cp}$  — средний диаметр трубы. Чем меньше  $\rho$ , тем больше степень деформации материала и более вероятно появление указанных выше дефектов, поэтому обычно  $\rho$  принимается не менее 2,5—3.

Во избежание типовых дефектов, особенно при малых радиусах изгиба и больших диаметрах труб, гибку производят с различными наполнителями: чистый кварцевый песок с радиусом песчинок не более 2 ... 3 мм, недостатком которого является сцепление песчинок с поверхностью трубы при гибке и сложность последующего их удаления; замороженная вода, наиболее распространённый и рациональный наполнитель, которая исключает загрязнение внутренней полости труб и обеспечивает высокое качество гибки; для алюминиевых труб применяют парафин, а для стальных и титановых рекомендуется легкоплавкий сплав церробенд (сплав висмута, свинца, олова и кадмия) или сплав ПОС-50 с температурой плавления около 200° С. В некоторых случаях гибка труб производится с помощью гибких оправок, состоящих из отдельных профильных шайб с наружным радиусным пояском и прокладок, нанизанных на трос, натянутый с помощью пружинного стакана (рис. 85); иногда для этого применяется оправка, собранная из шариков, пространство между которыми в трубе заполняется маслом. В ряде случаев гибка производится с помощью подвижного внутреннего дорна, выполняющего роль подвижной внутренней оправки, препятствующей деформации трубы по сечению. Указанным целям служит также гибка труб с внутренним гидронагружением, когда один конец трубы заглушается, а другой подсоединяется к гидростенду и заполняется жидкостью или маслом под давлением до  $(1 \dots 3) \cdot 10^4$  кПа в зависимости от размеров и материала трубы.

Другим путем, позволяющим избежать типовых дефектов гибки или уменьшить их, является местный нагрев изгибаемого участка трубы пламенем газовой горелки, кольцевыми индукторами высокой частоты (ТВЧ) и т. д., рекомендуемый для высокопрочных и малопластичных материалов и при значительных диаметрах труб.

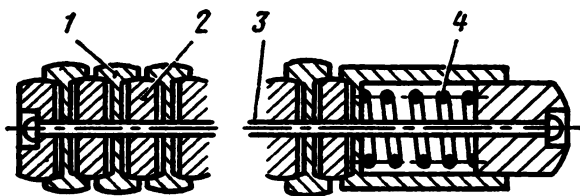


Рис. 85. Гибкая оправка:

1—шайба; 2—прокладка; 3—тросик; 4—пружина

ные ручные приспособления, которые позволяют производить гибку в различных плоскостях со сложными переходами и различными радиусами гибки; они представляют собой плиту, на которой смонтированы различные опорные и фиксирующие элементы, позволяющие точно базировать и фиксировать изгибаемую трубу на различных стадиях изготовления, а также устройства для осуществления самого процесса гибки. Гибка в приспособлениях может производиться с нагревом и с наполнителями.

При больших диаметрах более производительной является гибка труб на специальных трубогибочных станках (ТГПС-1, ТГПС-2, ТГПС-2М), которые могут производить гибку труб с гидронаполнителем или с местным нагревом труб ТВЧ и снабжены программным управлением.

Для гибки труб длиной менее 700 мм в крупносерийном и массовом производстве может применяться метод гибки-штамповки. Гибка в штампах обладает наибольшей производительностью и широкими технологическими возможностями. Недостатки: снятие труб в местах первичного контакта, необходимость нескольких штампов для гибки труб, сложность и высокая стоимость штампа.

Контроль точности геометрических форм трубопроводов после гибки производится плоскими шаблонами, специальными пространственными плазмами по прилеганию к контрольным поверхностям или с помощью эталонов трубопроводов. Разделка концов трубопроводов может производиться как до, так и после гибки. Типовыми методами разделки концов являются развальцовка, обжатие и сплющивание.

Присоединение деталей арматуры к трубопроводам обычно осуществляется неразъемными методами: сваркой или изредка пайкой. Сами детали арматуры (ниппели, штуцера, патрубки, фланцы и т. д.) изготавливаются механической обработкой общемашиностроительными методами. Арматурные детали вначале прихватываются в нескольких точках ручной аргоно-дуговой сваркой в базисных приспособлениях, после чего они поступают на сварку. Аналогично производится сварка трубопроводов друг с другом. В последнее время для соединения трубопроводов применяют пайку (индукционная бесфлюсовая монтажная пайка). Паяные соединения трубопроводов отличаются большой удельной прочностью, малой массой, технологичностью и простотой монтажа по сравнению с механическим разъемным соединением или сваркой. Отметим, что механические (болтовые) соединения трубопроводов находят ограниченное применение в топливных системах космических аппаратов вследствие трудности обеспечения необходимой герметичности. После сварки или пайки швы зачищаются, отжигаются

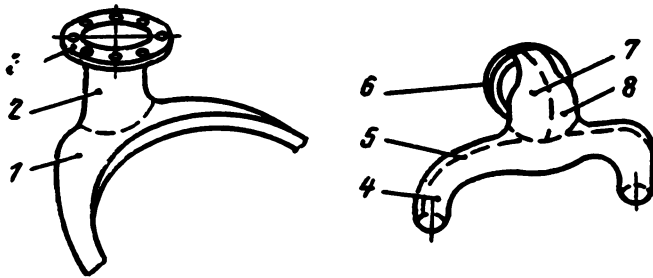


Рис. 86. Трубопроводы сложной формы:

1—фасонный коллектор; 2—патрубок; 3, 6—фланцы; 4, 5—половинки трубопроводов; 7, 8—половинки патрубка

(сварные швы) и подвергаются контролю неразрушающими методами.

После этих формообразующих операций трубопроводы поступают на контроль проходного сечения калиброванными шариками, испытания, промывку и сушку.

В конструкциях космических аппаратов довольно широкое распространение находят трубопроводы больших габаритов, сложной формы, с тонкими стенками (рис. 86), изготавливаемые из листовых заготовок штамповкой по частям с последующей сваркой. Общая схема изготовления подобных трубопроводов состоит из следующих этапов: раскрой листовых заготовок; вырубка плоских заготовок в штампах; формообразование (вытяжка, вальцовка, раскатка и т. д.) деталей; подготовка деталей под сварку; сборка и сварка трубопровода; зачистка швов; механическая доработка; промывка и сушка; контроль размеров и форм и испытания.

Особую группу составляют тоннельные трубопроводы, служащие для подачи одного компонента через емкость с другим компонентом.

*Тоннельные трубы* (рис. 87) находят применение в крупных КА длительного использования. Главной конструктивной особенностью их является наличие ряда кольцевых рифтов по ее длине. Материалами для них являются те же сплавы, что и для обычных труб топливной системы.

Заготовками для тоннельных труб чаще всего являются листы. Схема их изготовления состоит из следующих этапов: раскрой заготовки из листа по шаблону; вальцовка заготовки в трубу с образованием рифтов; механическая обработка кромок под сварку; подкатка стыковочных кромок; сварка продольного шва; зачистка и отжиг сварных швов и механическая доработка; контроль размеров; испытания.

Основной формообразующей операцией при изготовлении тоннельных труб является вальцовка заготовки в трубу с одновременным образованием кольцевых рифтов (рис. 88). Вальцовка производится в несколько переходов с промежуточным отжигом до получения полного профиля трубы в трехвалковых станах с фасонными

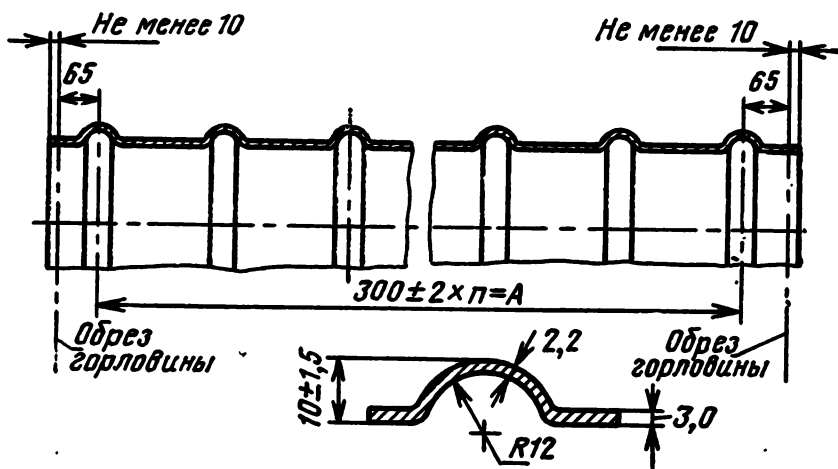


Рис. 87. Тоннельная труба

валками. Сварка продольного шва производится аргоно-дуговой сваркой с плавящимся электродом или с неплавящимся электродом с присадкой. В настоящее время тонкостенные тоннельные трубы с рифтами можно получать также из гладких труб методами гидроштамповки или импульсной штамповки (с помощью ВВ и порохов, электромагнитной штамповки и т. д.), в процессе которых происходит формообразование рифтов. Эти методы могут быть рекомендованы для высокопрочных нержавеющей и жаропрочных материалов при увеличенных толщинах трубы.

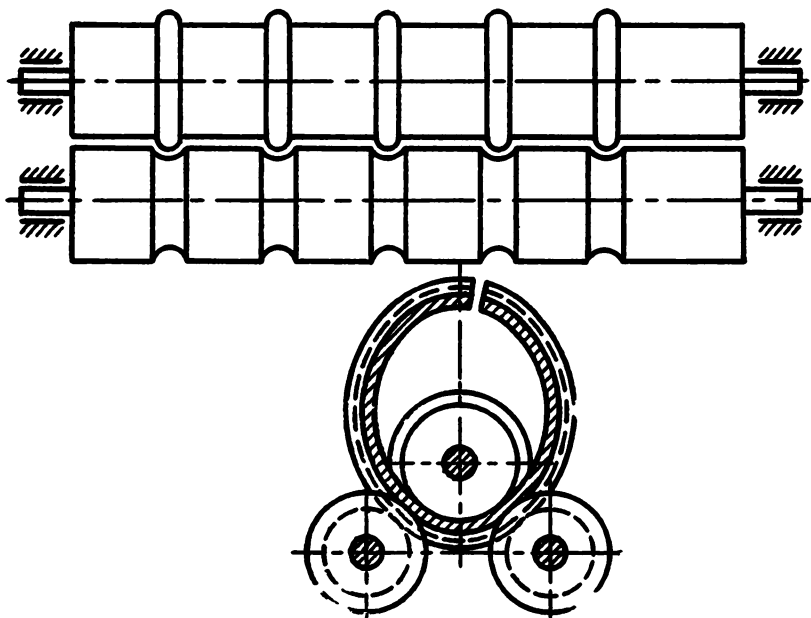


Рис. 88. Схема вальцовки тоннельных труб

## 8.2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СИЛЬФОНОВ

Оригинальную и особую группу среди трубопроводов составляют сильфоны, изготовление которых, вследствие специфичности конструкции, требований и методов, выделяется в самостоятельную технологическую проблему в производстве топливных систем летательных аппаратов.

Сильфоны, или гибкие трубопроводы (рис. 89), представляют собой тонкостенные цилиндрические или конические металлические оболочки с поперечными волнообразными складками на поверхности — гофрами, благодаря которым они имеют возможность в определенных пределах изменять длину и изгибаться. Сильфоны применяют для соединения жестких трубопроводов, имеющих угловое и осевое смещение, температурной компенсации, устранения монтажных напряжений при сборке, демпфирования вибраций, в качестве упругих элементов, реагирующих на изменение давлений или сил, упругих разграничителей сред компонентов в сильфонных вытеснительных системах топливных емкостей, сосудов переменной емкости; для герметизации подвижных соединений и др.

В летательных аппаратах встречается большое разнообразие конструкций сильфонов различных типов. Конструктивные формы сильфонов характеризуются двумя коэффициентами  $k_1 = D_n/D_v$  и  $k_2 = L/D_n$ , где  $D_n$ ,  $D_v$  — наружный и внутренний диаметры сильфона;  $L$  — длина.

На рис. 90 представлены различные типы сильфонов. *Нормальный тип сильфона* — однослойный, тонкостенный цилиндрический сильфон, у которого  $k_1 \leq 1,5$ ,  $k_2 \leq 1,3$ , наиболее распространен. *Сильфоны повышенной чувствительности* имеют меньшую толщину стенки ( $\delta \leq 0,1$  мм),  $k_1 = 1,5 \dots 2$ ,  $k_2 = 1,3 \dots 1,8$ , изготавливаются из материалов на медной основе и работают при небольших нагрузках с относительно большими деформациями. *Многослойные сильфоны* предназначены для работы при значительных нагрузках в агрессивных средах. Слои могут быть изготовлены из одинаковых или различных материалов (например, латунь—серебро). Жесткость многослойного сильфона меньше жесткости однослойного с такой же толщиной стенки. *Мембранные сильфоны* состоят из отдельных штампованных мембран, имеющих форму полугофра и соединенных по контуру сваркой или пайкой. Обычно они имеют большую чувствительность и малую жесткость, обладают стабильными линейными характеристиками при сжатии и растяжении и значительной циклической прочностью. *Бронированные (усиленные) сильфоны* предназначены для работы при значительных давлениях компонента, они могут быть с внешней и внутренней бронировкой. При внешней бронировке снаружи между гофрами располагаются кольца, внутренний контур которых соответствует наружному контуру гофров. Бронированные сильфоны выдерживают в три раза большее давление, чем тот же сильфон без бронировки. При внутренней бронировке в вер-

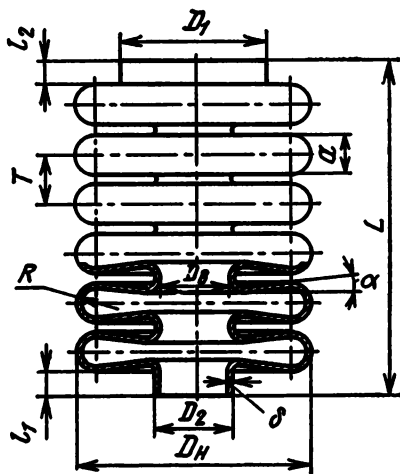


Рис. 89. Типовая конструкция сильфона:

$D_n$  — наружный диаметр сильфона;  
 $D_v$  — внутренний диаметр сильфона;  
 $D_1$  и  $D_2$  — диаметры заделок;  $l_1$  и  $l_2$  — длины заделок;  $R$  — радиус закругления гофра;  $T$  — шаг гофра;  $\alpha$  — угол уплотнения;  $\delta$  — толщина стенки;  $a$  — толщина гофра;  $L$  — общая длина сильфона



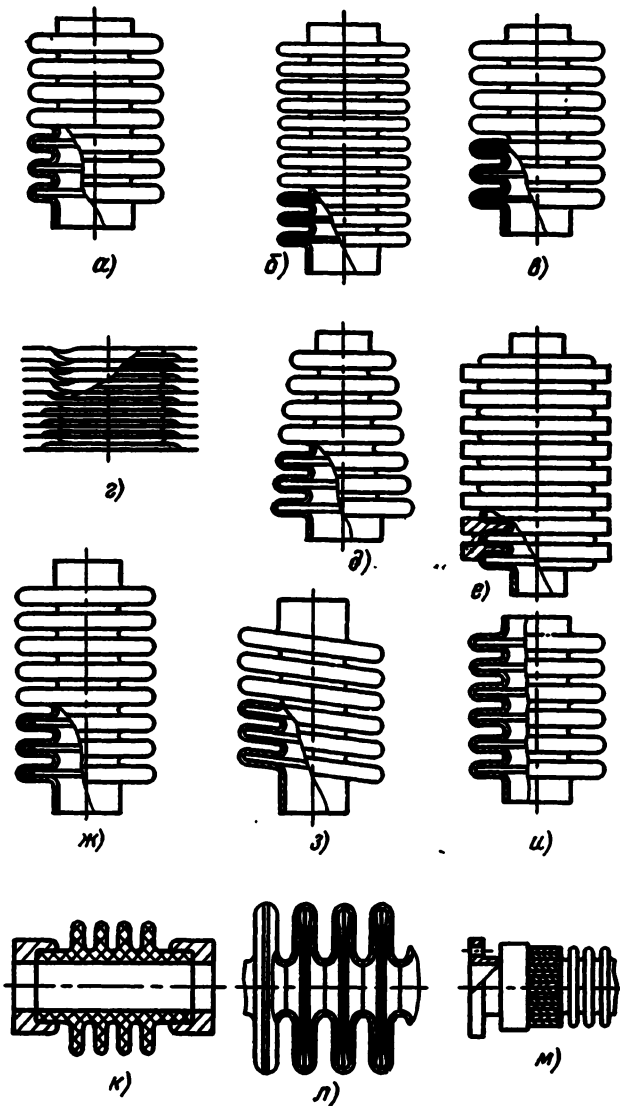


Рис. 90. Типы сифонов:

*а*—нормальный тип; *б*—повышенной чувствительности; *в*—многослойный; *г*—мембранный; *д*—с переменным диаметром гофр; *е*—с внешней бронировкой; *ж*—с внутренней бронировкой; *з*—спиральный, *и*—с переменной толщиной стенки; *к*—обрезиненный; *л*—штампо-сварной; *м*—с оплеткой

шине гофров изнутри вкладываются разрезные упругие кольца, препятствующие их деформации. Они выдерживают в два раза большее давление, чем сифоны без бронировки. Частным случаем внешней бронировки является внешняя оплетка, предохраняющая сифон от радиальной деформации и разрушения, сохраняя гибкость его. *Обрезиненный сифон* на внутренней поверхности имеет резиновое покрытие, которое служит для эффективного демпфирования вибраций и, имея гладкую внутреннюю поверхность, предотвращает образование различных завихрений при протекании компонента и уменьшает гидравлические потери. *Спиральные сифоны* имеют винтовую форму гофров, изготовленных шнековым способом. У таких сифонов обычно  $k_1 = 1,1$ , но значение  $k_2$  может быть весьма значитель-

ным, поэтому они применяются как гибкие соединения большой длины. *Штампованные сварные сиффоны* состоят из предварительно отштампованных и сваренных между собою полугофров. Обычно они имеют большие габариты, достигающие до 1,5 ... 2 м и в отличие от мембранных значительные толщины стенок ( $\delta \leq 1$  мм). *Сиффоны с переменным диаметром гофров* (конические, параболические, гиперболические и т. д.) предназначены для получения криволинейной (по определенному закону) характеристики прогиба от нагрузки. Аналогичным целям служат и *сиффоны с переменной толщиной стенок*, которые изготавливаются из трубчатых заготовок со стенками переменной толщины.

Конструктивной характеристикой сиффонов является также и форма заделок сиффонов для соединения их с арматурой, которые могут быть по внутреннему, внешнему диаметру гофров, по поверхности гофров, а иногда сиффон вообще может заканчиваться дном.

Материалы для сиффонов должны обладать высокой пластичностью, позволяющей провести операции вытяжки и формообразования гофров, достаточной прочностью и упругостью при низких и высоких температурах, устойчивостью против агрессивных компонентов, плотностью структуры для обеспечения герметичности, усталостной прочностью для работы в условиях знакопеременных нагрузок, а также хорошей свариваемостью или паяемостью. Наиболее распространенным материалом для сиффонов КА является закаленная нержавеющая сталь (12X18H9T или 12X18H10T), обладающая почти всеми вышеперечисленными свойствами. Сиффоны из этой стали могут работать в интервале температур от  $-194$  до  $400^\circ\text{C}$ . Распространенным материалом для сиффонов является также латунь Л80 (полутомпак), которая в отожженном состоянии обладает большинством требуемых свойств, а также невысокой стоимостью. Латунные сиффоны могут работать в интервале температур от  $-60$  до  $100^\circ\text{C}$ . Латунь плохо противостоит воздействию агрессивных сред. Для изготовления сиффонов применяются также бериллиевые бронзы (Бр2,0; Бр2,5; БНТ1,7; БНТ1,9), они работают при температурах от  $-60$  до  $150^\circ\text{C}$ . Для сиффонов применяются также никелевые жаропрочные сплавы, жаропрочные и жаростойкие стали, титановые, алюминиевые сплавы и т. д. Находят применение и неметаллические материалы (фторопласт, тетрафторэтилен). Для двухслойных сиффонов применяются серебро, нержавеющая сталь, никелевые сплавы и др.

Заготовки для сиффонов наиболее часто служат тонкостенные бесшовные трубы, которые получают многопереходной глубокой вытяжкой из листа с последующей протяжкой стакана с утонением стенок; комбинированным способом, состоящим из сочетания выдавливания стакана из листа и последующей протяжки ее с утонением стенок; раскаткой вращающейся шариковой головкой, которая является наиболее производительным методом.

Методы изготовления сиффонов определяются главным образом методом получения гофров из заготовки.

*Механический метод.* Формообразование гофров производится раскаткой заготовок трубы роликами, при которой металл течет как внутрь, так и наружу трубы. Формообразование производится в две операции. В первой осуществляется разметка шага сиффона по длине трубы путем образования кольцевых рифтов на специальном станке. Во второй — окончательное формообразование гофров металлическими роликами, постепенно перемещающимися перпендикулярно оси сиф-

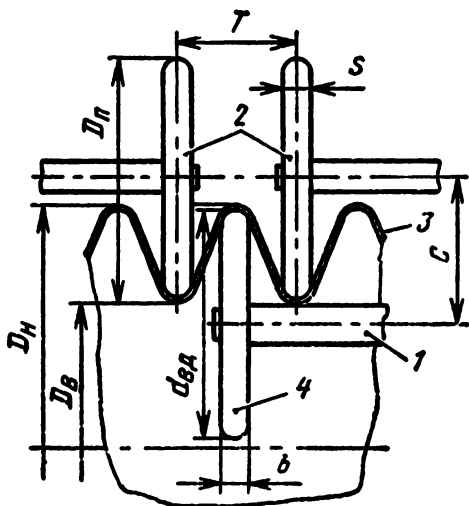


Рис. 91. Схема формообразования гофров:

1—шпindel; 2—поддерживающие ролики; 3—заготовка; T—шаг между гофрами;  $D_n$ —диаметр поддерживающих роликов;  $d_{вд}$ —диаметр ведущего ролика; S—толщина поддерживающего ролика; c—расстояние между осями роликов;  $D_n$  и  $D_v$ —наружный и внутренний диаметры ведущего ролика; b—толщина заготовки

возможность перемещаться по направляющим осям. Под действием внутреннего давления и силы осевого сжатия, создаваемой медленно перемещающейся торцевой колодкой, происходит постепенное формование гофров в пространстве между формирующими дисками, имеющими профиль, аналогичный профилю гофров. На специальных станках типа ГУС или ОУ-30 гидроформовка гофров сильфонов может получаться в одну операцию без предварительной накатки рифтов (гидравлический метод). Преимуществами гидравлического метода является высокая производительность, незначительное утонение стенок.

**Метод прессования резиной.** Формообразование гофров производится в раздвижной секционной матрице прессованием резиной (рис. 93). Матрица, состоящая из трех или четырех секций, имеет на внутренней полости кольцевые выточки по форме гофров. Внутри заготовки вставляется цилиндрический резиновый элемент, на который при опускании давит пуансон. Под давлением рабочего тела — резины — стенки трубчатой заготовки деформируются по форме выточек матрицы. Удельное давление резины для обеспечения пластического деформирования достигает  $(2 \dots 3) \cdot 10^4$  кПа. Метод формования резиной достаточно производителен и эффективен и при серийном производстве, однако утонение стенок достигает 15%; кроме того, подготовка производства из-за необходимости изготовления разъемных матриц для каждого типоразмера сильфонов удлинняется и удорожается.

**Метод гидрорезиноформовки** является сочетанием предыдущих двух методов, исключая некоторые их недостатки. Суть его состоит в том, что формообразование гофров производится эластично-жидкостным пуансоном: резиновой формой, наполняемой жидкостью под давлением. Этим методом можно производить одновременное формование всего сильфона или последовательное формование гофров по одному с перемещением заготовки.

**Штампо-сварной метод.** Из листовых заготовок, раскроенных предварительно по шаблонам, штампуются полугофры, которые после очистки, обезжиривания и

фона; заготовка получает вращение от шпинделя (рис. 91). Раскатка производится в несколько переходов с промежуточными отжигами для снятия наклепа. В процессе раскатки заменяются ролики и уменьшается расстояние между ними, что обеспечивает окончательное формование гофров за счет постепенного уменьшения длины трубы и некоторого утонения по вершинам гофров. Механическим методом можно получить сильфоны из сварных труб. Преимуществом метода является также возможность изготовления на одном станке путем замены роликов и простой переналадки большой номенклатуры типоразмеров сильфонов. Недостатками этого метода являются большая трудоемкость и утонение стенок по вершинам гофров на 40 ... 50%.

**Гидравлический (механогидравлический) метод.** Заготовкой является бесшовная тонкостенная труба. Формообразование гофров выполняется в две операции. В первой (механической) производится накатка кольцевых гофров роликом по оправке, имеющей кольцевые канавки, на которую устанавливается заготовка (рис. 92). Во второй заготовка устанавливается в специальном устройстве и заполняется жидкостью под давлением, зависящим от толщины трубы, материала и размеров сильфона и подбираемым опытным путем. Формирующие диски, выполняющие роль матриц, имеют

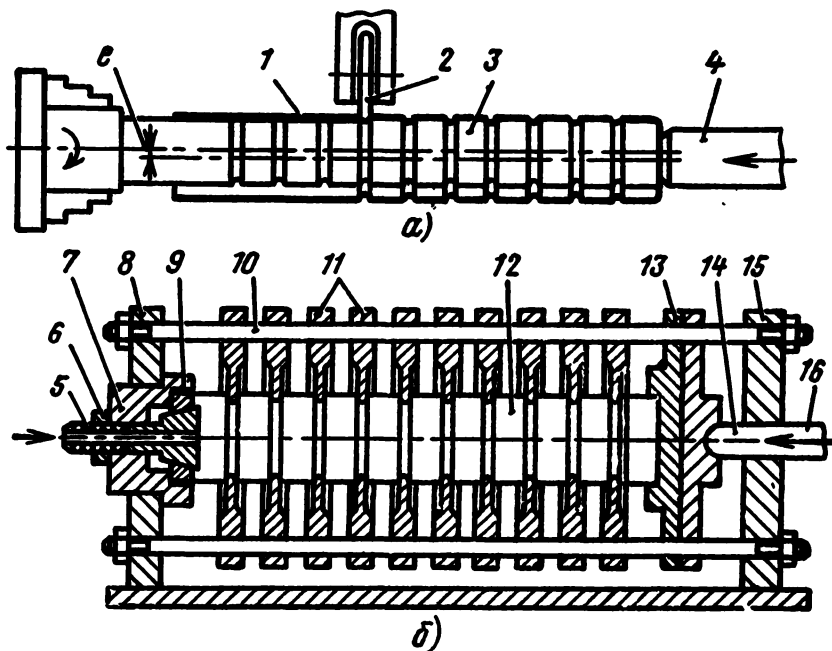


Рис. 92. Формование гофров сифонов:

*a*—предварительная накатка; *б*—формование гофров; 1—заготовка; 2—ролик; 3—оправка; 4—прижимы; 5—штуцер подвода жидкости; 6—гайка; 7—втулка; 8, 15—стойки; 9—захват; 10—скалка; 11—формирующие диски; 12—заготовка сифона; 13—колодка; 14—шток; 16—гидропривод

подготовки, собираются в специальном приспособлении, прихватываются в нескольких точках, и на специальных вращающихся станках свариваются по большому и малому диаметрам. В некоторых случаях для соединения полугофров применяют пайку. Метод применяется для изготовления крупных сифонов с утолщенными стенками, когда применение других методов неэффективно, а также для изготовления мембранных сифонов. Метод отличается простотой, широкими технологическими возможностями, но наличие сварных швов, а также трудоемкость подготовки производства являются его недостатками.

После формообразования гофров сифоны проходят отжиг, механическую обработку торцов и кромок, промывку, сушку, очистку по специальной технологии и поступают на сборку с арматурой.

Сборка и соединение сифонов с арматурой — существенный этап технологического процесса изготовления сифонов, так как качество их исполнения определяет герметичность, прочность и виброустойчивость магистралей топливных, пневматических и других систем КА. Методы соединения и

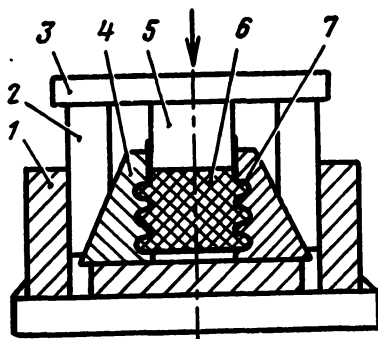


Рис. 93. Формование гофров резиной:

1—основание штампа; 2—клинья; 3—верхняя плита; 4—разъемная матрица; 5—пуансон; 6—резины; 7—сифон

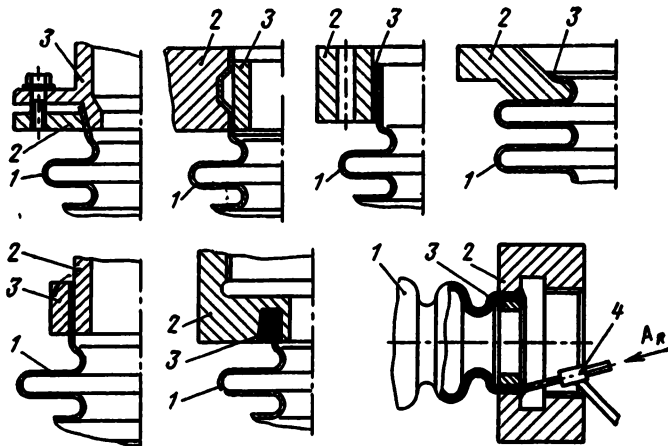


Рис. 94. Методы соединения сильфонов с арматурой:  
 1—сильфон; 2—арматура; 3—прижим (припой); 4—сварочная головка

монтажа должны быть простыми, надежными, технологически стабильными, исключаящими монтажные напряжения в трубах и сильфонах. В зависимости от конструкции и условий эксплуатации методы соединения сильфонов с арматурой могут быть различными (рис. 94).

Механическое (винтовое) соединение с защемлением стенки сильфона позволяет производить разборку сильфонного узла. Герметизация может быть обеспечена пайкой. Соединение пайкой твердыми или мягкими припоями обеспечивает герметичность, но они применимы для определенных материалов (латунь, бериллиевая бронза и т. д.). Пайка не применима для материалов, у которых высокая температура пайки может вызвать разупрочнение. Скрепление бандажами (посадка колец на заделку сильфона в нагретом состоянии) обеспечивает плотное и прочное соединение. Соединение заливкой легкоплавкими сплавами, расширяющимися при остывании, аналогично пайке низкотемпературными припоями; они рекомендуются для малонагруженных узлов, работающих при низких температурах. Соединения различными методами сварки (роликовой, короткоимпульсной, аргоно-дуговой, ультразвуковой и т. д.) могут быть оформлены конструктивно по-разному. Эти соединения обеспечивают наибольшую герметичность и прочность узлов, они технологичны, импульсная и ультразвуковая сварка применимы для любых сочетаний материалов, поэтому сварные соединения находят наибольшее распространение в конструкциях КА.

### 8.3. КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ И СИЛЬФОНОВ

Программа контроля и испытаний содержит значительное количество этапов. *Визуальный осмотр трубопроводов и сильфонов*, на поверхности которых не должно быть трещин, рисок, забоин, вмятин и т. д., является начальным этапом. *Контроль геометрических размеров* на соответствие ТУ производится универсальными средствами, а также с помощью специальных контрольных приспособлений и плоских и пространственных шаблонов и плазов. Особому контролю подвергаются монтажные поверхности и эксплуа-

тационные размеры. *Контроль качества сварки или пайки* производится методами рентгено- и ультразвукового контроля, токовихревым и др. *Взвешивание, контроль чистоты внутренних полостей, измерение емкости* и т. д. производится по специальным методам.

Значительное место занимают *прочностные испытания*. Испытания на *статическую прочность* проводятся гидравлическим методом, аналогично бакам, но давление испытания в трубопроводах принимают в два раза выше рабочего. Часть трубопроводов от партии испытывается до разрушения. *Динамические испытания* трубопроводов и сильфонов включают вибрационные испытания в трех плоскостях с заданными перегрузками (до 60 ... 70 g) и с заданным спектром частот (от 5 до 100 Гц), испытания на гидравлический удар, испытания на повторные (10 ... 15 раз) ударные нагрузки с перегрузкой до 100 g, усталостные (циклические) испытания на знакопеременные нагрузки (до 1500 циклов). При динамических испытаниях часть трубопроводов также испытывается до разрушения (испытания на долговечность). Прочностные испытания предшествуют *испытаниям на герметичность*, которые проводятся или по методу аквариума, или методом избыточных давлений с гелиевыми смесями с применением течеискателей ПТИ-7. Все сложные трубопроводы и сильфоны должны быть подвергнуты *проливкам* водой с целью определения величины гидравлического сопротивления на специальных проливочных стендах. Специфическим испытанием является определение жесткости сильфонов, когда сильфон, закрепленный в приспособлении, сжимается под давлением последовательно устанавливаемых грузов, а деформация его фиксируется после каждого нагружения индикатором. По результатам повторных испытаний составляется график кривой жесткости сильфона.

После испытаний трубопроводы подвергаются очистке, промывке, обезжириванию, сушке. В некоторых случаях поверхности трубопроводов подвергаются окраске специальными эмалями с помощью пульверизаторов, в электростатическом поле и др. и сушке различными методами (термическими, струей горячего газа, инфракрасными лучами и т. д.).

## **Глава 9. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЯ РДТТ**

### **9.1. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МАТЕРИАЛЫ**

Несмотря на единую конструктивную схему твердотопливных двигателей существует большое разнообразие конструкций РДТТ различного назначения с тягами от сотых долей ньютона до тысяч

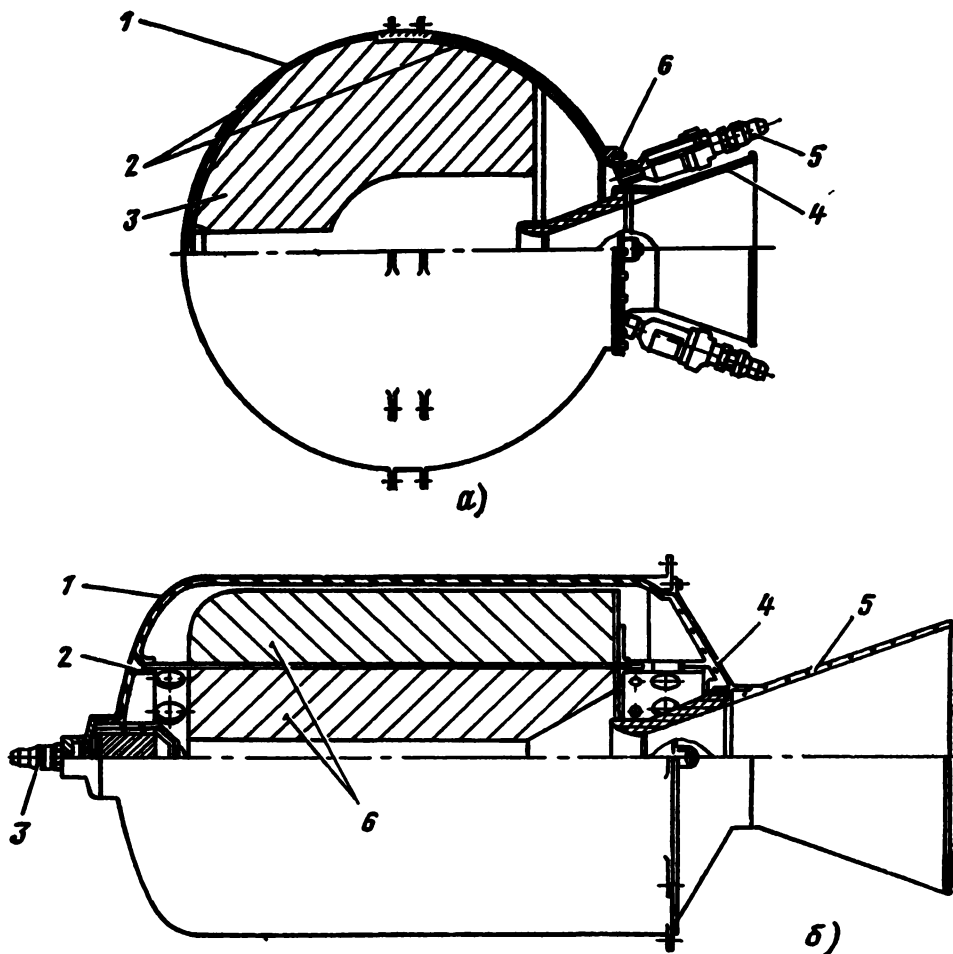


Рис. 95. Конструкция РДТЦ:

*а*—сферический со скрепленным со стенками камеры сгорания зарядом: 1—оболочка, 2—теплоизоляция; 3—твердое топливо; 4—сопло; 5—воспламенитель; 6—задняя крышка; *б*—с цилиндрическим вкладным зарядом: 1—оболочка; 2—опорный прилив; 3—воспламенитель; 4—задняя крышка; 5—сопло; 6—твердое топливо

килоньютон. С конструктивно-технологической точки зрения их можно классифицировать по габаритам (крупные, средние, малые); по форме камер сгорания, или корпусов (цилиндрические, сферические); по способу крепления снаряженного твердого топлива (со свободным, вкладным топливным зарядом, когда между толсто-стенным корпусом и зарядом имеется зазор и крепление заряда производится с помощью диафрагм, решеток, перегородок, и со связанным топливным зарядом, когда тонкостенный корпус по внутренней поверхности связан с топливным зарядом, что достигается заливкой заряда в жидком состоянии); по месту расположения сопла в корпусе (с внешним, частично или полностью утопленным

соплом); по применяемым материалам для корпуса (металлические — стальные, титановые, алюминиевые и т. д. и неметаллические — стеклопластиковые) и для сопла; по конструкции корпуса (монокорпусные и сборные) и по ряду других признаков (рис. 95).

Двигатели, принадлежащие к различным классификационным группам, значительно отличаются по конструкции и составу. Тем не менее для всех конструкций РДТТ можно отметить основные характерные детали и элементы, выполняющие одинаковые функции, хотя в конкретных конструкциях эти детали могут отличаться довольно существенно. К таким характерным деталям и узлам РДТТ относятся: корпуса (оболочки), днища (переднее, заднее), стыковочные шпангоуты, служащие для соединения с хвостовой юбкой и корпусом, диафрагмы (перегородки, решетки, колосники), сопла, которые могут представлять собой собранный из отдельных элементов узел, вкладыши сопел, теплозащитные покрытия, внешние теплозащитные покрытия и противометеорные экраны, ряд мелких деталей, служащих для монтажа и крепления (кронштейны, уголки), само топливо, воспламенители. В некоторых конструкциях отдельные детали могут быть развиты в узлы, состоящие из более простых деталей.

С точки зрения материалов корпусов различают металлические и неметаллические РДТТ. Для металлических корпусов наиболее часто применяют нержавеющие и высоколегированные стали типа Х18Н9Т и титановые сплавы; для мелких корпусов, изготовленных заодно с соплом, применяют тугоплавкие сплавы на основе вольфрама, в некоторых случаях применяют алюминиевые сплавы (в виде сотовых конструкций). Для неметаллических корпусов РДТТ наиболее распространенным материалом являются стеклопластики, начинают применять также другие композиционные материалы (на основе борвольфрамовых и углеграфитовых волокон). Для днищ и стыковочных шпангоутов используют те же сплавы, что и для оболочек, во избежание дополнительных тепловых напряжений. Применение титановых и неметаллических материалов для РДТТ обеспечивает выигрыш в массе по сравнению со стальными до 30% и более высокую устойчивость против коррозии.

## 9.2. ОБЩАЯ СХЕМА ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Для наиболее распространенной и характерной сборной конструкции двигателя с металлическим или стеклопластиковым корпусом, когда все или почти все названные выше детали изготавливаются отдельно, общая схема состоит из следующих этапов: изготовление металлического или стеклопластикового корпуса (обечайки); переднего днища (в стеклопластиковых корпусах часто изготавливается совместно с обечайкой); заднего днища и соплового блока, поступающего на сборку в сборе; сборка переднего днища с корпусом; подготовка внутренней поверхности корпуса под теплозащитное покрытие; нанесение теплозащитного покрытия; нанесение подложки под топливо и ее полимеризация; заливка топливной



массы в корпус; полимеризация топлива; установка соплового блока с задним днищем; контроль и испытания двигателя; консервация и укупорка. Кроме названных в общей схеме имеются этапы контроля, измерений и испытаний.

### 9.3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОРПУСОВ

*Металлические корпуса РДТТ.* Конструкция их состоит из обечайки, днищ, стыковочных шпангоутов и различных соединительных и монтажных деталей (кронштейны, уголки и т. д.). Обечайки и днища могут иметь отверстия, окна, ребра и другие местные усложнения.

Обечайки, являющиеся несущим элементом, изготавливаются способами, применяемыми при изготовлении типовых корпусов КА. Наиболее часто применяются две схемы изготовления в зависимости от исходной заготовки. В первом случае заготовкой является стандартный катаный лист, и процесс изготовления состоит из следующих этапов: разрезка листа; обработка кромок; вальцовка в цилиндрическую форму; продольная сварка в несколько проходов; отжиг и зачистка швов; контроль швов; гидравлическая раздача обечайки; механическая обработка стыковочных поверхностей; приварка фланцев, изготавливаемых отдельно механической обработкой; термообработка; контроль размеров; окончательная доработка; гидроиспытания и окончательный контроль размеров. В результате такой схемы получается обечайка, имеющая как продольный, так и кольцевые швы, что является их недостатком. Во втором случае в качестве заготовок применяется бесшовная труба, которая подвергается раскатке (ротационной обработке), позволяющей получить утолщения на концах обечайки для фланцев под стыковку с днищами; соответственно изменяются начальные этапы приведенной схемы изготовления. Заготовка для бесшовной обечайки может также получаться глубокой вытяжкой или другими способами. Механическая обработка бесшовной трубчатой заготовки включает хонингование внутренней и обточку наружной поверхности на специальных оправках во избежание деформации заготовки. Вторая схема изготовления, обеспечивающая получение бесшовных обечайек корпусов, более предпочтительна.

В технологии изготовления обечаек значительное место по трудоемкости занимают операции неразрушающего контроля швов и изготовление местных усложнений форм механической обработкой и сваркой. У крупных РДТТ обечайки состоят из отдельных кольцевых секций, соединение которых производится кольцевой сваркой или механическим способом. Сферические корпуса РДТТ изготавливаются сваркой из двух полусферических днищ, имеющих различные окна и усложнения формы и получаемых штамповкой или обкаткой из листовых заготовок или другим способом.

Днища корпусов могут быть различной формы (сферической, эллипсоидной и т. д.). Формообразование их может производиться штамповкой, ротационным выдавливанием, в случае крупных

размеров штамповкой клиновидных (сегментных) листов с последующей сваркой и калибровкой, взрывной штамповкой и т. д. Типичным для днищ корпусов РДТТ является необходимость механической обработки стыковочных поверхностей под соединение с обечайкой или сложным стыковочным шпангоутом, различных отверстий для установки воспламенителей и т. д. Как и обечайки, днища подвергаются тщательному контролю и испытаниям (особенно при наличии сварных швов). Иногда на днища наносится теплозащитное покрытие. Сборка с обечайкой производится или сваркой через шпангоут, или механическим способом; последнее особенно относится к заднему (сопловому) днищу. Применяемые шпангоуты, могут иметь сложную форму сечения, обеспечивающую также приварку цилиндрической или конической юбки. После сборки обечайки с передним днищем и приварки мелких установочных и монтажных деталей корпус подвергается контролю и гидростатическим испытаниям. Давление испытаний должно превышать на 10 ... 15% максимальное давление в двигателе. При наличии значительного количества сварных швов проводятся виброиспытания.

После контроля и испытаний корпуса поступают на операции подготовки под нанесение теплоизоляционных покрытий (очистка, обезжиривание, промывка в щелочных и кислых ваннах и т. д.). В качестве теплоизоляционных обычно применяются асбесто-полимерные (например, акрило-нитриловый каучук, наполненный асбестом) или другие композиционные материалы, имеющие малую теплопроводность, способность склеиваться с корпусом, небольшую скорость эрозии при работе двигателя. Толщина теплоизоляционного слоя зависит от распределения температур и свойств изоляции и может быть в пределах от 10 ... 15 до 70 ... 80 мм в наиболее напряженных зонах (переднее днище и заднее днище на участке входа в сопловую часть). После подготовки стенки на нее наносится клеевое связующее для приклейки изоляционного слоя.

Теплоизоляция может изготавливаться прессованием с последующей полимеризацией в виде полуцилиндров или профилированных секций (полос), предназначенных для укладки по всей поверхности обечайки корпуса. После установки секций теплоизоляции в корпусе с помощью специальных гидравлических или пневматических приспособлений они прижимаются к стенкам, иногда для создания более плотного прилегания секций к стенкам под ними (секциями) создается вакуум, связующее отверждается и секция изоляции приклеивается. Стыки изоляционных секций, особенно на внутренней поверхности днища, где они имеют форму клиньев, заполняются специальной изолирующей смесью, схватывающейся после застывания с основным теплоизолирующим покрытием. Иногда покрытие осуществляют в несколько слоев с несовпадающими стыками. После полной полимеризации поверхность изоляционного покрытия полируется, торец корпуса со стороны соплового днища подрезается и подготавливается для стыковки с теплоизоляцией соплового днища.

Наряду с металлическими в КА находят применение и *неметаллические корпуса РДТТ* из композиционных материалов: стеклопластиков, углепластиков, боропластиков и др. Изготовление таких корпусов производится методом намотки соответствующих волокон, выполняющих роль несущего наполнителя, пропитанных различными смолами на специальные легкоудаляемые оправки. Преимуществами таких корпусов являются выигрыш в массе, отсутствие коррозии, меньшая теплопроводность, что позволяет уменьшить толщину теплозащитного слоя.

В настоящее время используются два метода нанесения смолы на волокна: мокрый, когда связующая смола наносится непосредственно на уложенную ровницу в процессе намотки, и сухой (метод пре-прегов), когда волокна пропитываются смолой до намотки. Преимуществами второго метода являются возможность хранения подготовленных пре-прегов, упрощение станков для намотки, возможность использования смолы с высокой вязкостью; недостатки: наличие дополнительной предварительной операции пропитки волокон, большая стоимость, необходимость особых условий (температура не ниже 5° С и небольшая влажность) для хранения пропитанных волокон.

Методом намотки можно изготовить цилиндрические обечайки, корпуса двигателей заодно с передним днищем, сферические корпуса и отдельно днища. В последние годы в связи с развитием методов расчета композиционных емкостей, технологии их изготовления, разработкой методов конструктивного соединения композиционных деталей и выпуском технологического оборудования применение неметаллических корпусов в летательных аппаратах расширяется, в том числе и для крупных РДТТ. В некоторых случаях на оправку наносится теплоизоляция, на которую после отверждения производится намотка нити наполнителя; после отверждения корпуса и вымывания оправки теплоизоляция остается на стенке корпуса. Оправки, применяемые в этом случае, изготавливаются из смеси песка и поливиниловых спиртов заливкой в подготовленные формы. Для изготовления крупных корпусов могут применяться облегченные оправки, собираемые из отдельных элементов и позволяющие после намотки разбирать и извлекать их из готового корпуса по элементам. Отметим, что контроль сплошности неметаллических корпусов представляет значительные трудности, и для надежности применяются сочетания различных методов неразрушающего контроля: рентгенография, ультразвуковой контроль, инфракрасный метод контроля, суть которого состоит в нагреве до небольшой температуры композиционного корпуса и регистрации инфракрасного излучения: в местах дефектов значение излучения меняется, что регистрируется аппаратурой. После полимеризации неметаллического корпуса схема дальнейшего изготовления до заливки топливного заряда схожа с металлическими корпусами.

Наряду с рассмотренными в последнее время находит применение ряд новых, принципиально отличных от рассмотренных, методов изготовления корпусов РДТТ. Одним из них является изго-

товление монолитных корпусов электролитическим осаждением высокопрочного металла на подготовленные основы. Схема изготовления корпусов этим методом состоит из следующих этапов: в специальной форме отливается топливный заряд; после застывания и отверждения заряда на него накладывается теплозащитная каучуко-асбестовая или резино-асбестовая прокладка; к топливному заряду присоединяется внутренняя теплоизоляция переднего днища и теплоизоляция заднего днища, выполненная заодно с абляционным защитным элементом сопла; на топливный заряд наносится защитное покрытие для предохранения его от влаги в электролите; далее на полученную таким образом заготовку наносится специальное металлическое покрытие, создающее катодную полярность полученной сборки, выполняющей роль подложки для электролитического осаждения. Далее выполняется обычная операция электролитического осаждения, например, никеля или другого высокопрочного металла, со скоростью осаждения 0,08 ... 0,1 мм/ч. В результате получается монолитный корпус РДТТ, выполненный заодно с сопловым блоком и передним днищем. Этот метод изготовления РДТТ позволяет значительно снизить массу (на 12 ... 15%), повысить надежность и прочность корпуса и снизить стоимость изготовления за счет резкого сокращения количества технологической оснастки, снижения, а во многих случаях полного исключения механической обработки. Метод эффективен при изготовлении монолитных корпусов РДТТ для систем управления и стабилизации космических аппаратов.

Более производительным и перспективным методом получения корпусов двигателей, выполненных заодно с сопловой частью, из тугоплавких и высокопрочных материалов является разработанный в последнее время метод химического осаждения этих металлов из газовой фазы. Суть его состоит в осаждении на специальную подложку, выполненную в форме корпуса с сопловой частью без переднего днища и нагретую до температуры 400 ... 700° С, материала корпуса (вольфрам, молибден, рений, ниобий и т. д.) из подобранной смеси газов, содержащей соединения осаждаемого металла, при ее пропускании с определенной скоростью через полость подложки. В этом случае в результате осаждения металла, последний наращивается изнутри. Толщина осажденного металла может быть от 0,3 ... 0,5 (в этом случае он выполняет роль теплостойкого покрытия) до 10 ... 12 мм, когда после удаления механической обработкой наружного подложечного слоя остается корпус из осажденного металла. Преимуществом этого метода является возможность осаждения металла практически на любую подложку (углепластик, графит, керамика и т. д.), которая может быть или удалена после операции осаждения, или оставлена в виде наружного несущего слоя корпуса.

Другим методом получения монолитных корпусов из тугоплавких металлов, начинающим получать распространение, является метод, основанный на физическом осаждении металла на подложке в форме корпуса двигателя,— плазменное напыление. Этот метод

получил широкое распространение для получения жаропрочных и жаростойких покрытий в сопловых блоках двигателей, но он разработан и как метод получения монолитных корпусов, причем плазменное напыление может производиться как с наружной, на соответствующим образом подготовленную подложку (в случае малых корпусов), так и с внутренней стороны (в случае больших диаметров) тонкостенной подложки.

Все изготовленные корпуса РДТТ проходят гидростатические испытания на специальных стендах под давлением, на 10 ... 15% превышающим ожидаемое максимальное давление в камере сгорания, при этом в технологии испытаний нужно учитывать, что для некоторых ТЗП и стеклопластиков контакт с водой не допускается.

#### 9.4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СОПЕЛ

Сопловые блоки РДТТ представляют сложную составную конструкцию; простые монолитные, состоящие из одной детали, сопловые блоки встречаются реже; в этом случае они обычно изготавливаются из жаропрочного и тугоплавкого материала (вольфрама, молибдена) методами механической обработки, осаждения из газовой фазы, электролитического осаждения, плазменным напылением с последующей механической доработкой. Такие блоки предназначены обычно для двигателей небольшой тяги с малым сроком работы.

Несмотря на большое разнообразие конструкций сопловых блоков РДТТ, можно выделить в них типовые характерные элементы, основными из которых являются (рис. 96): несущий внешний корпус, иногда изготавливаемый из отдельных обечаек; внутренние, теплозащитные, аблирующие элементы (вкладыши), которых по длине сопла может быть несколько (до 5 и более); стыковочные шпангоуты с элементами днища, иногда вместо них шарнирное поворотное устройство для подвески поворотных сопел; внешние теплозащитные и противометеорные экраны; кроме того, в блоках имеются различные герметизирующие резиновые кольца, установочные детали, элементы системы управления вектором тяги и т. д.

По конструкции сборки с корпусом сопла могут быть утопленными, частично утопленными и неутопленными. Хотя масса сопла увеличивается с увеличением его глубины погружения (эта глубина составляет обычно от 0 до 50%), но общие характеристики двигателя улучшаются за счет уменьшения габаритов и компактности конструкции.

Детали шарнирной подвески соплового блока изготавливаются механическим способом с высокой точностью из жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов с тем, чтобы обеспе-

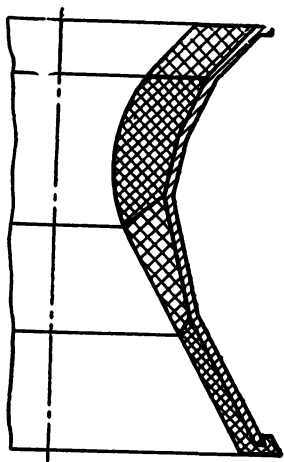


Рис. 96. Конструкция соплового блока РДТТ

чивалась высокая температурная стойкость узла подвески и надежная герметичность (для этого необходимы герметизирующие кольцевые прокладки). Конструкция должна обеспечивать возможность регулирования затяжки шарнирной подвески.

Несущая силовая часть сопла (корпус) может быть изготовлена из металлических, композиционных (стеклопластик) или сотовых материалов.

Металлические корпуса сопел (сталь, иногда алюминиевые сплавы) применяются для сопел небольших и средних размеров или для зоны критического сечения крупных сопел. Преимущества их: высокая прочность, жесткость, надежность конструкции и относительная простота изготовления. Недостатки: возможность коррозии и окисления, большая масса. Изготовление металлических корпусов в зависимости от размеров и формы может производиться механической обработкой; раскаткой из трубчатых заготовок, получаемых вытяжкой; вальцовкой из листовых заготовок и продольной сваркой; осаждением из газовой фазы с последующим механическим удалением материала подложки.

Композиционные (стеклопластиковые или углепластиковые) корпуса сопел получают намоткой. Преимуществами их являются высокая прочность и малая масса. В такие корпуса часто в процессе намотки заделываются металлические детали, служащие для соединения с другими элементами соплового блока. Схема их изготовления отличается от металлических: намотка ведется обычно на теплоизоляционную облицовку, предварительно собранную на специальных вымываемых оправках. Отметим, что при изготовлении стеклопластиковых корпусов необходимо строго соблюдать режимы технологического процесса намотки и качество исходных материалов, так как в этом случае возможности контроля ограничены и надежность конструкции в основном обеспечивается правильной технологией.

Сотовые корпуса сопел находят применение для малонагруженных корпусов, например для корпусов конических или профилированных раструбов крупных сопел. В местах сосредоточенных нагрузок необходимо устанавливать в процессе изготовления внутри сотовой обечайки металлические усиливающие кольца. Недостатками являются относительная сложность изготовления, более высокая стоимость и трудность контроля качества склеивания сот с обшивками.

Для обеспечения устойчивости раструба и входного конуса сопла в утопленных конструкциях у обоих срезов сопла часто устанавливают концевые шпангоуты, изготавливаемые механической обработкой на токарно-карусельных станках. Соединение кольцевых обечаек несущего корпуса друг с другом может быть болтовым, резьбовым или клеммным. Конструкция стыка должна предусматривать герметизирующее кольцевое уплотнение для предотвращения утечки газа.

Внутренняя теплозащитная облицовка сопел РДТТ работает в условиях высоких температур, значительных давлений, эрозионного

воздействия истекающей струи и коррозионного воздействия среды газообразного топлива. Конструктивно внутренняя облицовка состоит из отдельных кольцевых элементов (вкладышей), полученных различными способами. Наиболее тяжело нагруженными из них являются вкладыши критического сечения и входные. Существующие конструкции вкладышей разбиты на монолитные из жаропрочных теплопроводных материалов и абляционные из композиционных материалов. Для монолитных кольцевых вкладышей, изготавливаемых механической обработкой, применяют вольфрам, молибден, обычный и пиролитический графит или их сочетания и некоторые другие материалы (огнеупорные карбиды, окись бериллия, абляционные композиционные материалы на основе графитовых, асбестовых, стеклотканей и т. д.).

Абляционные теплозащитные облицовки в виде отдельных колец (см. рис. 96) изготавливаются методами формования в матрице под давлением для сопел малых размеров, спиральной выкладки (при изготовлении вкладышей входной части утопленных сопел) и намотки ленты. Последний метод является наиболее распространенным для сопел любого размера. Абляционные вкладыши изготавливаются намоткой графитовой или другой ленты, пропитанной фенольной смолой. Для обеспечения высокой плотности вкладышей отверждение производится в гидроклавах (или автоклавах) под давлением  $(7 \dots 22) \cdot 10^3$  кПа. Перед отверждением на поверхность вкладышей наносится перфорированный разделительный материал (хлопчатобумажная ткань, стеклоткань и др.), обеспечивающий отвод выделяющихся газов и впитывание излишков смолы. Заготовку накрывают эластичной (резина бутилового типа) оболочкой и помещают в пресскамеру. Отвод газов производится вакуумными насосами.

В некоторых случаях уплотнение производится прижимными роликами в процессе намотки с дополнительным подогревом кварцевыми лампами. Ввиду трудоемкости предварительного расчета размеров наматываемого вкладыша, последний изготавливают больших размеров, а после отверждения подвергают механической обработке алмазными резцами до заданных размеров, что обеспечивает высокую точность вкладышей, особенно по стыковочным поверхностям.

Сборка аблирующих облицовок в металлических корпусах сопел производится склеиванием их в скрепленном состоянии. В композиционных корпусах сопел намотка их производится на облицовку, собранную на удаляемой оправке. В некоторых конструкциях производится механическая стяжка вкладышей с помощью клинорезьбовых устройств. В металлических корпусах при сборке и приклеивании облицовки необходимо обращать особое внимание на возможность возникновения внутренних напряжений вследствие разных коэффициентов теплового расширения или изменения размеров вкладышей при полимеризации. Во избежание этого при сборке вкладышей между отдельными элементами предусматриваются компенсирующие зазоры, которые для предотвращения про-

никания газов заполняются либо шпаклевкой из хромистого цинка, либо герметиком из силиконовой резины.

Собранное сопло подвергается многократному контролю ультразвуком и рентгеноконтролю для определения сплошности материала и целостности конструкции сопла. Точное соблюдение технологических требований и режимов на всех стадиях изготовления сопел является необходимым условием обеспечения высокого качества и надежности. Для повышения живучести сопел на поверхность теплоизолирующей облицовки иногда наносят керамические жаростойкие покрытия (окись циркония и др.), что иногда позволяет уменьшить толщину облицовочных элементов.

## 9.5. СБОРКА И ИСПЫТАНИЯ

После изготовления всех деталей и узлов и комплектации они поступают на операцию заливки топливной массы и общую сборку. Процесс заливки готовой топливной массы часто занимает значительное время (исчисляемое иногда десятками часов), поэтому полимеризация топлива начинается уже в процессе заливки. С целью обеспечения сплошности топлива и требований к снаряженному двигателю заливка проводится в специализированных установках с несколькими заливочными трубопроводами и специальными стержнями по особой технологии. Процесс полимеризации топлива протекает в течение 50 ... 200 ч в зависимости от размеров двигателя. Так как при полимеризации топливный заряд может уменьшаться в размерах, в конструкции камеры предусматривается установка каучуковых прокладок в переднем днище для компенсации усадки заряда. При общей сборке производится установка всех деталей и узлов двигателя, иногда после заливки и полимеризации топлива последнее приходится механически обрабатывать до установленных размеров, после чего проводят контроль прочности скрепления заряда с облицовкой стенки корпуса радиографическими методами, позволяющими в большинстве случаев обнаружить зазор между теплоизоляцией и зарядом, а также контроль сплошности заряда твердого топлива (наличие трещин, раковин, отслоений и т. д.) рентгенографическим методом и гамма-дефектоскопией (кобальт 60). После этого устанавливается заднее днище с сопловым блоком и другие узлы и детали системы управления вектором тяги. Порядок общей сборки РДТТ зависит главным образом от конструкции, хотя главные этапы схемы изготовления и сборки соответствуют рассмотренным. Собранные двигатели проходят на специальных стендах имитационные испытания на работоспособность системы управления тягой. Установленное количество двигателей из партии проходит огневые испытания с контролем тяги и с последующим определением степени эрозии теплозащитных облицовок. Все штатные РДТТ проходят трехкратную химико-термическую стерилизацию, что должно быть предусмотрено при выборе материалов и способов соединения отдельных элементов двигателя. Полностью собранные и испытанные двигатели консервируются и поступают на общую сборку аппарата.



## Глава 10. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ И ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ КА

В условиях эксплуатации КА подвергаются нагреву, источниками которого могут быть аэродинамический и лучистый нагрев, нагрев от работы двигателей, от работы ряда бортовых систем и т. д. Вследствие этого нарушается оптимальный тепловой режим работы конструкции аппарата и изменяется оптимальная температура внутри него. Влияние нагрева на прочность несущей конструкции, механические свойства и ползучесть материала конструкции, жесткость и устойчивость аппарата и тепловой режим внутри конструкции в большинстве случаев оказывается столь большим, что требует принятия специальных мер по уменьшению этого вредного термического воздействия на аппарат. Наряду с конструктивными мероприятиями, направленными на уменьшение интенсивности аэродинамического нагрева за счет ламинаризации пограничного слоя или изменения аэродинамических обводов и повышения качества поверхности обшивок, а также на уменьшение температурных напряжений и деформаций в элементах конструкции, в космических аппаратах находят применение специальные теплозащитные (ТЗП) и теплоизоляционные (ТИП) покрытия, которые во многих случаях отличаются сложной конструкцией и структурой и специфической технологией. Масса их в ряде случаев может достигать 25% массы аппарата.

Теплоизоляционные покрытия корпусов аппаратов, которые могут быть внутренними и внешними, обычно выполняют свои функции за счет низкой теплопроводности и высокой теплоемкости, не разрушаясь и не расходуясь, а поглощая и сохраняя в себе поступающую тепловую энергию. Внутренние ТИП больше предназначены для сохранения заданного теплового режима внутри конструкции, а внешние — для уменьшения теплового потока к обшивке и силовым элементам корпуса. Современные ТИП не могут сопротивляться высоким внешним температурам в течение длительного времени из-за низкой жаропрочности, поэтому в случае длительного воздействия больших тепловых потоков (например, от аэродинамического нагрева или сильного и длительного лучевого потока) на корпус, кроме ТИП наносится дополнительно теплозащитное покрытие, которое обычно расходуется (сублимирует, аблирует) или содержит расходующиеся компоненты. ТЗП в значительной степени выполняют и функции ТИП, поэтому могут изредка применяться и без ТИП. В ряде случаев ТЗП выполняют и противометеорные функции. ТЗП и ТИП образуют единую систему сохранения теплового режима аппарата вместе с системой терморегулирования (СТР) аппарата, позволяя значительно уменьшить мощность и массу СТР.

## 10.1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Теплоизоляционные покрытия относятся к пассивным системам терморегулирования. Их эксплуатационные свойства и эффективность теплоизоляции в соответствии с механизмом действия, связанным с поглощением и накапливанием воздействующего на аппарат тепла, определяются рядом показателей. *Удельная масса* — отношение массы единицы объема материала, высушенного при температуре  $110^{\circ}\text{C}$ , к его объему в плотном состоянии без объема пор. *Объемная масса* — отношение массы единицы объема материала, высушенного при температуре  $110^{\circ}\text{C}$ , к его объему с учетом пор; чем он больше, тем теплоизоляционные свойства материала хуже; он колеблется в значительных пределах:  $5 \dots 10 \text{ кг/м}^3$  — алюминиевая гофрированная фольга,  $1400$  — асбестовый картон. *Пористость* обычно находится в пределах  $60 \dots 95\%$ , она определяет прочность, газонепроницаемость, коэффициент теплопроводности, объемную массу и, в конечном счете, теплоизоляционные свойства; чем мельче поры и чем больше закрытых пор, тем меньше конвекция воздуха и выше теплоизоляционные свойства. *Теплопроводность*, которая с учетом трех путей передачи тепла — теплопроводности, конвекции, лучеиспускания — характеризуется эквивалентным коэффициентом теплопроводности материала. Коэффициент теплопроводности неподвижного воздуха равен  $0,023 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Значение коэффициента теплопроводности зависит от температуры.

*Температуропроводность и удельная теплоемкость*, которая для неорганических материалов равна  $0,6 \dots 1,0 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ , а органических —  $1,2 \dots 1,6 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ . Часто учитывают и дополнительные характеристики: механическую прочность, пластичность, расширение и усадку, огнеупорность и огнестойкость, коррозионную и эрозийную стойкость, гигроскопичность и т. д.

В общем случае материалы для ТИП должны удовлетворять достаточно высоким требованиям: минимальная объемная масса; высокая теплоемкость (до  $1,6 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ); коэффициент теплопроводности для наружных ТИП  $0,1 \dots 0,16 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , для внутренних ТИП — около  $0,085 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ; минимальные значения усадки и изменений объема в диапазоне температур эксплуатации; требуемая прочность и жаропрочность, огнеупорность; низкие гигроскопичность, воздухо- и газонепроницаемость; требуемая отражательная способность; хорошая технологичность; экономичность; нетоксичность при изготовлении; стабильность свойств в диапазоне температур и времени эксплуатации и т. д.

Теплоизоляционные материалы делятся на неорганические (асботкани, стеклоткани, стекловата, пеностекло, пенокорунды, металлическая фольга и др.) и органические (войлок, полихлорвинил, пенопласты на основе полиуретана, полистирола, полиимида, поропласты, поролон и др.).

Конструктивно-технологическая классификация ТИП основана на виде применяемых для них материалов.

*ТИП на основе эластично-волоконистых материалов* с органическими (полимерными) и неорганическими (кварцевыми, асбестовыми, стеклянными) волокнами применяются для внутренней и внешней теплоизоляции при отсутствии механических воздействий на покрытие, так как их предел прочности меньше  $10^2$  кПа. В зависимости от жаростойкости волокон такие покрытия работают в пределах от 50 до  $1500^\circ\text{C}$ . Данный вид ТИП часто требует теплозащитных покрытий и располагается между ТЗП и поверхностью конструкции.

*ТИП на основе жестких волоконистых материалов*, как правило, применяются для внешней теплоизоляции аппаратов, подвергающихся механическому воздействию метеоритов или аэродинамическому воздействию: предел прочности их составляет  $(5 \dots 25) \times 10^2$  кПа. В зависимости от типа связующего (фенолформальдегидная, кремний-органическая, полиэфирная и т. д. смолы) покрытия данного вида работают в пределах от 100 до  $1500^\circ\text{C}$ . Разновидностью таких покрытий являются пеноматериалы (пеностекло, пенопласты, поропласты и т. д.), обладающие хорошими массовыми и изоляционными свойствами. Широкое применение их во внешних ТИП сдерживается недостаточной термостойкостью применяемых клеев.

*Экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ)*, применяемая как внешняя теплоизоляция КА или отдельных блоков и отсеков, состоит из ряда тонких листов — экранов — с высокой отражательной способностью, между которыми находятся прокладки из материалов с низкой теплопроводностью. В полете между экранами создается вакуум. В качестве экранов используются или органические (лавсановые, полиимидные и др.) пленки с односторонним или двусторонним отражающим покрытием (алюминий, золото и т. д.), или металлическая фольга (алюминий, никель, титан и др.). В качестве низкотеплопроводных прокладок используют стеклоткани, вуали, различные нитяные плетения, удерживающие воздух между экранами. ЭВТИ чаще всего изготавливают в виде магов — пакетов из ряда слоев экранов и прокладок, обшитых тканями. В зависимости от материалов экранов ЭВТИ могут работать в пределах температур от  $-200$  до  $1000^\circ\text{C}$  (никелевые экраны). ЭВТИ находит достаточно широкое применение в КА.

*Комбинированная теплоизоляция* находит все большее применение в КА. К комбинированным покрытиям относят сочетание различных видов тепловой изоляции, иногда сочетание ТИП с ТЗП; конструктивное решение комбинированных покрытий может быть различно, поэтому разновидностей комбинированных ТИП много. Одной из распространенных разновидностей комбинированных покрытий являются сотовые конструкции в сочетании с другими разновидностями тепловой изоляции. В зависимости от конструкции и применяемых материалов комбинированные ТИП работают в более широком диапазоне температур, чем отдельные виды ТИП, и сочетают в себе различные свойства и функции. Отметим, что в большинстве КА применяются ТИП различного вида на различных

участках в зависимости от условий эксплуатации, имеющихся тепловых потоков и требований к сохранению теплового режима работы конструкции КА.

Конкретные технологические процессы изготовления ТИП зависят от вида и конструкции ТИП, применяемых материалов и требований к ним. Основными этапами изготовления наиболее распространенного вида ТИП — экранно-вакуумной теплоизоляции — являются следующие: 1) контроль исходных материалов, к которым относятся экраны и прокладки, а также различные ткани для обшивки матов, капроновые нити и т. д. Кроме геометрических размеров (габариты, толщина) и целостности их может проверяться степень черноты и коэффициент отражения поверхности. Чаще всего экранами служат полимерные пленки, металлизированные с одной или двух сторон, иногда алюминиевая или никелевая фольга толщиной 0,01 ... 0,2 мм. В качестве прокладок обычно применяют различные стекловуали или стеклоткани, которые обеспечивают кроме теплоизоляции гарантированный зазор между экранами; 2) формование экрана на вакуум-формовочной машине с предварительно нагретой формовочной плитой до температуры около 300° С для пленки и около 350° С для фольги. Процесс формования металлизированной пленки производится при температуре около 140° С в вакууме около  $650 \cdot 10^2$  Па в течение 30 с, фольги — при температуре 170° С, вакууме около  $130 \cdot 10^2$  Па в течение 1 мин. После формования экраны охлаждаются сжатым газом до 40 ... 50° С. В результате формования на поверхности пленки или фольги образуются рифления для воздуха; 3) контроль качества формования по геометрическим параметрам, а также степени черноты и коэффициента отражения поверхности в каждом формируемом рифленом рулоне; 4) сборка необходимого количества дублированных (экран с вуалевой прокладкой) слоев. Экраны укладываются в пакеты (маты) металлизированной стороной наружу покрытия. Сборка производится на специальных рабочих столах. Укладка первого и последнего слоев экрана производится так, чтобы стекловуалева прокладка располагалась внутри мата. Количество экранов обычно в пределах 20 ... 50. При большом числе слоев ЭВТИ может состоять из нескольких матов; 5) выкройка пакета по шаблону, изготавливаемому из картона или фанеры, производится на рабочем столе острым ножом; 6) сварка ультразвуком слоев для матов больших размеров; 7) перфорирование производится для улучшения вакуумирования ЭВТИ; 8) сметывание мата по периметру. Для защиты ЭВТИ от механических повреждений с внутренней стороны ее обшивают перкалем или стеклотканью, с наружной стороны специальной тканью с заданными радиационными характеристиками; 9) контроль наличия перфорации, целостности экранов, геометрических размеров, смещения отверстий перфорации и сварных швов одного слоя относительно другого и т. д.; 10) окончательное сшивание матов (пакетов дублированных слоев экранов с прокладками, наружной и внутренней облицовок и ленты для кромок). Обшивка матов по кромок про-

изводится лентой и капроновыми нитками одного цвета с тканью без утяжки по толщине мата.

Основные этапы типового технологического процесса нанесения внутренней теплоизоляции рассмотрим на примере теплоизоляции, состоящей из поропласта и облицовочной ткани и наносимой на панельный металлический корпус: 1) входной контроль корпуса визуально на отсутствие механических повреждений, а также поропласта на соответствие ТУ удельной массы и толщины, а также вязкости клея с помощью вискозиметра; 2) нанесение кистью клея (например, клея 88) на одну поверхность листового поропласта равномерным слоем и сушка в течение 24 ч при комнатной температуре; 3) вырезка заготовок поропласта по шаблонам, снятым с изделия, и разделка местных усложнений формы; 4) нанесение клея на облицовочную ткань с внутренней стороны и сушка в течение 24 ч; 5) очистка и обезжиривание внутренней поверхности металлического корпуса; 6) нанесение тонкого равномерного слоя клея на очищенную внутреннюю поверхность корпуса и выдержка в течение 1 ч; 7) подгонка заготовок поропласта по местам установки в корпусе по стрингерам, лючкам и т. д.; 8) нанесение 2-го слоя клея на поверхность корпуса, сушка в течение 3 ... 5 мин и приклейка заготовки поропласта. Нанесение клея и приклейку поропласта производят участками; 9) сушка в течение 16 ч; 10) контроль качества приклейки поропласта визуально и на отрыв; 11) нанесение клея на приклеенный поропласт и сушка в течение 8 ч; 12) нанесение 2-го тонкого слоя клея на облицовочную ткань и приклейка ткани на поропласт. Приклейка ткани также ведется участками; 13) сушка приклеенной ткани в течение 24 ч; 14) контроль нанесенной внутренней теплоизоляции визуальным осмотром на отсутствие грязи, следов клея, отслоений, механических повреждений и т. д.

В зависимости от конструкции ТИП, технология их изготовления может быть значительно сложнее и содержать больше этапов и операций.

## 10.2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Наиболее эффективным элементом системы терморегулирования КА в условиях воздействия больших тепловых потоков на аппарат или часть его являются ТЗП. Задачей их является уменьшение температуры, весьма высокой (до 5000 К) и выше на поверхности покрытия, до допустимой на поверхности несущей обшивки аппарата, зависящей от материала защищаемого объекта. Целью расчета ТЗП является определение его толщины, исходя из свойств материалов и конструкции и температуры и скорости тепловых потоков.

Основными требованиями к теплозащитным покрытиям являются: малая удельная масса, достаточные прочность, удельная прочность, вибропрочность; ТЗП должно иметь большое значение теплоемкости, жаропрочности, степени черноты поверхности, погло-

щать большое количество тепла при различных химических превращениях и разрушении; быть технологичным, обладать хорошим адгезионным схватыванием с поверхностью; нижние слои покрытия не должны разлагаться раньше наружных; к ТЗП предъявляется и ряд других специальных требований, определяемых конкретными условиями.

Классификацию ТЗП производят по различным признакам. По месту расположения они могут быть внешними (защита от аэродинамического или длительного лучевого нагрева) или внутренними (защита от нагрева истекающими газами работающего двигателя или других источников тепла). По защищаемым объектам бывают ТЗП корпуса, спускаемого аппарата, баков, приборного отсека, крыльев и т. д. По применяемым основным теплозащитным материалам ТЗП можно разделить на металлокерамические, металлопластмассовые (композиционные) и пластмассовые (полимерные), хотя в современных ТЗП чаще всего применяются комбинации различных материалов, выполняющих различные функции; иногда могут быть и металлические покрытия. По температурам, на которые рассчитываются ТЗП, они иногда условно делятся на низкотемпературные (до  $400^{\circ}\text{C}$ ), среднетемпературные (до  $700^{\circ}\text{C}$ ), высокотемпературные (выше  $700^{\circ}\text{C}$ ). По принципу действия и применяемым системам и средствам охлаждения различаются активные системы, предусматривающие специальные газообразные или жидкие теплоносители для принудительного охлаждения отводом тепла за пределы КА, а также теплообменники, радиаторы и др., и пассивные — за счет теплопоглощения, излучения или уноса покрытия и т. д.; чаще всего применяется сочетание активных и пассивных систем теплозащиты. В последнее время стали различать ТЗП однократного и многократного (восстанавливаемые) применения. Классификацию можно проводить и по ряду других признаков.

По конструктивно-технологическим признакам, включающим в себя принцип работы покрытия, применяемые материалы, конструкцию и технологию изготовления и т. д., различаются отдельные виды ТЗП.

*Металлическая теплозащита* с применением тугоплавких металлов наиболее проста по конструкции и технологии и ей легче придать форму корпуса по сравнению с некоторыми видами ТЗП. Металлическая ТЗ может быть однослойной или многослойной, когда верхний слой может служить покрытием для самой теплозащиты. Для металлической теплозащиты применяют сплавы титановые (до  $300 \dots 500^{\circ}\text{C}$ ), никелевые, кобальтовые, молибденовые, вольфрамовые (до  $1100^{\circ}\text{C}$ ), ниобиевые, танталовые (до  $1300^{\circ}\text{C}$  и выше). Ограничением для применения тугоплавких металлов и сплавов является их низкая жаростойкость — резкое возрастание скорости окисления с ростом температуры. Поэтому для металлических ТЗП необходимо применение жаростойких покрытий, материалами для которых могут служить окислы и карбиды тугоплавких металлов и другие жаростойкие соединения с минимальным испарением в вакууме. Эти покрытия могут наноситься различными методами

электроосаждения, пламенного и плазменного напыления, осаждением из газовой фазы, металлизацией, плакированием и т. д. Еще более повышается эффективность металлических ТЗ при нанесении на них покрытий с высокой излучающей способностью (алюминий, золото, серебро, платина), т. е. при сочетании их с радиационной ТЗ.

*Радиационная теплозащита* — сравнительно проста и перспективна для спускаемых КА, а также планирующих аппаратов многократного использования. Суть этого метода состоит в излучении тепла с нагретой поверхности; при определенной, равновесной, температуре уравниваются значения подводимого и излучаемого потока. Так как величина удельного теплового потока излучения пропорциональна четвертой степени температуры поверхности, то эффективность метода увеличивается при высоких температурах; двумя главными требованиями к материалам радиационной ТЗ являются высокие излучательная способность, жаростойкость и жаропрочность. Конструктивно радиационная система ТЗ представляет собой тонкий экран, усиленный ребрами жесткости, служащими для соединения его с несущей поверхностью; во многих случаях пространство между обшивкой аппарата и экраном заполняют теплоизолирующим материалом, например, пористой керамикой или порошковым, а ребра в точках контакта с обшивкой иногда подвергаются местному конвективному охлаждению. Для внешних радиационных экранов могут использоваться тугоплавкие мегаллы (ниобий, молибден, тантал, вольфрам) и их сплавы с температурой плавления  $2500 \dots 3400^\circ \text{C}$  и коэффициентом излучения 0,8, а также керамические материалы (окись алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , окись циркония  $\text{ZrO}_2$ , силикат алюминия  $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}$ ) с рабочей температурой  $1650^\circ \text{C}$ . Экраны из тугоплавких металлов и сплавов имеют обычно жаростойкие покрытия с высокой излучающей способностью, наносимые указанными выше методами. Керамические материалы для экранов рекомендуется применять в виде пористых структур, так как наличие пор предотвращает распространение трещин и уменьшает чувствительность их к местным хрупким разрушениям.

*Конвективное охлаждение* поверхности с помощью жидкого или газообразного охладителя, омывающего нагретую поверхность (рис. 97), из-за сложности конструкции (включает в себя бак, трубопроводы, теплообменники, насос и т. д.), значительной массы охладителя и сложности обеспечения распределения охладителя по всей поверхности, в конструкциях КА находит применение или в сочетании с другими видами теплозащиты, или для защиты отдельных участков аппарата. В таких системах охладителями выбирают воду, водород, гелий, жидкие металлы, соединения лития, каждый из которых имеет определенные преимущества и недостатки. Конвективное охлаждение находит широкое применение в камерах сгорания ЖРД для охлаждения огневых стенок. Конвективная система ТЗ сложна и в технологическом отношении: кроме изготовления входящих в систему агрегатов, значительное место отводится испытаниям системы ТЗ.

*Тепловая защита с твердыми теплопоглотителями* в технологическом отношении проста и надежна. Суть метода заключается в поглощении и аккумулировании тепла материалом оболочки или специальным теплопоглотителем, располагаемым под металлической нетолстой жаропрочной оболочкой. Наиболее эффективными теплопоглотителями, обладающими высокими удельной теплоемкостью, теплопроводностью и температурой плавления, являются медь, бериллий и окись бериллия. Эффективность системы увеличивается при использовании теплоты плавления и нагревания жидкой фазы теплопоглотителя (например, лития), но в этом случае усложняются конструкция и технология изготовления ТЗ. Несмотря на ограниченный температурный предел теплопоглотителей такая система ТЗ находит достаточно широкое распространение в ракетно-космических системах благодаря своей надежности, простоте изготовления и низкой стоимости.

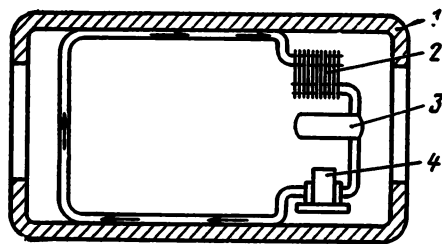


Рис. 97. Схсма конвективного охлаждения:

1—охлаждаемая стенка; 2—теплообменник;  
3—емкость для охладителя; 4—насос

*Принудительные (активные) методы теплозащиты* включают пористое, пленочное и заградительное охлаждение; они основаны на массообменном принципе. При пористом охлаждении (испарительном, выпотеванием) через перфорированную или пористую стенку в пограничный слой подается жидкий или газообразный охладитель (вода, гелий, азот и др.), который, испаряясь, поглощает часть тепла от стенки и, выходя на поверхность, снижает интенсивность теплообмена между стенкой и потоком газа. Иногда в качестве охладителя применяют низкотемпературный сублимирующий твердый материал (например, тефлон,  $\text{NaHCO}_3$ ). Пористое охлаждение обеспечивает равномерную подачу охладителя на защищаемую поверхность. При пленочном охлаждении подаваемая через отверстия жидкость под действием сил трения растекается по поверхности, образуя защитную пленку, которая, испаряясь, поглощает тепло и блокирует тепловой поток к стенке. Пленочное охлаждение может быть распределенным по всей защищаемой поверхности или локальным на определенном участке. При сохранении пленки температура на поверхности не будет превышать температуру кипения охладителя. При заградительном охлаждении стенка изолируется от горячего потока слоем холодного газа, подводимого через щели по касательной к поверхности, что сохраняет более длительно поток вводимого газа. Все эти методы теплозащиты, имеющие много разновидностей, находят применение в камерах сгорания для охлаждения стенок, в агрегатах КА, предназначенных для входа в атмосферу. Испарительное и пленочное охлаждение иногда применяются в абляционных системах ТЗ для повышения их эффективности.



*Абляционная теплозащита* является в настоящее время самым распространенным видом ТЗ в конструкциях КА. Абляционная система ТЗ относится к расходным типам ТЗ, основанным на массо- и теплоуносе с нагретой поверхности.

Эффект теплозащиты обуславливается следующими явлениями: поглощением тепла при нагревании поверхностного слоя покрытия до температуры фазовых превращений или химических реакций; поглощением тепла при физических (плавление, испарение, сублимация) и химических превращениях нагретого слоя; поглощением энергии в результате механического разрушения и уноса продуктов физико-химических превращений; излучением энергии нагретым поверхностным слоем материала; поглощением тепла на нагревание и разложение высокомолекулярных газов при их испарении через обугленный верхний слой покрытия; блокированием теплового потока газообразным пограничным слоем покрытия.

Механизм абляции в значительной степени зависит от класса и состава материала и является очень сложным и до конца не ясным процессом. В процессе абляции одновременно протекают различные механические и физико-химические процессы: нагрев определенного слоя покрытия с некоторым градиентом температур; расплавление связующего и наполнителя; унос расплавленного покрытия под действием встречного потока; сублимация покрытия; скалывание частиц покрытия, образование трещин, эрозия поверхности, повреждение поверхности уносимыми частицами; срыв и унос ослабленных нагревом слоев ТЗП; испарение жидкой фракции и разложение высокомолекулярных газов при их прохождении через обугленный слой; процесс пиролиза, при котором уносятся газообразные, жидкие и твердые продукты разложения; сгорание и окисление слоя ТЗП и т. д. Исходя из определенного механизма и процессов абляции вырабатываются требования к абляционным материалам.

Для абляционных покрытий малоэффективными оказались металлы, их окислы, различные керамические материалы вследствие малой теплоемкости и большой теплопроводности. Более эффективен пиролитический графит (обладающий анизотропными свойствами), вследствие большой скрытой сублимации и высокой термостойкости. Наиболее эффективным оказались полимеры и, особенно, композиционные материалы на их основе.

Важнейшими параметрами композиционных полимерных материалов, определяющих их свойства, являются: состав, структура, масса и теплофизические свойства; состав и содержание в полимере отвердителя; состав, форма, ориентация и термостойкость наполнителя; состав и количество газообразных продуктов, образующихся в процессе абляции; состав, свойства и количество твердого остатка; состав, композиция (соотношение компонентов, однородность структуры) и технологические условия формования композиционного материала. Варьируя эти параметры, можно направленно получать композиционный материал с заданными свойствами.

По характеру разрушения абляционные материалы разделяют

на сублимирующие, плавящиеся, обугливающиеся и окисляющиеся. Характер и скорость разрушения определяют толщину покрытия. К сублимирующим относятся материалы, разрушающиеся при нагреве с образованием, минуя жидкую, непосредственно газовой фазы (фторопласт, графит, тефлон), которая, главным образом, и определяет эффект теплозащиты. К плавящимся относятся материалы, разрушающиеся при нагреве, образуя жидкую фазу, которая может растекаться по защищаемой поверхности, уноситься с нее и частично испаряться (материалы на основе стекла и кварца, оргстекло, полиэтилен и т. д.), что в сумме определяет эффект теплозащиты. К обугливающимся (коксоующимся, пиролизным) относятся в основном полимерные композиционные материалы (например, фенольный нейлон), процесс разрушения которых при нагреве сходен с газификацией при коксовании, и эффект теплозащиты у них связан с процессами разложения материала, уноса газообразных и твердых частиц, излучением и блокированием теплового потока. Обугливающиеся покрытия — наиболее эффективные абляционные ТЗП — в процессе абляции образуют четыре основных слоя: основное (первоначальное) покрытие; слой, в котором происходит процесс пиролиза с образованием низкомолекулярных газов и обугленного твердого остатка; обугленный, раскаленный (коксообразный); пограничный слой газообразных продуктов. Такое четырехслойное динамическое покрытие обуславливает высокую их эффективность. К окисляющимся относятся такие материалы, которые при нагреве интенсивно, с поглощением значительного количества тепла окисляются (горят); в чистом виде такие покрытия применяются редко.

Основными компонентами композиционных абляционных покрытий являются связующие и наполнители. В качестве связующих широко применяются органические и неорганические соединения: фенольные, фенол-формальдегидные, эпоксидные, силиконовые, полиэфирные и другие смолы, различные каучуки, полимеры, ненасыщенные фосфаты и т. д. В качестве наполнителей применяют текстолит, асбестовые волокна, стекло, графит, различные полимерные волокна, двуокись кремния (рефразил), волокна на основе двуокиси циркония, силиката циркония и т. д. Находят применение для ТЗП и неармированные пластики (фторопласт-4, нейлон, различные каучукоподобные материалы). Наполнители применяются в виде порошка, зерен, волокон и тканей.

Технологические процессы изготовления ТЗП зависят от конструкции, материалов и требований к ним, содержат большое количество операций и в общем аналогичны технологическим процессам изготовления композиционных материалов. Отметим некоторые особенности технологии получения ТЗП, влияющие на их основные свойства.

Теплозащитные и прочностные свойства покрытия в большой степени зависят от расположения наполнителя по отношению к аэродинамическому и тепловому потокам: оптимальный угол ориентации наполнителя  $15 \dots 20^\circ$  при направлении волокон по потоку.

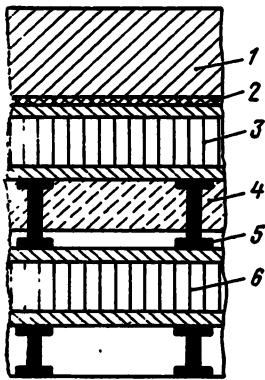


Рис. 98. Двухслойная конструкция ТЗП:

1—абляционный слой; 2—клеевой слой; 3—сотовая панель; 4—теплоизоляция; 5—несущий элемент; 6—основная сотовая стенка корпуса

Наиболее широко используется метод намотки внахлест. Исследования геодезии намотки приводят к изысканию новых, иногда весьма сложных рисунков намотки. Основные режимы намотки — натяжение нити, скорость и шаг намотки, толщина или ширина нити (ленты). В зависимости от геодезии намотки, углов ориентации, режимов, вида ленты и наполнителя и др. различаются параллельная и наклонная намотки, краевая укладка, методы изготовления ТЗП из слоистых пластиков, метод послойной выкладки, различные комбинированные методы укладки, а также методы с хаотичным расположением волокон и т. д. В зависимости от способа и стадии пропитки наполнителя связующим (нанесение связующего) различаются мокрый, полусухой, пропитка заготовки под давлением и ряд других способов нанесения связующего. При изготовлении ТЗП важным этапом технологического процесса, влияющим

на качество покрытий и экономику, является их формование. Различают вакуумный, автоклавный, прессовый, беспрессовый способы формования, способы пресскамеры, моментального отверждения и т. д. Особым при изготовлении ТЗП из композиционных материалов является вопрос о механической обработке с целью обеспечения необходимой точности, качества и состояния поверхности, сохранения свойств покрытия и т. д. Режимы механической обработки и геометрия инструмента устанавливаются экспериментально для каждой марки композиционного материала.

Технологические процессы изготовления усложняются для ТЗП сотовой конструкции, особенно если они имеют несколько слоев, хотя теплозащитные свойства их значительно выше, чем у ТЗП обычного типа (рис. 98). Такие многослойные ТЗП с высокой надежностью и стоимостью обычно предназначаются для пилотируемых КА, возвращаемых на Землю. Для беспилотных КА и для тепловой защиты КА на орбите обычно применяют более простые ТЗП, состоящие из абляционного покрытия рассчитанной толщины, приклеенной к основной конструкции аппарата.

## Глава 11. ОБЩАЯ СБОРКА КА

Завершающий этап изготовления КА — общая сборка и испытания. На этой стадии окончательно формируется аппарат и определяется его соответствие в целом заданным технологическим требованиям. Одной из главных задач сборки является обеспечение заданной надежности КА при минимальных затратах и минимальной трудоемкости.

## Типовой состав КА

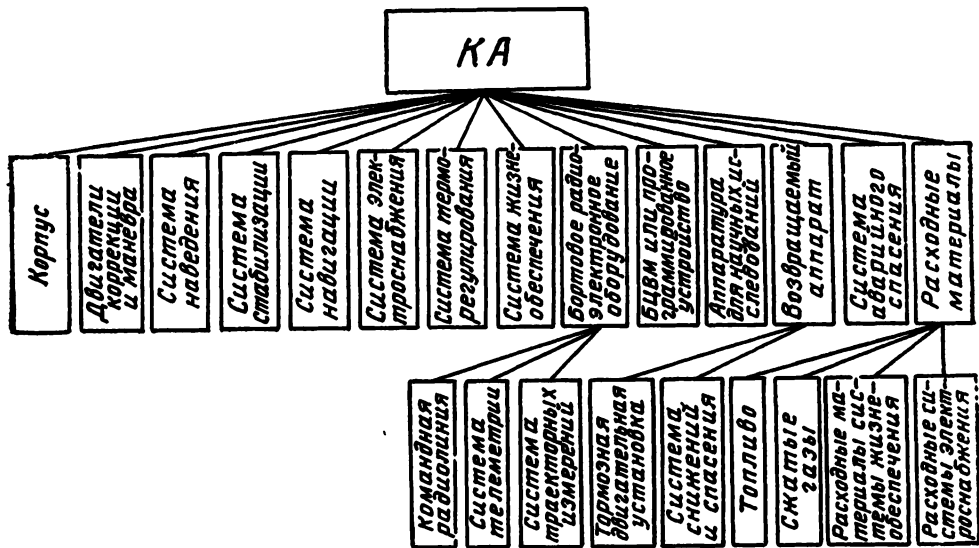


Рис. 99. Агрегатный состав различных космических аппаратов

Процесс общей сборки КА в полной мере зависит от его конструкции — компоновки. Несмотря на то, что к настоящему времени изготовлено и запущено значительное количество КА, унифицированной схемы общей сборки не существует, что можно объяснить большим разнообразием конструкций и компоновок. Этим в значительной степени объясняется и весьма высокая стоимость КА.

К общей сборке можно отнести и сборку отдельных функционально завершенных частей крупных аппаратов с резко отличными, особыми задачами, когда в процессе эксплуатации они выполняют функции отдельных аппаратов, например сборку спускаемых, орбитальных блоков и т. д.

Процесс общей сборки КА делится на непосредственно сборку — соединение отдельных агрегатов и монтаж оборудования — и испытания. Иногда испытания следуют после окончания общей сборки, но чаще этапы общей сборки и испытаний (контроля) перемежаются друг с другом: испытания идут по принципу последовательного нарастания. Ряд испытаний проводится для полностью собранного аппарата.

Объем и содержание работ при общей сборке КА зависит от состава и степени членения его (рис. 99). Как правило, современные КА проектируются по агрегатно-блочному принципу, т. е. аппарат состоит из отдельных функционально-завершенных агрегатов, изготовление и испытания которых могут проводиться независимо друг от друга. В составе существующих аппаратов, особенно средних и крупных, кроме основных агрегатов имеется большое количество узлов и деталей (бортовая аппаратура, антенны, экраны, кабель-

ная сеть, теплозащитные покрытия на стыках агрегатов, пиротехнические и замковые устройства, крепежные детали и т. д.), которые устанавливаются только при общей сборке, т. е. в значительной степени нарушается агрегатно-модульный принцип конструирования. Основными типовыми системами в составе космических аппаратов являются несущий корпус отсечной или рамной конструкции, двигательные установки системы коррекции и маневра, система наведения и стабилизации со своими двигателями, системы навигации и электроснабжения (солнечные и химические батареи), бортовое радиооборудование с антенными устройствами (телеметрической системы, траекторных измерений, связи), система терморегулирования, бортовые вычислительные или программные устройства, аппаратура для проведения научных исследований и т. д. В крупных пилотируемых аппаратах дополнительно могут быть спускаемые блоки с тормозными двигательными установками, парашютными отсеками и системами снижения и мягкой посадки; системы обеспечения жизнедеятельности, аварийного спасения, медико-биологическая аппаратура и т. д. Обычно в конструкциях КА все приборы концентрируются в приборном отсеке, чаще всего герметичном и со своей системой терморегулирования и теплозащиты. Часть приборов может находиться также в обособленных блоках КА (спускаемый, орбитальный блок и т. д.). Такое конструктивное обособление приборного отсека в большинстве случаев позволяет производить монтаж и испытания большинства приборов и кабельных систем на стадии агрегатной сборки, уменьшая объем работ на стадии общей сборки. В конструкциях КА один из отсеков (блок баков, приборный отсек, корпус отсека экипажа, иногда ферменный корпус) является основным несущим элементом, к которому присоединяются все основные агрегаты; в этом случае он является базовым при общей сборке, к нему предъявляются кроме собственных функциональных требования по обеспечению жесткости и монолитности всей конструкции аппарата с предусмотрением посадочных и стыковочных элементов для присоединения других агрегатов.

При общей сборке к точности взаимного расположения агрегатов предъявляются весьма высокие требования. Допуски на угловой перекося осей стыкуемых отсеков нередко находятся в пределах  $3 \dots 5'$ , а смещение осей —  $0,1 \dots 0,3$  мм. Высокие требования предъявляются к точности расположения центра тяжести, совпадению оси аппарата с осью инерции, не допускается деформация и перекося в стыкующихся узлах, неравномерность усилий соединения (затяжки) и т. д. Агрегаты, подаваемые на общую сборку, должны обеспечивать минимальную доработку их. Для обеспечения высокой производительности и точности даже в мелкосерийном производстве необходимо стараться обеспечить полную или частичную взаимозаменяемость агрегатов, в необходимых случаях нужно предусматривать соответствующие компенсаторы. Длительность цикла сборки в значительной степени определяется надежностью поступающих на общую сборку агрегатов, поэтому последние долж-

ны при агрегатной сборке пройти все необходимые испытания и контроль. Чем меньше погрешностей и отказов проявляется на общей сборке, тем короче цикл за счет уменьшения объема испытаний и количества разборки и сборки аппарата с целью замены отказавших элементов и агрегатов.

Несмотря на высокие требования, предъявляемые к агрегатам на предыдущих этапах изготовления и сборки, в единичном и опытном производстве стыковочные поверхности часто дорабатывают механически на общей сборке, для чего должны быть предусмотрены соответствующие припуски; в некоторых случаях предусматривается совместная обработка некоторых элементов стыкующихся деталей (например, отверстия под стыковочные штифты и стыковочные болты, нанесение ТЗП на стыках, подгонка люков и т. д.). Кроме того, все агрегаты, узлы, детали, приборы, поступающие на общую сборку, проходят входной контроль по основным параметрам.

Программа входного контроля размеров и параметров включает в себя визуальный осмотр консервационной упаковки, внешний осмотр, контроль размеров, форм, испытания и проверка необходимых параметров на специальных стендах. Для космических аппаратов обычно проводится сплошной входной контроль, иногда по расширенной программе. Входной контроль агрегата может проводиться как автономно, когда контролируется только данный агрегат, так и комплексно на стендах с заменой других стыкуемых агрегатов и элементов эталонными или имитируемыми; на этих же стендах при необходимости производится отработка и регулировка контролируемых агрегатов и систем. Правильно спроектированный входной контроль всех элементов обеспечивает минимум отказов при испытаниях собранных агрегатов.

Стыковка и соединение агрегатов при общей сборке производится, как правило, по конструктивно-технологическим разъемам, поэтому соединения между ними почти всегда разъемные. При общей сборке КА наиболее распространены соединения с помощью болтов (шпилек), замковые или с помощью различных пиротехнических устройств (пироболты, пиножи, пирозамки и т. д.), предназначенных для разъединения агрегатов по заданной команде в процессе эксплуатации. Сварные или клепаные соединения при общей сборке предусматривают редко во избежание различных деформаций вследствие внутренних напряжений или повреждений стыкуемых агрегатов и их элементов от нагрева или ударов. При сборке агрегатов между собой в зависимости от количества стыковочных болтов может быть контурное с помощью большого количества болтов, распределенных равномерно по контуру стыковки, и точечное соединение, когда по контуру стыковки устанавливаются в нескольких точках (2 ... 6) болты (чаще пироболты) или замки различной конструкции. Тип соединения влияет и на конструкцию корпуса агрегата: при точечном целесообразно иметь жесткие стыковочные элементы и лонжеронного типа корпус. Болтовые стыки должны быть конструктивно оформлены таким образом, чтобы они обеспе-

чивали легкий доступ при затяжке и позволяли осуществлять равномерную по контуру затяжку. Это особенно важно для соединений, которые могут неоднократно демонтироваться или собираться на стартовой позиции при раздельной транспортировке.

Кроме фланцево-болтовых и замковых соединений в КА встречаются винтовые и телескопические, их конструкция должна гарантировать отсутствие самопроизвольного отвинчивания или сдвига агрегатов между собой при эксплуатации. Наряду с указанными, в конструкциях КА применяются также подвижные соединения типа ухо-вилка, гребенка, шаровой шарнир. Они должны быть сконструированы в соответствии с требованиями технологичности, а сборка их обычно производится с местной доработкой. Для соединений целесообразно предусматривать возможность регулировки. Соединений с несколькими шаровыми разъемными узлами следует избегать вследствие трудности их точной сборки. Шарнирные соединения широко применяются в КА при сборке солнечных панелей с корпусом и между собой, при установке поворотных антенн и выносных элементов.

Особый тип представляют разнообразные пироболтовые или замковые соединения, разделяемые в полете. Суть большинства конструкций состоит в том, что в заданное по команде время производится разрушение одной из деталей по предусмотренному сечению чаще всего с помощью пиротехнических устройств. К точности изготовления этих соединений, особенно по разрушаемому сечению, и их сборке предъявляются достаточно высокие требования для обеспечения синхронности срабатывания нескольких таких соединений по разъединяемому разъему. Различные типы соединений представлены на рис. 100.

Процесс общей сборки КА включает в себя базирование агрегатов друг относительно друга, соединение и скрепление их различными способами, монтаж и соединение коммуникаций, проведение различных регулировочных работ систем и механизмов и испытаний. Общий порядок и последовательность присоединения агрегатов, начиная с базового, определяется в каждом случае конкретно. Этапы общей сборки определяются присоединением каждого агрегата. Технологический процесс усложняется наличием большого количества подготовительных, монтажных, регулировочных, доделочных и испытательных операций и операций по установке отдельных приборов и деталей. Кроме того, значительное место в процессе сборки занимают операции контрольных установок агрегатов на специальные стенды с целью доработки и подгонки отдельных коммуникаций (трубопроводов, кабельной сети и т. д.).

Общая сборка начинается с проведения на основе входного контроля комплектации агрегатов и деталей. Соединяемые агрегаты проходят вначале предварительные операции, в процессе которых разделяются на специальных разделочных стендах стыковочные поверхности, производится необходимая совместная доработка (например, сверление стыковочных отверстий), распайка жгутов в герморазъемы, установка герморазъемов, проверка цело-

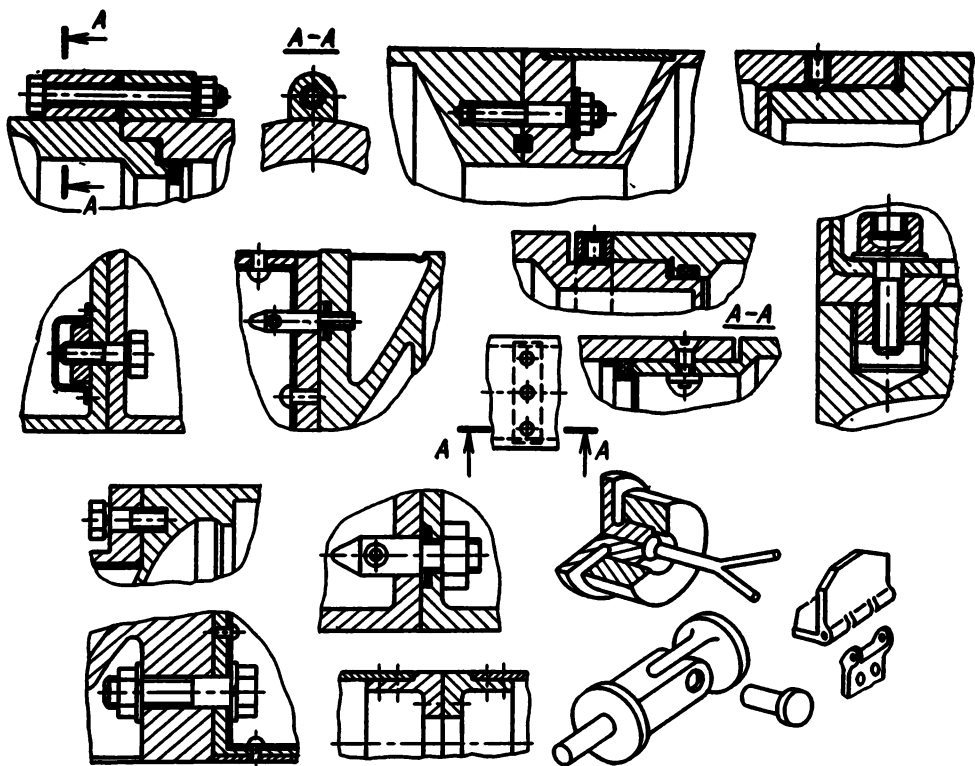


Рис. 100. Типы соединений агрегатов в космических аппаратах

стности электропроводок, сопротивления изоляции и т. д. Далее проводится стыковка агрегатов с помощью специальных стыковочных приспособлений или стенов для обеспечения точности базирования. Точность стыковки агрегатов технологически обеспечивается механической доработкой стыковочных поверхностей перед сборкой с базой по оси (или наружной поверхности) агрегата, сборкой агрегата на предыдущих этапах с базой по стыковочной поверхности, увязанным исполнением стыкуемых поверхностей собираемых агрегатов по одним мастер-плитам. С целью повышения точности сборки и снижения трудоемкости в конструкциях предусматривают различного рода компенсаторы: припуски на доработку при сборке, увеличенные диаметры под болты, овальные отверстия, прокладки, шайбы, подбираемые в каждом случае, регулируемые резьбовые узлы и т. д. Перед сборкой и соединением в стыки агрегатов устанавливаются пиротехнические устройства (пироболты, пиножи, пороховые шнуры и т. д.). Все болты, за исключением особо указанных случаев чистых болтов, в стыке должны работать на растяжение, за счет затяжки. Равномерность затяжки болтов в стыке обеспечивается определенным порядком их затяжки по контуру и последовательным увеличением усилия затяжки, а также применением специальных тарированных ключей.



Монтаж электропроводов, трубопроводов, тяг и других элементов, проходящих из одного агрегата в другой, на стыковочных поверхностях (шпангоутах, кольцах и т. д.) выполняется по монтажным шаблонам, одинаковым для обоих стыкующих агрегатов, что обеспечивает точность и взаимозаменяемость. Аналогичным образом устанавливаются различные герморазъемы электрокабелей и других коммуникаций.

Так как процесс общей сборки аппарата в большинстве случаев производится агрегатно-поточным методом, то после присоединения агрегата производится полная доработка собранной части аппарата: подгонка и доработка теплозащиты, подгонка люков и иллюминаторов, регулировка аппаратуры (например, настройка антенно-фидерной системы) и все необходимые контрольные и испытательные работы. Контроль и испытания на функционирование при общей сборке проводятся по схеме последовательно нарастающих повторных испытаний, т. е. с присоединением каждого агрегата или прибора (группы приборов) или регулировки или настройки их, испытания повторяются для собранной или настроенной части аппарата.

Отдельные блоки крупных КА собираются параллельно, что ускоряет процесс общей сборки. После сборки и испытаний блоков, они стыкуются друг с другом до получения собранного КА, после чего он поступает на общие испытания. С целью сокращения времени общей сборки и повышения ее эффективности строят схему общей сборки, на базе которой можно построить циклограмму сборки, что позволяет проанализировать и оптимизировать все этапы и операции. Для оптимизации технологического процесса эффективно применение сетевого метода, что позволяет существенно сократить сроки общей сборки.

Трудоемкость технологического процесса общей сборки в значительной степени определяется большим количеством ручных сборочных работ и регулировок и настроек, а также испытаний, которые также в значительной степени проводятся вручную. Поэтому механизация сборочных работ в производстве КА, особенно учитывая его мелкосерийный и единичный (опытный) характер, является актуальной задачей. При сборке КА широко применяется различная сборочно-стапельная оснастка: стыковочные тележки, базирующие приспособления, транспортные устройства (тележки, краны и т. д.). В последнее время более широкое распространение в связи с частой сменой объектов производства находит универсально-сборная переналаживаемая оснастка (УСПО), которая за счет возможности быстрой разборки и переналадки оказывается эффективной в производстве КА. Конструкции сборочных приспособлений должны обеспечивать свободный подход к местам соединений, минимальное время на установку, базирование и закрепление и съем агрегатов, иметь высокую точность, минимальную стоимость, возможность переналадки с целью многократного использования одних и тех же приспособлений, занимать минимальные площади, обладать удобством обслуживания, иметь малый срок

монтажа и подготовки и т. д. Наиболее полно этим требованиям в настоящее время отвечает сборочно-стапельная оснастка из нормализованных элементов и универсально-сборная переналаживаемая оснастка, которая позволяет без разработки сборочных чертежей и изготовления деталей по сформулированным требованиям собрать (сконструировать) специальное приспособление из нормализованных или стандартных деталей. При этом сокращается срок подготовки производства и уменьшается стоимость оснастки, хотя требуется подготовка конструкторов, владеющих подобной особой методикой конструирования (сборки) оснастки. УСПО включает в себя универсально-сборные приспособления (УСП), контрольно-измерительные приспособления (УСКИП), приспособления для монтажа приборов (УСППМ), накладные круглые и прямоугольные кондукторы (УСКНК, УСПНК), пневмо-гидравлические элементы (УСПГЭ) и др. Отметим, что УСПО и нормализованные элементы позволяют сконструировать практически любые специальные приспособления, требующиеся при сборке КА (в ряде случаев с изготовлением небольшого числа необходимых базирующих элементов — рубильников, установочных деталей и т. д.).

Кроме сборочно-стапельной оснастки при общей сборке КА, как в любом производстве летательных аппаратов, находят широкое применение жесткие носители размеров и форм системы плазово-шаблонного или плазово-эталонного метода производства: различные шаблоны, кондукторы, эталонные и рабочие мастер-плиты, монтажные эталоны, разделочные стенды и т. д. Вся эта инструментальная и контрольная оснастка взаимно увязывается и требует тщательного и точного изготовления. В процессах общей сборки находят применение и универсальное автоматизированное контрольно-испытательное оборудование (АКИО), которое позволяет сократить трудоемкость контрольно-испытательных работ и повысить надежность КА.

При сборке КА в связи с высокими требованиями к точности взаимного расположения отдельных агрегатов и монтируемых элементов большое место занимают регулировочные работы (юстировка) с целью обеспечения требуемых геометрических параметров и нивелировочных данных аппаратов. Для этой цели при сборке КА находят широкое применение оптические приборы (зрительные визирные трубы, телескопы, теодолиты, автоколлиматоры, оптические плоскомеры и т. д.) с подбором определенных рисунков целевых знаков и их предварительной юстировкой, а также устройств для точного перемещения деталей и агрегатов в процессе установки, регулирования и контроля. В последнее время для этих целей начинают применять лазерные установки и методы голографии (например, Вагнер Е. Т., Митрофанов А. А., Барков В. Н. «Лазерные и оптические методы контроля в самолетостроении»). Так как геометрическая точность сборки аппаратов определяется точностью применяемой сборочной оснастки (стапелей), то при монтаже узлов сборочных стапелей оптические и лазерные методы находят также широкое применение.

Среди требований, предъявляемых к общей сборке КА, значительное место занимают требования к цехам и участкам общей сборки по чистоте, температуре, влажности, чистоте воздуха и т. д., так как при общей сборке должна обеспечиваться стерильность собираемого аппарата. С этой целью эти цеха и участки снабжаются сложной системой вентиляции, очистки воздуха, регулирования температуры, должны выполняться требования по размещению оборудования и оснастки, требования к сборщикам и испытателям и т. д.

Вопросы *смазки* подвижных элементов КА имеют большое значение для надежной эксплуатации. Смазка внутри герметичных отсеков КА, имея некоторую специфику (невесомость, применяемые материалы и т. д.), не является особой проблемой. Сложной задачей является обеспечение смазки подвижных трущихся частей аппарата — подшипников (скольжения, качения, гидродинамических) антенн, систем ориентации, солнечных батарей, опор двигателей, редуцированных механизмов, щеток электрических контактов элементов причальных (стыковочных) устройств и т. д. — в условиях открытого космоса, когда герметизация их не предусмотрена или невозможна.

Условия космоса вызывают усиленное испарение смазок и металлов, а также при отсутствии окисных пленок и адсорбированных газов на поверхности контакта схватывание сопрягаемых поверхностей, что приводит к утере подвижности соединения.

Исходя из условий эксплуатации, к смазочным материалам для КА предъявляются следующие требования: продолжительная работоспособность в условиях вакуума и высоких и низких температур, сохранение свойств при длительной эксплуатации, малые испаряемость и коэффициенты трения, стойкость к износу при трении, стойкость против радиации, совместимость с покрытиями или металлами сопрягаемых поверхностей и компонентами окружающей среды (например, с жидкими топливами, с кислородом атмосферы кабины КА и т. д.), безопасность (нетоксичность) для экипажа, возможность нанесения простыми технологическими способами.

Из различных классов по физическому состоянию смазочных средств (жидких, консистентных, твердых, составных) наиболее широкое применение в подвижных соединениях КА нашли твердые смазки (ТС). Они в большинстве случаев позволяют упростить конструкцию соединения, снизить массу и увеличить надежность по сравнению с обычными смазочными материалами на основе жидких и консистентных масел. Жидкие смазки в условиях космоса практически не применяются. В редких случаях (ограниченное время, неглубокий вакуум) могут применяться густые смазки с малой скоростью испарения.

Твердые смазки, применяемые в КА, по составу делятся на ряд типов. Металлические смазки (золото, серебро, кобальт, никель, платина и др.), наносимые на контактирующие поверхности в виде тонких покрытий, являются достаточно эффективными смазками, работающими до 300 ... 400° С, особенно для щеток электрических

контактов, но отличаются недолговечностью и неприменимы для длительной эксплуатации. Металлические ТС в сочетании с неметаллическими материалами более надежны с точки зрения схватывания в вакууме при высоких давлениях и температурах: на органических связующих (эпоксидных, фенольных и полиамидных смолах) работают до  $150^{\circ}\text{C}$ , на неорганических (силикатных) связующих — до  $550^{\circ}\text{C}$ ; кроме этого, у них меньше скорость испарения. Особый тип ТС составляют смазки, наносимые напылением или пропиткой и т. д. (графит, дисульфиды молибдена, вольфрама) и отвечающие большинству приведенных выше требований. ТС на керамической основе (графит, фтористый кальций, фтористый барий, окись свинца и т. д.) работают до  $1050^{\circ}\text{C}$ . Самосмазывающиеся материалы (фторопласт) относятся к полимерным смазкам, они имеют малую скорость испарения, надежны против схватывания, имеют малый коэффициент трения, но обладают малой радиационной стойкостью, что резко ограничивает длительность их применения. К самосмазывающимся твердым смазкам относятся и пористые материалы, пропитанные серебром, дисульфидом молибдена, фторопластом или даже маслами.

Из большего числа различных композиций твердых смазок наибольшее распространение получили смазки на основе дисульфида молибдена, например с использованием в качестве связующего силиката натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , или с добавками графита, олова, серебра, сульфида свинца. Эти смазки обладают низкой испаряемостью, высокой радиационной стойкостью, термостойкостью (до  $400^{\circ}\text{C}$ ), применяются они чаще в виде твердых пленок или реже в виде порошка для подшипников, работающих в среде жидкости или газа. Наряду с подобными находят применение и твердые смазки на основе графита с добавками кадмия, фторидов бария, кальция и т. д., а также ряд других композиций, работающих до температур  $800 \dots 1000^{\circ}\text{C}$ .

Технология нанесения тонкопленочных покрытий смазки основана на известных процессах: применяется электрогальванический метод, метод вакуумного осаждения, напыления или электронапыления и др. Но во всех случаях высоки требования к начальным этапам технологического процесса, обеспечивающим получение химически чистой поверхности металла: электролитическое обезжиривание, промывка в щелочных и кислых ваннах, ультразвуковая очистка и т. д. В процессе и после нанесения покрытий контролируется их толщина, целостность и соответствие требованиям (полная программа испытаний проводится выборочно).

### 12.1. СИСТЕМА ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ

Испытания и контроль занимают большое место в производстве космических аппаратов. Общей их целью является обеспечение высокой (заданной) надежности КА, способности КА выполнить в полном объеме заданные функции в течение определенного времени как в наземных, имеющих место при транспортировке, подготовке, запуске и т. д., так и в условиях полета.

Контроль и испытания проводятся на всех этапах изготовления аппарата, начиная с приема поставок, кончая запуском. Неограниченное увеличение количества контрольно-испытательных работ не обеспечивает роста надежности: во-первых, контроль и испытания, кроме увеличения стоимости аппарата, сами могут вносить дополнительные дефекты и повреждения в конструкцию, во-вторых, при контроле и испытаниях вырабатывается ресурс работы отдельных элементов, узлов, аппаратуры, агрегатов, что иногда заставляет проводить некоторые виды испытаний на моделях и макетах, не подвергая этим испытаниям летные образцы аппаратов. Вследствие этого вся совокупность контроля и испытаний аппарата требует оптимизации, определения оптимального сочетания видов испытаний, объема их, количества и места в ходе технологических процессов исходя из необходимости обеспечения требуемой надежности, стоимости и длительности цикла изготовления и других факторов. Задача оптимизации стратегии контроля и испытаний в настоящее время окончательно не решена. Таким образом, контрольные и испытательные работы в производстве КА составляют взаимосвязанную в своих частях единую систему, требующую оптимизации по ряду параметров.

Система контроля и испытаний КА строится исходя из определенных принципов, учитывающих специфику их конструкции, условия эксплуатации, условия производства, стоимость и т. д.

1. Испытания должны обеспечивать достоверную информацию и выпуск аппарата с требуемой надежностью.

2. Все испытания должны проводиться на аппаратах, изготовленных по принятым для данного аппарата технологии и контролю, применяемым и для летных образцов.

3. Контроль и испытания должны быть построены таким образом, чтобы имеющиеся дефекты выявились на более ранних этапах изготовления, на более низких уровнях сборки, т. е. операции контроля и испытаний целесообразно располагать возможно ближе к тем сборочным операциям, где могут возникать ожидаемые дефекты.

4. Программа должна содержать испытания на все виды нагрузок, которым аппарат подвергается при наземной подготовке (транспортировка, стерилизация и т. д.) и в полете. Ряд воздействующих факторов создается имитацией, например вакуум, радиационное воздействие, невесомость и т. д. Испытания могут провод

даться как при воздействии одного, так и при комбинированном воздействии нескольких факторов, например сочетание вакуума, теплового воздействия, излучений и т. д. Последовательность приложения внешних воздействий при испытаниях должна соответствовать последовательности приложения их при функционировании летного изделия на Земле и в полете.

6. В тех случаях, когда испытания связаны с выработкой ресурса или опасностью повреждения испытываемого объекта, параллельно с летными по той же технологии изготавливаются специальные образцы для испытаний. Подобным испытаниям подвергаются как минимум два объекта: один — предельным максимальным, разрушающим нагрузкам с целью определения запаса по данному типу нагрузки (например, запас прочности), а второй — при почти эксплуатационных нагрузках в длительном режиме (до разрушения) для определения запаса по ресурсу. Такая методика обеспечивает при наименьших затратах наибольшую вероятность выпуска изделия с определенными запасами по ресурсу и прочности.

6. Все летные и испытательные образцы аппаратов проходят контрольно-технологические испытания по программе, составленной для летных образцов, после чего испытательные образцы поступают на испытания на предельные нагрузки.

7. Уровень испытательных нагрузок (температур, количества термоциклов, вибраций, давлений и др.) должен обеспечивать необходимый запас по данному типу воздействия, но не слишком превышать реальные условия. Отказы при неоправданно жестких, завышенных условиях испытаний могут привести к ненужным переделкам конструкции, к утяжелению ее, к необходимости повторных более широких испытаний и, в конечном счете, к неоправданной потере времени и средств.

8. Хотя принципиально время испытаний должно быть равным длительности подготовки на Земле и работы аппарата в полете, во многих случаях оно отличается либо в ту, либо в другую сторону. В некоторых случаях принимают длительность испытаний равной длительности одного цикла работы аппарата на земле и двух циклов работы его в полете. При испытаниях аппаратов, рассчитанных на очень длительный срок существования, длительность их, как правило, меньше цикла работы аппарата. Если к длительности испытаний модельных (испытательных) образцов не предъявляются строгие требования, то длительность испытаний штатных образцов строго регламентирована и должна быть минимальной.

9. Важным принципом, лежащим в основе построения системы испытаний, является то, что оценка надежности конструкции КА производится при испытаниях с предельными нагрузками на испытательных образцах, когда определяются предельные возможности конструкции по различным воздействующим факторам, а оценка готовности (годности) аппарата к полету определяется при специальных приемочных испытаниях с нагрузками, или равными эксплуатационным, или немного превышающими их. Таким образом, в основе системы испытаний лежит принцип аналогии летных

образцов с модельными, который обеспечивается одинаковостью не только конструкции, но и технологии изготовления и контрольно-технологических испытаний. И если после одинаковых условий изготовления и приемочных испытаний модельные образцы в результате усиленных испытаний на надежность покажут положительные результаты, то эти результаты переносятся и на летные образцы, которые испытаний на надежность не прошли.

10. Испытания на комплексное воздействие факторов эксплуатации должны проводиться на возможно более высоком уровне сборки, желательно на полностью собранном КА. К этому времени в результате предыдущих контроля и испытаний дефектные элементы уже выявлены и заменены годными, и при испытаниях на комплексное воздействие выявляются дефекты, появляющиеся в результате взаимного влияния отдельных элементов друг на друга. Такие испытания обязательно включаются в программу приемочных испытаний летных образцов.

11. Испытания, особенно обитаемых КА, должны проводиться при всех возможных режимах работы.

12. Результаты предыдущих испытаний должны использоваться или учитываться при проведении испытаний на более высоком уровне, т. е. не должно быть дублирования.

13. Испытания на функционирование и целостность коммуникаций бортовой аппаратуры и автоматики должны проводиться по принципу последовательно нарастающих повторных испытаний, что позволяет наиболее быстро выявить дефектные элементы (или группы элементов) и сократить цикл и стоимость испытаний, а также уменьшить число переборок аппарата и количество отказов и дефектов при более сложных испытаниях собранного аппарата.

14. При выявлении дефектов все они должны собранны анализироваться, устраняться (исправлением дефекта или заменой элемента), а объект испытаний должен пройти после этого повторные испытания в установленном объеме. Повторные испытания по полной программе проводятся также при внесении принципиальных изменений в конструкцию, технологию или оборудование.

15. Испытания в необходимых случаях должны дополняться расчетами, что часто, не снижая надежности аппарата, приводит к значительному сокращению объема испытаний. Например, при проверке надежности посадочных агрегатов для посадки на другие планеты может возникнуть огромное число вариантов посадки (по сочетанию скорости посадки, высоты, угловой скорости, числа точек соприкосновения, положения центра тяжести по отношению к точке касания и т. д.). Все эти варианты могут быть проиграны на ЭВМ (машинный эксперимент), но наиболее тяжелые или сомнительные должны быть проверены испытаниями натуральных образцов.

16. Основными критериями эффективности контроля и испытаний являются надежность КА, стоимость и длительность цикла испытаний, которые и должны учитываться в первую очередь при составлении программы испытаний и ее оптимизации.

17. Все наземные испытания должны быть закончены и результаты обработаны и обобщены до проведения летных.

18. Для достижения высокой эффективности контроля и испытаний необходимо обеспечить подробную и детальную разработку методики всех испытаний, тщательную по установленной форме регистрацию результатов, своевременный анализ и обобщение результатов испытаний, подготовку всех испытателей на высоком уровне и строгое соблюдение регламента и методики испытаний.

## 12.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ

В настоящее время нет единой общепринятой системы контроля и испытаний КА, а существует большое разнообразие систем, которое зависит от особенностей и назначения данной конструкции КА (или группы КА), условий производства, имеющихся традиций, уровня отработанности технологических процессов и т. д. Более того, в настоящее время нет даже единой терминологии для отдельных этапов и видов контроля и испытаний и структурных основ испытаний. Это приводит к необходимости отработки самих систем контроля и испытаний в каждом конкретном случае, проверке их эффективности и достоверности, т. е. к проведению испытаний самих испытаний в виде различного рода оценок надежности, калибровок, сравнения с элементарными испытаниями, тарифов непосредственно перед испытаниями и других работ, часто включаемых в методику проведения испытаний. Результатом этого является удорожание испытаний, различная степень надежности и достоверности испытаний, увеличение длительности испытаний и т. д. Создание единой унифицированной (базовой) системы испытаний космических и других летательных аппаратов является в настоящее время актуальной и важной задачей. Системы испытаний конкретных аппаратов должны строиться на основе подобной базовой, сохраняя общую методологию, принципы, технологию испытаний, методику обработки результатов и т. д., отличаясь лишь включением или исключением каких-то конкретных видов испытаний и контроля или режимами проведения отдельных испытаний, вытекающих из специфики данного летательного аппарата.

Все многообразие контрольно-испытательных работ, применяемых в производстве КА можно классифицировать по различным признакам.

Контрольные операции обычно связаны с проверкой соответствия контролируемого объекта чертежам, техническим условиям и другим документам, т. е. они связаны со сравнением контролируемых параметров с заданными конструктором. Таковыми являются визуальный осмотр, контроль размеров и форм, целостности электрокоммуникаций (прозванивание), правильности разводов, величины сопротивления, напряжения в цепи, измерение массы, объема и т. д.

Испытания обычно связаны с созданием какого-либо вида воздействия на объект (давления, температуры, излучений, вибраций



и т. д.) с последующей или одновременной проверкой правильности функционирования или целостности объекта. Таковыми являются испытания на прочность, виброустойчивость, герметичность, удар и т. д. Программы испытаний почти всегда в начале и в конце их проведения предусматривают ряд контрольных операций (проверка целостности, измерение объема, прозванивание и т. д.), поэтому в этих случаях говорят о проведении контрольно-испытательных работ (как о комплексе работ, связанных с проверкой надежности конструкции и годности изделия к полету).

По месту проведения испытания могут быть наземными и летными (натурными). Промежуточное положение занимают стендовые (наземные), так называемые огневые испытания (натурные), которые для космических аппаратов проводятся редко. Они типичны для испытаний двигательных установок или отдельных ступеней ракет-носителей. Наземные испытания могут быть заводскими, полигонными (в монтажно-испытательном корпусе космодрома) и предстартовыми, которые проводятся на изделии, установленном на стартовом столе. Полигонные и предстартовые испытания иногда называют предполетными.

В зависимости от уровня сборки испытуемого объекта испытания могут быть узловыми (сборочных единиц — узлов), агрегатными (отсеков, агрегатов, блоков) и общими (собранного аппарата). Обычно к общим относят и испытания даже не полностью собранного аппарата, если они производятся на стадии общей сборки. В этом случае несобранная часть заменяется (имитируется) эталонными приборами, находящимися на испытательном стенде. В зависимости от степени собранности и завершенности объекта испытаний различаются испытания функционально завершенных (узлов, агрегатов, аппарата) и незавершенных объектов. Проведение последних начинает находить распространение вследствие тех выгод, которые дает принцип последовательно-нарастающих повторных испытаний. Узловые, агрегатные и общие испытания проводятся на соответствующих стадиях изготовления аппарата и отличаются местом проведения и применяемой аппаратурой и средствами. Иногда место и средства испытаний могут быть одними и теми же (например, термобарокамеры, ударные стенды) в целях экономии и унификации испытаний одного вида.

Испытания, проводимые при разработке и изготовлении КА в зависимости от решаемых задач и целей (т. е. назначения), подразделяются на исследовательские и контрольно-технологические.

*Исследовательские испытания* (иногда их называют конструкторскими, оценочными, инженерно-оценочными, конструкторско-доводочными, чистовыми доводочными и т. д.) проводятся с целью определения возможности реализации конструкторских идей в новом аппарате, проверки работоспособности конструкции и соответствия ее ТУ и ТЗ, т. е. решается задача отработки (выбора вариантов) конструкции. Хотя подобные конструкторские задачи могут ставиться и при летных испытаниях, но, как правило, исследовательские испытания относятся к наземным (проводятся не на лет-

ных образцах) и заканчиваются окончательным выбором конструкции аппарата. Исследовательские испытания могут проводиться как на уровне узлов и агрегатов, так и для целого аппарата в зависимости от решаемых задач. В зависимости от решаемых задач их делят на ряд типов: испытаний на возможность создания конструкции, когда определяется принципиальная возможность решения поставленных задач данной конструкцией и возможность изготовления ее; на работоспособность (иногда их называют типовыми), которые проводятся как на предельных (испытания на надежность), так и на эксплуатационных нагрузках, но в течение длительного времени (испытания на ресурс); на соответствие ТУ, которые иногда называют квалификационными испытаниями, когда все системы контролируются и испытываются на функционирование в соответствии с ТУ при различных видах воздействия на них. Эти испытания являются весьма ответственными, потому что после них определяется окончательный вариант конструкции КА (или отдельных систем и агрегатов). Программа исследовательских испытаний обычно весьма обширна. Изделия, предназначенные для них, должны изготавливаться теми же методами и по той же технологии, что и будущие летные образцы, т. е. предполагается одновременная разработка технологических процессов изготовления и сборки и подготовки производства.

*Контрольно-технологические испытания* имеют главной целью проверку серийных, устанавливаемых на летные образцы, узлов, агрегатов, а также полностью собранных летных образцов аппарата на отсутствие производственных дефектов. Кроме того, контрольно-технологическим испытаниям подвергаются все изделия, которые идут на проведение исследовательских и выборочных испытаний на воздействие различных видов нагрузок, т. е. испытаниям подвергаются все изготавливаемые изделия. Контрольно-технологические испытания (их иногда называют заводскими, приемочными и т. д.) делятся обычно на испытания установочной партии, проводимые по широкой программе с целью проверки стабильности и отработанности технологического процесса изготовления и сборки для небольшой партии аппаратов, не предназначенных для летных испытаний и изготовленных по утвержденной технологии; приемсдаточные (контрольно-сдаточные, приемочные и т. д.), проводимые для всех летных образцов и образцов моделей, предназначенных для дальнейших испытаний, с целью проверки их соответствия техническим условиям; контрольно-выборочные (типовые, выборочные и т. д.), имеющие целью периодическую проверку стабильности технологического процесса изготовления и сборки и соответствия изделий техническим условиям. Обычно все три разновидности контрольно-технологических испытаний проводятся для узлов, систем и иногда агрегатов; для собранных аппаратов (так же как и для сложных агрегатов и блоков) испытания установочной партии вообще не проводят, а контрольно-выборочные проводят ограниченно по экономическим соображениям. Приемсдаточные испытания проводятся для всех образцов изделий на всех уровнях изготовле-

ния и сборки в так называемом щадящем режиме, который предусматривает различные воздействующие нагрузки, равные или немного превышающие эксплуатационные, и ограниченную, строго фиксируемую длительность испытаний (время наработки всех элементов и приборов). Программа приемо-сдаточных испытаний требует тщательной обработки, так как они являются практически единственными испытаниями для штатных образцов аппаратов и должны гарантировать наряду с высокой надежностью сохранность ресурса аппарата и отсутствие различных повреждений и дефектов. Программа предполетных испытаний, проводимых после приемо-сдаточных для штатных образцов аппаратов, обычно несколько меньше по объему, чем программа приемо-сдаточных заводских испытаний, и содержит относительно больше контрольных операций.

Заводские приемо-сдаточные испытания полностью собранных КА по аналогии с ракетным производством в ряде случаев подразделяют на горизонтальные и вертикальные. Программы их, как правило, одинаковы, вертикальные могут быть несколько укороченными. Отличие состоит в том, что горизонтальные испытания обычно проводятся непосредственно на участке сборки сразу после полной общей сборки (для ракет в горизонтальном положении), а вертикальные — на специальном испытательном участке (контрольно-испытательная станция — КИС) в положении эксплуатации или старта (для ракет в вертикальном или в наклонном положении). Кроме того, вертикальные испытания проводятся выборочно, а горизонтальные для всех аппаратов.

Основными этапами приемо-сдаточных испытаний являются: наружный осмотр аппарата по определенному плану на отсутствие вмятин, царапин, повреждений поверхности, теплоизоляции, целостность солнечных батарей, антенн, наличие пломб, заглушек, технологических диафрагм на соплах, окраски и т. д.; визуальный и электрический (прозванивание) контроль бортовых кабельных сетей; испытание герметичности трубопроводов, емкостей, гермоблоков и т. д.; автономные испытания бортовой аппаратуры и систем автоматики (раскрытие СБ, антенн, автоматики ДУ и др.); проверка и испытания радиосистем связи, телеметрии и т. д.; комплексные испытания на взаимодействие бортовой аппаратуры, систем автоматики и других систем; испытания специальных систем аппарата (терморегулирования, жизнеобеспечения, контроля за космонавтами, научной аппаратуры и т. д.); контроль (визуальный и электрический) целостности кабельных сетей и других коммуникаций после испытаний.

Испытания сборочных единиц могут быть автономными и комплексными. Автономные имеют целью проверку отдельных приборов или групп приборов, входящих в сборочную единицу, агрегат или аппарат, на специальных стендах с заменой (имитацией) остальной части сборочной единицы эталонными приборами. Они позволяют в собранных агрегатах или аппарате выявить дефектные при-

боры или элементы и заменить их на годные, после чего проводятся повторные испытания.

*Комплексные испытания* собранных агрегатов и аппаратов имеют целью проверку входящих в них приборов на взаимодействие, когда определяются кроме правильного функционирования взаимовлияние и взаимонаводки элементов и соответствие объекта ТУ. Автономные и комплексные испытания входят в программу различных испытаний как этап проверки правильности функционирования систем аппарата при воздействии испытывающих нагрузок.

По степени соответствия условий испытаний реальным условиям эксплуатации испытания подразделяются на натурные и имитационные. К *натурным* относят огневые испытания на стендах и летные. Строго говоря, все наземные испытания КА являются имитационными, так как на Земле воссоздать все условия запуска, вывода и полета аппарата и все воздействующие факторы космического пространства невозможно, но в производстве КА принято считать *имитационными* такие испытания, в которых создаются специальные уникальные условия космического пространства (вакуум, тепловое воздействие, излучения, невесомость, удары метеоритов и т. д.) в отдельности или в совокупности. Для создания таких условий и воздействий при испытаниях применяют специальные установки, устройства и помещения, называемые имитаторами космических условий (барокамеры, термобарокамеры, полеты испытательных камер в самолетах по параболической траектории для создания условий невесомости, камеры с излучающими устройствами и имитацией метеоритных ударов и т. д.). Чем выше соответствие имитирующих условий реальным, тем выше надежность изготовленных КА.

Особо выделяют классификацию испытаний по виду воздействующего фактора или нагрузки, имитирующих или создающих условия эксплуатации аппарата при испытаниях. Их обычно называют отдельными видами испытаний.

### 12.3. ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ

Различные виды испытаний входят как составные части в программы наземных испытаний космических аппаратов. Важность отработки методики и режимов испытаний определяется тем, что они обеспечивают и фиксируют требуемое качество и надежность аппаратов. В совокупности по всем программам они составляют единую систему испытаний, т. е. их методика и особенно режимы должны быть согласованы во всей системе с целью исключения ненужных повторений, с одной стороны, и обязательного контроля и испытаний всех систем и элементов, с другой стороны. Рассмотрим некоторые наиболее типичные виды испытаний, которые часто применяются в производстве КА.

*Испытания на функционирование* отдельных систем, узлов, устройств и т. д. составляют основу большинства программ и методик. В чистом виде они представляют собой проверку работоспособно-

сти различных систем и устройств при отсутствии специально созданных внешних воздействий, т. е. при нормальных условиях цеха (при нулевом воздействии). Они обычно проводятся непосредственно после изготовления и сборки, если возможно, то на этом же участке, и имеют целью проверку правильности изготовления и сборки данного объекта. Испытания на функционирование, как правило, входят составной частью в сложные программы, являясь предварительным или заключительным этапом или проводятся совместно с искусственно созданным внешним воздействием, например испытания на функционирование перед и после испытаний на удар, в условиях воздействия вибраций (или других нагрузок) на объект испытаний. Методика их предусматривает визуальную проверку целостности и правильности изготовления и сборки объекта, электрических цепей (прозванивание штепсельных разъемов, системы измерения и регистрации, тарировку датчиков, проверку измерительных каналов и т. д.), и только после подобной, исключающей грубые ошибки проверки, проводятся сами испытания на функционирование.

В ходе самих испытаний могут фиксироваться или только конечный результат испытаний, например срабатывание какого-то механизма, или наряду с ним ряд промежуточных параметров и характеристик, число которых может быть очень большим, особенно при испытаниях агрегатов, блоков и аппаратов (до нескольких сотен фиксируемых с помощью ЭВМ параметров). Примеры испытаний на функционирование: испытания срабатывания пневмогидроавтоматики двигательных установок, функционирования клапанов, раскрытия солнечных панелей, системы управления аппарата, системы терморегулирования, системы отделения блоков аппарата и т. д.

Большой задачей в этой области является унификация методик и регистрирующей аппаратуры типовых испытаний на функционирование.

*Испытания на статическую прочность* занимают важное место в системе испытаний на прочность КА. В некоторых случаях им предшествует проведение расчетных работ с перебором (на ЭВМ) различных вариантов нагрузжений. Испытания на прочность являются экспериментальной проверкой правильности расчетов и имеют целью получение данных о фактическом деформировании и напряженном состоянии элементов конструкции и определение фактического запаса прочности. Суть испытаний на статическую прочность состоит в определении фактических деформаций и напряжений в элементах и узлах аппарата при воздействии постоянных или очень медленно изменяющихся силовых или температурных факторов; они чаще проводятся при воздействии силовых и реже при совместном влиянии силовых и температурных факторов. Испытаниям могут подвергаться все нагруженные элементы конструкции: емкости, баки, различные трубопроводы, узлы крепления двигателей, панелей солнечных батарей, узлы подвески баков, стыковочные ферменные конструкции и т. д.

В зависимости от способов приложения нагрузок и элементов конструкции существуют различные типы испытаний на статическую прочность. Выше были рассмотрены типовые испытания на прочность баков и емкостей с применением гидравлического метода нагружения. Для многих герметичных отсеков КА применение гидравлического внутреннего воздействия (попадание внутрь отсека жидкости) недопустимо. В этом случае применяется пневматический метод нагружения сжатыми газами, который значительно опаснее и сложнее гидравлического и требует создания из условий безопасности сложных бронезащитных камер и боксов, представляющих собой отдельные сооружения. При испытаниях на прочность пневматическим способом основным параметром, определяющим опасность испытаний, является произведение давления на объем газов, находящихся под давлением, поэтому при пневмоиспытаниях крупных отсеков КА применяют метод уменьшения внутреннего объема, занимаемого газом, за счет установки внутри объектов различных заполнителей: пенопластовых или металлических элементов, емкостей с водой, для трубопроводов заполнителями могут быть шары, помещенные внутрь них. Заполнители должны устанавливаться таким образом, чтобы практически не исказить схему нагружения объекта при испытаниях.

Значительно усложняются испытания на статическую прочность при совместном воздействии силового и теплового факторов, когда необходимо создать близкое к эксплуатационному температурное поле в элементах конструкции. Эти испытания проводятся в специальных бронекамерах, оснащенных системами нагрева (термокамеры). Нагрев производится радиационными (инфракрасный нагрев) или конвективными методами (пропускание через камеру с небольшой скоростью горячего газа). Такие испытания чаще проводятся в сочетании с воздействием других факторов (вакуум, излучения и т. д.).

*Испытания на герметичность* входят почти во все программы испытаний. Так как они связаны с созданием избыточных давлений и глубокого вакуума внутри или снаружи испытываемых емкостей, то им предшествуют испытания на статическую прочность. По виду воздействующего фактора испытания на герметичность можно отнести к статическим. Выше был приведен ряд основных методов испытаний на суммарную и локальную герметичность.

*Динамические испытания* являются развитием и продолжением статических. Цель динамических испытаний — проверка функционирования систем, механизмов и устройств КА при воздействии на него разного рода динамических воздействий и снятие динамических характеристик аппарата. Функционирование систем и элементов может определяться до, после, а в ряде случаев и в процессе динамического воздействия. В зависимости от характера и вида динамического воздействия различают отдельные виды динамических испытаний: различные вибрационные, акустические, ударные и повторноударные, на инерционные нагрузки и др. Во всех этих видах испытаний одной из основных задач является

определение вида нагрузки, соответствующей реальным эксплуатационным условиям по величине, характеру, частоте и форме, и воссоздание ее в условиях испытаний.

*Вибрационные* — один из самых распространенных видов динамических испытаний КА. Целью их является определение амплитудно-частотных характеристик элементов КА, коэффициентов демпфирования, частот собственных колебаний элементов, узлов, агрегатов, и т. д., что необходимо для расчетов и создания математических моделей элементов и аппарата; кроме того, при виброиспытаниях определяется вибропрочность и виброустойчивость элементов и систем аппаратов. При испытаниях на вибропрочность определяется способность элементов конструкции противостоять вибрационным нагрузкам, не разрушаясь и не получая механических повреждений. До и после воздействия проверяется целостность объекта и правильность функционирования элементов. При испытаниях на виброустойчивость определяется способность систем и элементов аппарата правильно функционировать в условиях действующих вибраций без резонансных явлений, ложных срабатываний и т. д. Наряду с этим до и после испытаний проверяется целостность и работоспособность испытуемого объекта. Вибрационные испытания проводятся на всех уровнях сборки КА, частота — от 0,1 до нескольких тысяч герц, амплитуды — от нескольких микрометров до десятков миллиметров и выше. Режим вибраций (частота и амплитуда) определяет величину перегрузок, действующих на объект. При этом весьма важен режим приложения вибраций по времени. Он может быть постоянным с постоянной частотой и постоянной амплитудой, с плавно меняющимися по определенному закону (например, по логарифмическому) амплитудами и частотами, с дискретно меняющимися амплитудами и частотами в пределах установленного диапазона с заданным шагом. Приложение вибраций может быть одноосным, двухосным и трехосным. Методика испытаний и оборудование в последнем случае весьма сложны, но такие испытания очень эффективны, так как наиболее соответствуют эксплуатационным условиям. Испытания на случайные вибрации проводятся обычно при неработающем оборудовании, так как они часто имитируют условия транспортировки. Проверка правильности функционирования элементов и систем производится до и после испытаний. В последнее время в связи с созданием экономических, управляемых от ЭВМ установок испытания на случайную вибрацию находят более широкое применение. Вибрационные испытания позволяют выявить дефекты пайки, некачественные соединения кабелей, разъемов, неплотно затянутые болтовые и винтовые соединения; кроме того, они позволяют определить динамические характеристики объекта, для чего производят замер напряжений и вибраций во многих (до 600 ... 800) точках аппарата.

Для проведения вибрационных испытаний разработано большое количество вибрационных стендов различной конструкции: механические (эксцентрикowego типа, кривошипно-шатунного типа, с дисбалансами и т. д.), преимуществом которых является простота и

низкая стоимость, недостатком быстрый износ, недостаточная надежность, ограниченный диапазон частот и мощности; электродинамические, которые легко управляются (установки с программным управлением), имеют широкий диапазон частот, возможность получения неискаженного сигнала, удобны в работе и надежны, но с ростом их мощности резко возрастают габариты; гидравлические и электрогидравлические, которые имеют меньшие габариты при больших мощностях и те же преимущества, что и электродинамические, но они сложнее в конструкции. В настоящее время существуют конструкции вибростендов, позволяющие создать многоосные вибрации объекта, достаточно мощные и управляемые по заданной программе с использованием программных устройств и ЭВМ.

*Акустические испытания* — разновидность вибрационных испытаний на звуковых частотах — в последнее время быстро распространяются в производстве космических аппаратов благодаря развитию техники испытаний, а также соответствию такого вида воздействия реальным условиям. Источниками акустических нагрузок в КА являются шумы от истекающей струи в двигателях, работы различных внутренних устройств, вибраций элементов КА на звуковой частоте и т. д. Особенностью акустических нагрузок является широкополосность и случайность, сложность по структуре. Спектр этих шумов простирается от нуля до многих тысяч килогерц, уходя в ультразвуковую область. Интенсивность (уровень) звуковых давлений может достигать 200 дБ. Сочетаясь с другими видами нагрузок (термические, излучения, статические силы и т. д.), акустические нагрузки могут вызывать быстрое разрушение элементов аппарата. Акустические испытания могут проводиться как в открытых условиях, когда, например, используется шум от работающего ракетного двигателя, так и в закрытых камерах. Испытания в открытых условиях неэкономичны и зависят от атмосферных условий. Испытания в камерах экономичнее, достигается более высокий уровень шума, легче управляемы, но архитектура камеры может искажать акустическое поле, вызывая иногда образование стоячих волн.

Для создания акустических нагрузок в последнее время используются искусственные источники — акустические генераторы, которые должны иметь большой диапазон генерируемых частот, высокий уровень звукового давления и КПД, способность генерирования требуемой формы сигнала, стабильность работы в поддержании режима акустических вибраций, быть экономичными. В настоящее время в качестве акустических генераторов применяют системы громкоговорителей, реактивные струи, сирены, аэродинамические трубы, электродинамические вибростенды.

*Ударные испытания* — обязательный и важный вид испытаний КА; они имитируют ударные нагрузки, возникающие при разделении ступеней и отсеков, при срабатывании обтекателей и раскрытии парашютных систем, при посадке аппарата, а также при транспортировке. Различаются две разновидности испытаний: на одиночный удар и на повторные (многократные) удары.



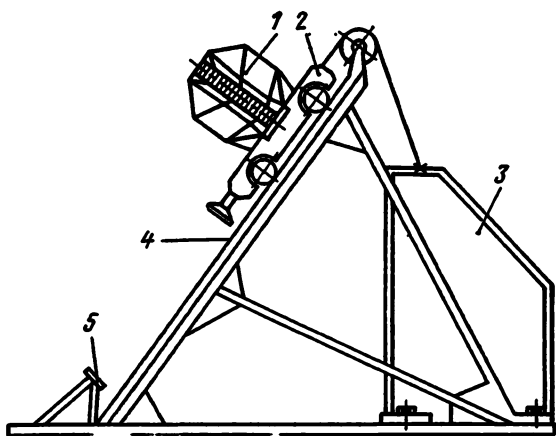


Рис. 101. Схема стэнда для ударных испытаний КА:

1—аппарат; 2—тележка; 3—пулт; 4—наклонная поверхность; 5—стопор

ленным объектом с большой скоростью движется вниз; на специальных тележках с закрепленным объектом, разгоняемых по наклонной поверхности (рис. 101); на ракетных тележках, разгоняемых ракетными двигателями или пороховыми зарядами до больших скоростей (от 10 до 3000 м/с) с внезапной остановкой, когда разгоняемая тележка может двигаться по рельсам, на магнитной подвеске или воздушной подушке; на стэндах типа арбалета и т. д. Испытания на одиночный удар проводятся на различных стадиях сборки от узлов до собранного аппарата обычно со включенной бортовой аппаратурой. Проверка на функционирование проводится до, в процессе и после испытаний, также до и после проводится визуальная проверка целостности конструкции.

*Испытания на повторный удар* проводятся на специальных стэндах повторного удара с кулачковыми устройствами или другого типа. Режим испытаний на повторный удар (количество, перегрузки, частота и циклы ударов, после которых проверяется функционирование объекта, длительность испытаний) определяется задачами испытаний. Обычно они производятся при выключенной аппаратуре (проверка до и после испытаний). Частным случаем испытаний на повторный удар являются испытания на транспортировку по специальной программе с имитацией случайных ударов различного вида и вибраций.

*Испытания на длительные линейные перегрузки* являются важным видом динамических испытаний, имитирующим различной длительности воздействия массовых сил на КА. При этих испытаниях проверяется способность систем аппарата функционировать в условиях действующих массовых силовых нагрузок, поэтому они, как правило, проводятся с включенной бортовой аппаратурой. Для испытаний на длительные перегрузки применяют специальные установки — центрифуги (рис. 102), на которых исследуемый объект

*Испытания на одиночный удар с большими ускорениями* (в зависимости от задач испытаний перегрузки могут быть от 3—5 до 25000 единиц) проводятся: путем сбрасывания объекта с определенной высоты в специальных камерах, при этом удар должен приходиться на определенную поверхность испытуемого объекта; на специальных маятниковых стэндах (типа маятникового копра); на специальных рельсовых вертикальных стэндах, когда каретка с закреп-

закрепляется в необходимом положении. Скорость вращения центрифуги определяется по формуле  $n = 300\sqrt{J/R}$ , где  $n$  — скорость вращения, об/мин;  $J$  — задаваемое ускорение, м/с<sup>2</sup>;  $R$  — расстояние от центра вращения до центра тяжести изделия, см. Испытания могут проводиться при различном положении объектов, если это предусмотрено методикой.

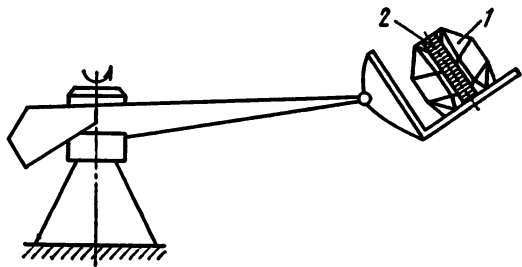


Рис. 102. Схема испытаний на центрифуге:

1—аппарат; 2—стяжная лента

Дальнейшим развитием этого вида являются испы-

тания на специальных установках, обеспечивающих вращение объекта вокруг трех осей (так называемые мельницы), которые проводятся или при неработающей аппаратуре, или работающей, но контролируемой автономно внутри аппарата вследствие трудности коммутации цепей на внешние стенды. Такие испытания могут проводиться и с обитаемыми аппаратами. Отметим, что все виды динамических испытаний могут проводиться и в комбинации с другими видами воздействия на объект (температура, вакуум и т. д.).

*Температурные испытания* в общей системе занимают большое место. Кроме того, что ряд узлов, агрегатов, систем КА при изготовлении проходят соответствующие температурные испытания, собранные аппараты (блоки) также проходят их как при повышенных, так и при пониженных температурах. В зависимости от задач и целей испытаний назначается программа испытаний и режимы температурного воздействия. Различают обычно три типа температурных испытаний: на теплоустойчивость (холодоустойчивость) проводятся в специальных камерах, где создаются необходимый нагрев (охлаждение) до заданной температуры, выдержка при этой температуре и охлаждение (нагрев) до нормальных условий. Выдержка в ряде случаев может быть весьма длительной (до 25 ... 30 сут. и выше). Некоторые системы и приборы остаются включенными и проверяются в течение всего испытания, некоторые подвергаются испытаниям на функционирование до и после испытаний (через 2 ... 4 ч). Испытаниям на теплоустойчивость подвергаются все аппараты. Отметим, что температурные испытания на теплоустойчивость иногда совмещаются с термической стерилизацией аппарата. Испытания на воздействие предельных (высоких или низких) температур проводятся аналогично, изменяется только значение испытательной температуры. Испытания на функционирование могут проводиться одновременно или до и после испытаний. Такие испытания проводят обычно в процессе отладочных и выборочных испытаний. Штатные образцы эти испытания не проходят. Испытания на циклический (повторный) нагрев (охлаждение) и на температурный удар относят часто к динамическим температурным

испытаниям, что зависит от градиента изменения температур. Контроль за функционированием может проводиться как в процессе испытаний, так и до и после испытаний. Число циклов нагрева (охлаждения) может быть от 3 ... 5 до сотен.

При всех температурных испытаниях аппаратов работают системы терморегулирования и фиксируется температура внутри аппарата. Кроме того, после всех термоиспытаний проводится тщательный визуальный (иногда и количественный) контроль целостности теплозащитных покрытий, особенно при имитации аэродинамического нагрева. При проведении температурных испытаний необходимо добиваться аналогии их режимов реальным тепловым нагрузкам, что требует проведения дополнительных исследований тепловых нагрузок КА в эксплуатации. Кроме того, создаваемое температурное поле при испытаниях также должно быть близким к реальному, что связано с выбором источников и способов нагрева испытываемых конструкций. Испытательные системы нагрева должны обеспечивать достижение высоких температур и тепловых потоков с большой плотностью с заданным градиентом и распределением потока по нагреваемой поверхности. Вместе с тем они должны быть достаточно надежны и экономичны, а также должны позволять проводить необходимые измерения и испытания на функционирование в процессе температурных испытаний. В зависимости от способа теплообмена и тепловыделения различают четыре способа нагрева: теплопередача теплопроводностью через контакт источника тепла с поверхностью конструкции; лучистый (инфракрасный) теплообмен между поверхностями источника тепла и конструкции; конвективный теплообмен между теплоносителем (жидкость или газ) и конструкцией; выделение тепла в конструкции при прохождении в ней электрического тока.

Для создания устойчивого режима нагрева, удобства и безопасности температурные испытания проводятся в специальных блоках — термокамерах, оснащенных системами нагрева, автоматического управления нагреванием и регистрации результатов. Разнообразием таких камер, предназначенных для испытаний аппаратов при пониженных температурах, являются криогенные камеры, в которых можно получить температуры до 3 К.

Нужно помнить, что при температурных наземных испытаниях полностью воспроизвести условия нагрева, температурные поля, распределение плотностей тепловых потоков и другие теплофизические условия не удастся, а создаются лишь приближенные (иногда достаточно близкие) условия эксплуатации аппаратов, т. е. это имитационные испытания.

Температурные испытания КА чаще проводят в сочетании с условиями вакуума в специальных термовакуумных камерах для большей аналогии с реальными условиями эксплуатации аппаратов.

*Вакуумные испытания* проводятся по сложной программе с целью определения функционирования различных систем, узлов и деталей в условиях вакуума, проверки герметичности гермообъ-

емов, отсутствия холодного схватывания в подвижных соединениях аппарата, скорости испарения материалов и т. д. Испытания могут проводиться в специальных вакуумных камерах (барокамерах), в которых может создаваться вакуум  $10^{-6}$  ...  $10^{-7}$  гПа (в уникальных небольших по объему установках до  $10^{-13}$  ...  $10^{-14}$  гПа). Вакуумные испытания проводятся как при включенной, так и выключенной аппаратуре. Контроль на функционирование может производиться как в процессе, так и до и после испытаний. Вакуумные испытания могут быть очень длительными (до 30 сут. и более).

*Имитационные испытания на воздействие различного вида излучений* (солнечные излучения, отраженное и собственное излучение Земли, космическая радиация) в чистом виде для собранных КА практически не проводятся, хотя при испытании радиационной стойкости материалов или изучении воздействия излучений на различные элементы, приборы и соединения они проводятся широко (такие исследования проводятся и на борту космических станций длительного использования, например «Салют», «Скайлэб»). Поэтому испытания на воздействие различных излучений (радиационные испытания) составляют целую систему испытаний и исследований при создании КА. Роль их особенно возросла в последние годы в связи с появлением КА длительного использования, для которых радиационная надежность является одним из основных факторов, определяющих срок службы. Для собранных КА радиационные испытания проводятся при комплексных испытаниях в специальных имитаторах космического пространства совместно с термовакуумными.

Кроме рассмотренных, составляющих основу системы испытаний КА, имеется много видов, входящих в программы комплексных испытаний аппаратов, блоков и агрегатов или имеющих самостоятельное значение; многие из них являются обязательными. К ним относятся испытания: на влагоустойчивость, проводимые в специальной влажной атмосфере в течение определенного времени с последующим контролем функционирования (иногда для этого применяют специальные дождевальные камеры); в различных агрессивных средах; на возгораемость и пожароопасность, которые проводятся при определенном составе окружающей среды с имитацией возникновения пожара (перегрузка кабельной сети, нагрев паяных соединений, искусственное искрение и т. д.); в условиях невесомости, программа которых может быть весьма разнообразной, а имитация ее (невесомости) может создаваться при полете специальных самолетов по параболической траектории, при погружении в воду, на специальных стендах с пружинными подвесками и т. д.; магнитные испытания на специальных стендах с целью определения магнитных полей и магнитного момента аппарата. К числу подобных испытаний относятся также модельные испытания по обработке различных операций программы запуска и эксплуатации КА: операции сближения, стыковки, посадки на поверхности других планет, наведения и т. д., которые проводятся на

различных специализированных стендах, имитирующих некоторые условия космоса (невесомость, освещение вакуум и т. д.).

К контрольно-испытательным относятся так же такие работы, как взвешивание и балансировка (часто динамическая) КА, которая проводится на специальных балансировочных стендах. Требования к балансировке КА могут быть очень высокими вследствие жестких допусков на смещение центров тяжести, на центробежные моменты инерции, на наклон главной оси инерции к геометрической оси симметрии КА и другие масс-геометрические характеристики. Для точной балансировки внутри КА должно быть предусмотрено размещение корректирующих грузов; в эти же испытания входит и определение максимальной неуравновешенности аппарата при выработке в условиях эксплуатации расходующихся материалов (топливо в двигательных установках, сгорание теплозащиты и т. д.) и перемещение отдельных элементов конструкции (выдвижение антенн, выносных приборов, раскрытие солнечных батарей и т. д.).

Среди различных методов определения координат центра тяжести изделий отметим метод двух весов, основанный на взвешивании изделия на двух весах, определении их показаний и по их соотношению расчете координат центра тяжести; метод трех весов, основанный также на расчете массы изделия и координат центра тяжести по трем осям по измеренным показаниям трех весов и геометрическим размерам изделия и стенда, а также различные методы с использованием центровочных устройств. Из методов определения моментов инерции изделия наиболее распространены метод колебания физического маятника, основанный на определении периода колебаний качающейся на специальной стойке подвески без изделия и с изделием, и метод колебаний нитяных подвесов (бифиляр, мультифиляр), основанный на определении периода крутильных колебаний мультифиляра (подвески) с закрепленным в специальном приспособлении изделием. Методика проведения контроля геометрических характеристик изделий достаточно сложна и представлена в справочных и методических пособиях (например, Пац И. Н., Жоголь В. Д., Абрамов И. А. «Оборудование сборочно-испытательного производства»).

Особое место среди испытаний КА занимают летные испытания (нештатные запуски и полет!), целью которых может быть проверка отдельных систем и устройств, например проверка аэродинамической формы спускаемого блока, эффективности ТЗП, отражательной способности поверхности аппарата, срабатывание парашютной и двигательной систем мягкой посадки и т. д. Из экономических соображений при летных испытаниях часть аппарата моделируется (кроме испытываемых систем), запуск может осуществляться не на полную высоту (например, до 40 ... 60 км или по баллистической траектории), или вообще заменяется сбросом с самолетов. Ценность летных испытаний в максимальном приближении условий испытаний к натурным. Они проводятся при отработке конструкций новых типов КА.

## 12.4. ИМИТАТОРЫ УСЛОВИЙ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Для собранных КА проводятся комплексные испытания с одновременным воздействием на аппарат ряда факторов космического пространства, например вакуума, нагрева, различных излучений, освещенности и т. д. Для проведения подобных испытаний разработаны специальные имитаторы — камеры, в которых различными способами имитируются условия космического пространства (а также запуска и посадки аппаратов) для воздействия на размещенные в них космические аппараты, блоки, агрегаты, детали. Расчет и создание имитаторов, а также разработка программ и методов имитационных испытаний является крупной самостоятельной проблемой производства КА.

В настоящее время разработано и применяется большое количество имитационных камер различного типа. Классификацию их можно проводить по разным признакам: по габаритам различают камеры малые (объем до  $1 \text{ м}^3$ ), средние (до  $100 \text{ м}^3$ ), крупные (до  $1000 \text{ м}^3$ ), сверхкрупные (до  $10000 \text{ м}^3$ ); по величине достигаемого вакуума: до  $10^{-1}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-9}$ ,  $10^{-11}$ ,  $10^{-14}$  гПа; по сочетанию имитируемых условий: вакуумные камеры, криогенные вакуумные; термобарокамеры (ТБК); ТБК, оснащенные имитаторами солнечного излучения; ТБК, оснащенные имитаторами солнечного и космического излучения и т. д.; по назначению могут быть имитаторы для изучения теплового баланса, для изучения комплексного воздействия нескольких факторов космического пространства, для испытаний ДУ, для изучения вопросов стыковки, пилотирования, навигации, для исследования функционирования отдельных деталей, узлов, приборов, систем, агрегатов и собранных КА, для изучения поведения материалов в условиях космоса, для изучения различных явлений в условиях космоса (трения, холодного схватывания, испарения и т. д.); по степени механизации и даже автоматизации проведения и фиксации результатов испытаний и по другим признакам.

Кроме специфических, предъявляемых к отдельным типам, имитаторы должны удовлетворять некоторым общим требованиям: с максимально возможной степенью точности и соответствия реальным эксплуатационным условиям воспроизводить имитируемые факторы и их сочетания; обеспечивать регулируемость и контролируемость этих факторов по различным параметрам специальной аппаратурой; должны обладать универсальностью, позволяющей проводить аналогичные испытания различных систем разных типоразмеров; иметь возможность удобного и быстрого фиксирования результатов испытания; должны быть оснащены средствами и устройствами проведения различных испытаний на функционирование в создаваемых камерой условиях; позволять максимально механизировать и автоматизировать процессы загрузки камер, подготовки и проведения испытаний, фиксирования результатов с целью сокращения времени и повышения надежности испытаний; во многих случаях должны позволять проведение фото- и киносъемок испытаний; конструкция камер должна иметь высокую стойкость против воздействия создаваемых факторов для сохранения живучести в течение длительного времени; обладать простой конструкции и эксплуатации, экономичностью и безопасностью для обслуживающего персонала.

Наиболее типовыми воздействующими факторами космического пространства, воссоздаваемыми в современных камерах-имитаторах, являются: вакуум и охлаждение до низких ( $3 \dots 5 \text{ К}$ ) температур, солнечное излучение и нагрев, космическое излучение, иногда имитация метеоритных частиц и некоторых других факторов.

Основными требованиями к имитации космического вакуума в термобарокамерах являются: обеспечение требуемого для данных испытаний вакуума; малый коэффициент возврата, т. е. малая вероятность возврата испарившихся молекул на объект; обеспечение заданного состава остаточного газа и отсутствие загрязнений остаточного газа испарениями от элементов установки; максимально возможная скорость откачки и длительное поддержание достигнутого вакуума; возможность сочетания вакуумной системы с имитаторами других факторов, например солнечного и космического излучений.

Современная вакуумная техника имеет много различных насосных и других систем для обеспечения глубокого вакуума (до  $10^{-14} \dots 10^{-13}$  гПа). Для создания сверхвысокого вакуума в настоящее время используются многоступенчатые насосные системы, состоящие из различных типов насосов. Кроме механических насо-

сов ротационного типа, применяемых для достижения вакуума до  $10^{-3}$  гПа, широко распространение нашли различные вакуумные насосы.

В комплексе имитируемых факторов космического пространства имитация теплового режима КА занимает важное место. Из воздействующих тепловых факторов космоса моделируется прямое солнечное излучение в сочетании с вакуумом и наличием абсолютно черного холодного пространства, поглощающего собственное излучение (и испарение) КА. Методы имитации солнечного излучения рассмотрены выше в тепловых испытаниях; космическое пространство имитируется охлажденными (от 3 до 20 К) криогенными панелями, покрашенными в черный цвет, поглощающими до 95% и выше излучений аппарата. В последнее время создаются имитаторы отраженного и собственного излучения Земли с помощью систем газоразрядных ламп, инфракрасных излучателей и рефлекторов, что является хорошим приближением к реальным условиям теплового облучения аппарата.

В комплекс воздействующих факторов, имитируемых в современных испытательных камерах, входит также и космическое излучение. Обеспечение радиационной надежности и стойкости систем, устройств и материалов является важной составной частью общей надежности КА. При составлении программы испытаний КА необходимо учесть радиационную обстановку на предполагаемой орбите в течение срока эксплуатации аппарата. Точное воспроизведение космической радиации с помощью отдельного устройства в настоящее время невозможно: современные ускорители заряженных частиц рассчитаны на получение моноэнергетических пучков, поэтому в установках могут применяться сочетания различных ускорителей. Для этих целей применяются стандартные ускорители ионов и электронов (циклотроны, синхроциклотроны, электростатические генераторы, линейные ускорители и т. д.). Для этих целей могут использоваться ядерные реакции и разнообразные радиоактивные изотопы, которые в сочетании могут воспроизвести значительную часть космического излучения по спектру.

Особое место в комплексе воспроизводимых факторов занимает моделирование процессов соударения аппарата как с отдельными атомами и молекулами, так и с микро- и метеороидными частицами. Методика и средства подобных испытаний пока не отработаны, для разгона искусственных метеороидных частиц из различных материалов (нейлон, металлическая пыль, полимеры) применяются газовые и плазменные пушки, метод взрывающихся проволочек, ускорение в электрических полях и т. д., которые обеспечивают разгон частиц весом до 1 мг до 10...20 км/с и выше.

Для комплексных испытаний небольших КА или отдельных систем испытательные термобарокамеры устанавливают на конце стрелы специальной центрифуги (радиус вращения 20...30 м), на которой кроме инерционных сил (в сочетании с вакуумом и нагревом) могут создаваться вибрации в двух направлениях и акустические колебания.

Кроме описанных выше в специальных имитаторах для комплексных испытаний могут быть и другие устройства, имитирующие условия эксплуатации КА, например вращение, вибрации, раскрытие антенн, солнечных панелей и т. д. Комплексных имитаторов космического пространства и условий работы КА, полностью соответствующих реальным условиям эксплуатации, как по количеству одновременно воздействующих факторов, так и по диапазону изменения режимов пока нет. Положение усложняется тем, что, во-первых, условия космического пространства не являются постоянными, во-вторых, мы недостаточно знаем законы их изменения и даже, может быть, не все факторы, поэтому для расчетов и составления программ испытаний мы принимаем некоторую гипотетическую среду -- модель космоса, которая может быть различной в различных случаях, а режимы испытаний вынуждены назначать с некоторым запасом для компенсации возможных погрешностей и ошибок в модели.

Камеры-имитаторы космических условий по форме могут быть или в виде сферы, или в виде цилиндра, расположенного вертикально или горизонтально, но в некоторых случаях (при большом числе имитируемых факторов) они могут иметь более сложную форму. Размеры камеры зависят от типов испытаний. Большие камеры позволяют точнее моделировать имитируемые условия: в малых камерах любые неравномерности температурного поля или поля излучения оказывают большое влияние на температурный режим объекта. Считается, что размеры камер должны быть в 3...10 раз больше размеров испытуемого аппарата. В настоящее время созданы и создаются имитаторы весьма больших размеров, объе-

мом до нескольких десятков тысяч кубометров, предназначенные для испытания очень крупных космических станций. Компоновка внутри камер устройств для крепления объектов, имитирующих устройств, контрольно-измерительных и управляющих устройств определяется в каждом случае конкретно. Значительное место в компоновке камеры занимают средства защиты и безопасности персонала. Крупные имитационные камеры для испытаний космических кораблей и станций являются уникальными техническими сооружениями.

Так как контроль и испытания занимают весьма большое место в производстве КА, то совершенствование их с целью повышения надежности и снижения стоимости и трудоемкости испытаний является актуальной задачей. Важными направлениями решения ее являются: унификация и стандартизация конструкций испытательных камер и устройств, имитаторов, контрольно-измерительной аппаратуры, методик проведения испытаний с разработкой типовых программ и соответствующих каталогов и альбомов; разработка научных и технологических основ оптимизации стратегии (количества, места, последовательности, объема) контрольно-испытательных работ; автоматизация и механизация проведения контрольно-испытательных работ с разработкой автоматизированных испытательных стендов и универсальных автоматизированных контрольно-испытательных приборов, оборудования и средств измерения; разработка и внедрение методов математического моделирования испытательных работ, методологии и технологии проведения ускоренных испытаний и сокращенных контрольно-испытательных работ с обеспечением требуемой надежности КА, методов и средств, а также новых методологических основ испытаний и контроля перспективных КА; обеспечение технологичности КА, унификация узлов и систем КА, внедрение модульного принципа конструирования, увеличение контролепригодности и контролепригодности конструкции, уменьшение числа контролируемых параметров и т. д.

После заводских испытаний КА направляется на подготовку для перевозки на стартовую площадку, где проходит испытания по специальной программе в монтажно-сборочном корпусе. После установки и монтажа на ракете-носителе КА проходит предстартовую проверку и контроль по специальной программе, после чего КА считается готовым к старту.

Предполетные испытания КА в значительной степени включают в себя те же виды испытаний, что и заводские. После сборки в монтажно-сборочном корпусе (монтажно-испытательном корпусе — МИК) проводятся предварительные испытания на функционирование бортовых систем; в барокамерах на герметичность в условиях глубокого вакуума; динамические испытания, после чего КА направляется на заправочную станцию для заправки топливом (методом массового или объемного дозирования), сжатым газом емкостей высокого давления и заполнения подушек топливных баков после заправки их инертным газом. Затем КА возвращается в МИК, где после пристыковки к ракете-носителю и проверки правильности стыковки и кабельных связей Р-Н и КА проводятся испытания на функционирование заправленного КА. Далее собранная система КЛА с ракетой-носителем транспортируется и устанавливается на стартовой позиции, где заправляется криогенными компонентами топлива и при необходимости термостатируется. После установки и наведения КЛА и подключения к нему наземных коммуникаций проводятся автономные и комплексные испытания на функционирование бортовых систем. После всего этого система Р-Н — КЛА считается готовой к пуску. Конкретная программа предполетных испытаний определяется особенностями системы Р-Н — КА.



## Глава 13. СТЕРИЛИЗАЦИЯ КА

### 13.1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ СТЕРИЛИЗАЦИИ

Одной из специфических работ, проводимых при изготовлении и сборке, является стерилизация КА или отдельных частей. Необходимость стерилизации вызывается достаточно широким развитием запусков КА на другие планеты и опасностью заражения их земными микроорганизмами. Для сведения к минимуму риска заражения планет микроорганизмами и сохранения экологии планет резолюция КОСПАР (комитет по космическим исследованиям при Международном Совете научных союзов) обязывает все государства стерилизовать КА, предназначенные для посадки на планеты, и обеззараживать аппараты, совершающие посадку на Луну.

Проведенные во многих организациях и странах исследования показали, что естественная стерилизация КА в условиях полета в космическом пространстве не обеспечивает необходимого уровня стерильности. Наибольшей способностью к выживанию обладают споры. Исследования показали возможность надежного экранирования спор пылевыми частицами, веществом метеоритов, ржавчиной и т. д. от воздействия космической среды: пленка из хрома или окиси железа толщиной 80 нм надежно защищает споры от воздействия УФ излучения. Исследования показали необходимость тщательной стерилизации КА, особенно посадочных капсул, и разработки требований по уровню стерилизации отдельных запускаемых объектов.

Объектами стерилизации могут быть полностью космические аппараты или их отдельные элементы.

### 13.2. ТРЕБОВАНИЯ К СТЕРИЛИЗАЦИИ

При разработке требований к стерилизации КА исходят из того, что необходимо сохранить собственную экологию планет до высадки человека, когда избежать занесения земных микроорганизмов на эти планеты, видимо, не удастся. Кроме того, вследствие значительной стоимости и сложности стерилизации приходится учитывать экономические факторы и технические возможности современного производства КА как в отношении метода стерилизации, так и в отношении контроля уровня стерильности объекта. С учетом этих факторов, а также принятой вероятности выживания земных микроорганизмов, равной  $10^{-6}$  для Меркурия и поверхности Венеры и  $10^{-4}$  для атмосферы Венеры и всех внешних планет, резолюция КОСПАР установила следующие требования (нормы) к стерилизации КА: вероятность занесения на планету хотя бы одного живого земного микроорганизма посадочным аппаратом должна быть не более  $10^{-4}$ , а вероятность падения на поверхность планеты нестерилизованного пролетного или орбитального аппарата не более  $3 \cdot 10^{-5}$ . Установлено, что нестерилизованные орбитальные аппараты, обращающиеся вокруг Марса, должны находиться на орбите не

менее 20 лет. На основе этих требований национальные организации космических исследований разрабатывают свои в ряде случаев отличающиеся от них требования к стерилизации КА.

Несмотря на отсутствие общепринятых унифицированных методов и режимов стерилизации и контроля стерильности, применяемые методы стерилизации КА обеспечивают выполнение этих требований, в ряде случаев даже с некоторым превышением. Например, КА *MARINER IV*, не подвергавшийся стерилизации, был выведен на такую орбиту, что вероятность его падения на Марс была менее  $3 \cdot 10^{-5}$ , а вероятность попадания микроорганизмов в атмосферу Марса из газов, использовавшихся в управляющих соплах системы ориентации, благодаря двойной фильтрации их не превышала  $10^{-12}$ .

Разработанные в последние годы комбинированные методы стерилизации КА обеспечивают еще более высокие уровни стерилизации их, что позволит осуществить большое количество запусков на планеты Солнечной системы автоматических КА для проведения исследований с минимальным риском заражения планет земными микроорганизмами.

### 13.3. МЕТОДЫ СТЕРИЛИЗАЦИИ

В настоящее время разработано значительное количество методов стерилизации КА, основанных на различных физико-химических способах воздействия и обработки КА. Методы стерилизации можно разделить на естественные и искусственные. Естественная стерилизация основана на воздействии на КА космических условий во время полета в межпланетном пространстве: вакуума, температурных воздействий, солнечной и космической радиации, солнечного ветра. С учетом того, что ряд технологических процессов неблагоприятен для выживания микроорганизмов (в процессе сборки можно принять ряд предосторожностей) и что опасность для заражения других планет представляют лишь микроорганизмы на наружных поверхностях посадочных капсул, которые под действием условий космоса естественно стерилизуются, вероятность заражения планет микроорганизмами чрезвычайно мала. Но, как отмечено выше, искусственная стерилизация, по крайней мере посадочных капсул КА, является обязательной. В настоящее время основными методами искусственной стерилизации являются термическая, химическая и радиационная стерилизация или их комбинация. Разрабатываются и некоторые другие методы.

*Термическая стерилизация* — наиболее распространенный метод. Сущность ее заключается в однократном или многократном нагреве объекта стерилизации до температуры  $150 \dots 160^\circ \text{C}$  в течение определенного времени (от 1 до 300 и более ч) в среде сухого азота или его паров. Преимуществом термической стерилизации является возможность уничтожения микроорганизмов как на поверхности объекта, так и в толще материала, даже внутри герметизированных емкостей и в местах стыков отдельных узлов и

поверхностей, вследствие чего этот метод может использоваться для полной и окончательной стерилизации собранного КА и посадочной капсулы, если высокие температуры не оказывают отрицательного влияния на элементы объекта. Этим объясняется широкое распространение этого метода и включение его в комбинированные методы стерилизации КА. Недостатком термических методов является влияние длительного нагревания на конструкцию КА.

*Химическая стерилизация*, наряду с термической, находит в производстве КА достаточно широкое распространение. Сущность ее заключается в обработке стерилизуемых объектов различными газообразными или жидкими веществами в течение определенного времени и при определенной (обычно невысокой, до 50 ... 60° С) температуре. В качестве химических стерилизующих веществ применяют окись этилена, перекись водорода, бромистый метил, бета-пропиолактон, смесь окиси этилена и бромистого метила, различные фтороуглероды и другие гермицидные соединения. Наиболее распространенными и весьма эффективными из них является окись этилена, но она очень токсична и взрывоопасна при соединении с кислородом, поэтому ее чаще применяют в смеси с бромистым метилом, фреоном-12 (12% окиси этилена и 88% фреона-12 по массе) или другими веществами. Особенности химической стерилизации: она обеспечивает стерилизацию только наружной поверхности объектов, с которой эти химические вещества контактируют, многие гермицидные вещества воздействуют только на определенные группы микроорганизмов. Поэтому химическая стерилизация чаще всего применяется в сочетании (последовательно или одновременно) с термическим методом.

В последнее время для стерилизации КА начинают применять *радиационные методы*, сущность которых состоит в том, что стерилизуемые объекты облучаются в течение некоторого времени (от 1 до 20 ч) УФ, рентгеновскими или другими лучами различной интенсивности и частоты. В некоторых случаях радиационные методы, которые в настоящее время еще недостаточно исследованы, могут оказаться достаточно эффективными по надежности и экономичности. Их недостатком является потребность в мощных (для обеспечения проникающей способности) источниках излучения, что усложняет и удорожает стерилизацию и опасно для обслуживающего персонала; влияние облучения на отдельные элементы, аппаратуру и материалы КА; стерилизация только внешней поверхности объекта с небольшим проникновением в толщу материала оболочек, что недостаточно для полной стерилизации КА.

Рассмотренные основные методы стерилизации наряду с положительными свойствами обладают и недостатками, поэтому чаще применяют комбинированные методы стерилизации. Самым распространенным из них является *термохимическая стерилизация*, которая может осуществляться как последовательно, так и одновременно. Совместное термохимическое воздействие позволяет снизить значение максимальной температуры стерилизации и время обработки.

В последнее время начинают применяться различные *терморационные методы* стерилизации КА: стерилизация КА острым паром (при давлении до  $7 \cdot 10^2$  кПа) в сочетании с высокочастотным облучением (частота 2500 ... 5000 МГц при  $\lambda = 2 \dots 33,0$  см) в специальных герметичных камерах с патрубками для подачи и отвода пара и введения волновода; стерилизация при помощи комбинированного воздействия высокой температуры и  $\gamma$ -излучения, что позволяет сократить время стерилизации в 3 раза, снизить температуру и уменьшить вредное влияние этого процесса на конструкцию КА. Положительной особенностью терморационных методов стерилизации является то, что большинством из них можно стерилизовать пищу и лекарства.

С целью интенсификации процесса химической стерилизации и уменьшения ее продолжительности применяют сочетание стерилизации окисью этилена с действием накладываемых звуковых колебаний частотой 10 кГц или ультразвуковых колебаний частотой 30 кГц и интенсивностью 155—160 дБ.

Для стерилизации труднодоступных поверхностей КА можно применять метод обдува их потоком воздуха или другого газа, которые подвергаются воздействию ультразвуковых колебаний. Процесс стерилизации в этом случае можно интенсифицировать, применяя нагретую до 100 ... 125° С струю азота.

Для стерилизации направляемых газов и жидкостей обычно применяют одно- или двукратную фильтрацию. В настоящее время с целью обеспечения большей стерильности КА, особенно их внутренних полостей, стерилизация которых особенно трудоемка, исследуются возможности применения особых бактерицидных тканей, резин, красок, лаков и т. д.

Для стерилизации пролетных по отношению к планетам КА и для полетов на Луну, когда требования не столь высоки, как к посадочным капсулам, применяются специальные методы очистки и обеззараживания. Очистка производится в различных моющих растворах (дистиллированной воде, спирте), иногда с добавкой поверхностно активных веществ и с наложением ультразвуковых колебаний. Для подобной очистки (обеззараживания) может быть рекомендована также обдувка горячим газом, иногда с наложением ультразвуковых колебаний.

### **13.4. ВЛИЯНИЕ СТЕРИЛИЗАЦИИ НА МАТЕРИАЛЫ, АППАРАТУРУ И КОНСТРУКЦИЮ КА**

Одной из основных проблем при выборе метода, технологии и режимов стерилизации является влияние различных стерилизующих факторов на свойства материалов, аппаратуру и конструкцию, что в конечном счете определяет надежность КА. Влияние термической стерилизации на конструкцию корпуса и его элементов может выражаться в том, что в деталях узлов и агрегатов вследствие многократного нагрева и охлаждения возникают термические напряжения и деформации, особенно в стыках деталей, имеющих

различные коэффициенты теплового расширения, что может привести к ухудшению точности корпуса и появлению внутренних напряжений, снижающих конструктивную прочность его. При конструировании корпусов КА, особенно посадочных капсул, необходимо обеспечивать возможность 4—6-кратного нагрева конструкции до температур 130 ... 150° С без ущерба для служебных качеств КА.

На материалы оказывают влияние различные излучения, стерилизующие химические вещества и нагрев. Влияние излучения на материалы достаточно хорошо изучено. Многократный нагрев, имеющий место при термической стерилизации, на металлические конструкционные материалы влияет незначительно, но может существенно влиять на полимерные, композиционные материалы и полимерные покрытия, резину, лаки и др. Поэтому при назначении в конструкции подобных материалов необходимо учесть их термостойкость до температур 130 ... 150° С без изменения химического состава, структуры и свойств. Действие химических стерилизующих веществ на конструкционные материалы, особенно полимерные, композиционные и т. п., изучено мало, но оно может быть весьма существенным, доходящим до разрушения. Консистентные смазки для трущихся поверхностей в процессе термической стерилизации теряют свои свойства, а при химической стерилизации на поверхности смазки образуется пленка, являющаяся своеобразным барьером, снижающим эффект стерилизации, что необходимо учитывать при назначении ее метода и режимов.

Наиболее существенное влияние стерилизующие факторы оказывают на электронные приборы и аппаратуру бортовых систем КА. Проведенные исследования показали, что в настоящее время большинство радиоэлектронных приборов и аппаратура выдерживает условия стерилизации. Некоторые трудности возникают при стерилизации бортовых РДТТ (вследствие опасности разложения или появления трещин из-за термических напряжений в залитом топливе), пиротехнических и запальных устройств, аккумуляторных батарей и некоторых приборов, что иногда требует изменения их материалов или конструкции. Условия стерилизации должны учитываться при разработке всех систем и конструкции КА с целью получения надежных после стерилизации аппаратов.

### 13.5. ТЕХНОЛОГИЯ СТЕРИЛИЗАЦИИ И СТЕРИЛЬНОЙ СБОРКИ

Технология и режимы стерилизации КА определяются принятой схемой изготовления и сборки и необходимостью выполнения ряда требований: сборка КА должна производиться в биологически чистых помещениях; стерилизация должна производиться строго по утвержденной методике; стерилизованный объект должен помещаться в защитную оболочку, предохраняющую его от повторного заражения; раскрытие биологической защитной оболочки должно производиться за пределами биосферы Земли в условиях, исключающих заражение; любое нарушение установленной методики, тех-

нологии, режимов и правил стерилизации должно исправляться повторной стерилизацией объекта; выбранный метод и режимы должны обеспечивать минимальное влияние на элементы КА, обеспечивая заданную надежность его, удовлетворять требованиям экономичности и безопасности работы персонала; конструкция КА и процесс отделения посадочной капсулы от орбитального объекта должны исключать возможность повторного заражения капсулы газами и отходами от устройств аппарата и предотвратить падение на планету каких-либо нестерильных элементов КА.

Существуют два пути стерилизации КА.

1. Разработка КА с термически и химически стойкими элементами всех составных частей аппарата (материалов, конструкции, приборов, обрودования и т. д.), способными выдержать жесткие режимы, с тем, чтобы стерилизацию проводить однократно без снижения надежности КА в самом конце сборки, после чего аппарат помещать в биологически защитную оболочку и устанавливать на носитель.

2. Проведение стерилизации многократно в несколько этапов, начиная с изготовления деталей и кончая собранным КА, каждый раз снижая общее количество микроорганизмов на объекте, причем сборку систем и КА проводят в биологически чистых помещениях. В этом случае режимы каждой стерилизации и продолжительность их могут быть меньшими, чем в первом случае.

Первый путь, несмотря на относительную простоту, экономичность и т. д., в настоящее время применяется редко, только для очень простых объектов, так как обеспечить термическую и химическую стойкость всех систем КА пока не удается.

Второй путь в настоящее время применяется широко, несмотря на потребность в сложных оборудовании и условиях стерилизации. Выяснено, что процесс сборки представляет собой главную опасность с точки зрения заражения КА, поэтому сборочные работы должны проводиться в биологически чистых помещениях с принятием ряда мер против заражения КА.

Практическая реализация второго пути стерилизации технологически может быть осуществлена тремя способами. 1. Производится стерилизация всех исходных материалов, например термическим методом, и изготовление всех деталей, сборка систем и агрегатов и общая сборка ведется в биологически чистых помещениях; проводится стерилизация на каждом этапе сборки вплоть до окончательной стерилизации собранного КА. Несмотря на высокую надежность стерилизации аппарата в этом случае, стоимость изготовления чрезвычайно высока и технология очень сложна.

2. Изготовление деталей, сборка узлов, систем, агрегатов и их испытания проводятся в обычных условиях, а стерилизации подвергают системы и агрегаты перед окончательной сборкой, которая проводится в биологически чистых помещениях. Собранный аппарат подвергается окончательной стерилизации. Несмотря на меньшую стоимость изготовления и относительную простоту технологии, надежность стерилизации в этом случае наименьшая. 3. Изготовле-

ние деталей проводится в обычных условиях. Изготовленные и поставляемые детали подвергаются первичной стерилизации, а сборка систем и агрегатов, так же как и общая сборка КА, производится в биологически чистых помещениях; на каждом этапе сборки производится стерилизация объектов и окончательная стерилизация КА с уменьшающейся интенсивностью режимов (температур, концентрации химических соединений, длительности и т. д.). В этом случае при приемлемой надежности стерилизации стоимость и сложность процесса значительно ниже, чем в первом способе. Это наиболее распространенный способ.

Технология стерилизации в настоящее время отрабатывается применительно к каждому типу КА. Отработка режимов стерилизации производится экспериментально. При отработке режимов после операции стерилизации детали и агрегаты проходят испытания на долговечность.

Для расчета режимов стерилизации и степени стерильности объектов в последнее время находит применение составление математических моделей, основанных на статистических закономерностях размножения и отмирания под воздействием температур и химических сред микроорганизмов, пока подобные расчетные данные требуют экспериментального уточнения. Математические методы расчета стерильности объектов интересны еще тем, что надежных и точных средств контроля высокой степени стерильности объектов пока нет. Для контроля степени стерильности применяются ряд методов: 1) контроль образцов из нержавеющей стали; 2) обтирание тампонами, смоченными дистиллированной водой; 3) вакуумная проба; 4) распыление материалов и контроль выделяющихся при этом микроорганизмов и др. При применении общепринятых бактериологических методов для оценки степени стерилизации КА или его элементов очень велика вероятность повторного заражения КА, поэтому для штатных КА часто назначают такую продолжительность стерилизации, которая наверняка обеспечила бы заданный ее уровень. Единых рекомендаций по режимам стерилизации КА в настоящее время не существует.

Стерилизация КА вносит в общую технологию их изготовления существенные изменения и добавления. Одним из таких добавлений является проведение контрольных испытаний по стерилизации, или испытаний на соответствие объекта условиям стерилизации. Они проводятся для большинства КА и занимают в общей технологии производства КА такое же место, как испытания на прочность, герметичность, виброустойчивость и т. д. Их проводят как для отдельных деталей, так и для систем и агрегатов и, в ряде случаев, для собранных КА.

По существу испытания на соответствие условиям стерилизации — это проведение предварительной стерилизации на каждом этапе при несколько более тяжелых условиях, чем обычная, с последующим контролем функционирования объекта с целью проверки его устойчивости и пригодности к условиям стерилизации. Эти испытания проводятся для штатных образцов аппаратов. Ме-

тодика контрольных испытаний на соответствие конструкции условиям стерилизации может быть различной (табл. 4).

Таблица 4

Виды испытаний	Этапы, на которых производится испытание			
	типовые испытания материалов, заготовок, деталей	типовые испытания сборочных единиц (узлов)	стерилизация сборочных единиц по технологии	типовые испытания систем
Химическое (смесь окиси этилена с фреоном-12)	6 циклов: 50° С, 28 ч	6 циклов: 50° С 26 ч	1 цикл: 40° С, 24 ч	1 цикл: 40° С, 2 ч; 50° С, 25 ч 2 цикла: 50° С, 27 ч
Термическое	6 циклов: 135° С,  92 ч	6 циклов: 135° С,  64 ч	1 цикл: 125° С,  60 ч	1 цикл: 125° С, 16 ч, 135° С, 53 ч 1 цикл: 135° С, 60 ч

После окончания стерильной сборки всех систем КА проводится стерильная общая сборка КА и стерилизация его, после чего объект помещается в защитную оболочку (биологический барьер) и перевозится на стартовую площадку. При перевозке должна быть обеспечена герметичность защитной оболочки. На стартовой площадке проверяется степень стерильности КА, после чего он подвергается окончательной стерилизации, чаще всего термическим методом в специальных термокамерах. Испытания КА на стартовой площадке должны проводиться в биологически чистом помещении с соблюдением мер против повторного заражения. После установки контейнера на носитель, заправки систем и установки пиростройств проводятся пробы на стерильность и общая проверка готовности без нарушения стерильности КА, при этом время между окончательной стерилизацией и запуском должно быть минимальным. Любые нарушения установленных условий стерильности должны устраняться только повторной стерилизацией.

Как отмечалось выше, сборка узлов, систем и агрегатов, так же как и общая сборка, проводится в специальных биологически чистых помещениях с соблюдением мер, исключающих заражение КА микроорганизмами. Для стерильной сборки создаются специальные камеры, комнаты с подачей биологически чистого воздуха потоком сверху вниз. Класс чистоты помещений оценивается количеством частиц пыли в единице объема воздуха. Сверхчистыми считают помещения с классом чистоты 100. В этих комнатах поддерживается определенная температура (20 ... 22° С), влажность воздуха (45%), подача воздуха осуществляется через специальные



фильтры, имеются специальные дезинфекционные камеры и т. д. Для обеспечения еще более высоких требований чистоты и стерильности при сборке создаются специальные камеры или с гибкими туннелями и наружными скафандрами, или типа перчаточных боксов со специальной атмосферой. Для стерилизации КА создаются специальные герметичные термокамеры или камеры химической или радиационной стерилизации, часто весьма сложные по конструкции и оборудованию. Рабочие при стерильной сборке работают в стерильных комбинезонах, перчатках, масках. Одежда подлежит частой смене и может находиться только в данном помещении. Переодевание производится по специальной программе с водяным и воздушным душем. Контролируется состояние здоровья сборщиков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балакшин Б. С. Основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1969. 550 с.
2. Беляков И. Т., Борисов Ю. Д. Технология в космосе. М.: Машиностроение, 1974. 292 с.
3. Беляков И. Т., Борисов Ю. Д. Технологические проблемы проектирования летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
4. Гаврилов А. Н. Основы технологии приборостроения. М.: Высшая школа, 1976. 328 с.
5. Горбунов М. Н. Основы технологии производства самолетов. М.: Машиностроение, 1976. 260 с.
6. Горев И. И. Основы производства жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1969. 356 с.
7. Григорьев В. П. Технология самолетостроения. М.: Оборонгиз, 1960. 542 с.
8. Грошиков А. П., Малафеев В. А. Заготовительно-штамповочные работы в самолетостроении. М.: Машиностроение, 1976. 440 с.
9. Зернов И. А., Коноров Л. А. Теоретические основы технологии и процессы изготовления деталей самолетов. М.: Оборонгиз, 1960. 631 с.
10. Корсаков В. С. Основы технологии машиностроения. М.: Высшая школа, 1974. 336 с.
11. Кузнецов А. А. Надежность конструкции баллистических ракет. М.: Машиностроение, 1978. 256 с.
12. Маталин А. А. Технология механической обработки. М.—Л.: Машиностроение, 1977. 464 с.
13. Митрофанов С. П. Научные основы организации группового производства. М.—Л.: Машгиз, 1963. 308 с.
14. Сборочные и монтажные работы/В. В. Бойцов, В. П. Григорьев, М. П. Разумякин и др. М.: Оборонгиз, 1959. 476 с.
15. Технологичность конструкций/Под ред. С. Л. Ананьева и В. Т. Купровича. М.: Машиностроение, 1969. 424 с.
16. Технология самолетостроения/А. Л. Абибов, Н. М. Бирюков, В. В. Бойцов и др. М.: Машиностроение, 1970. 598 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие . . . . .	3
<b>ЧАСТЬ I. ОБЩИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ</b> . . . . .	
<b>Глава 1. Особенности и общая характеристика технологии производства КА как разновидности технологии машиностроения</b> . . . . .	5
1.1. Технология машиностроения — наука о производстве (предмет и задачи курса) . . . . .	5
1.2. Понятие о производственном и технологическом процессах и их элементах . . . . .	7
1.3. Типы производства и их характеристика . . . . .	9
1.4. Особенности ракетно-космического производства . . . . .	11
<b>Глава 2. Качество и надежность аппаратов и методы их обеспечения</b> . . . . .	13
2.1. Точность обработки . . . . .	14
2.2. Понятие о базах и базировании . . . . .	33
2.3. Качество поверхности . . . . .	39
2.4. Взаимозаменяемость в производстве КА . . . . .	42
2.5. Понятие о надежности КА . . . . .	57
<b>Глава 3. Общая методика проектирования технологических процессов</b> . . . . .	60
3.1. Особенности задачи проектирования технологических процессов. Порядок разработки, стадии и этапы проектирования . . . . .	60
3.2. Исходные данные для проектирования технологических процессов. Критерии оптимизации . . . . .	62
3.3. Связь технологических процессов с производственной программой. Такт производства . . . . .	64
3.4. Изучение и анализ чертежей, производственной программы и технических условий. Связь чертежа с технологическим процессом . . . . .	66
3.5. Изучение исходных данных и определение вида заготовки . . . . .	67
3.6. Определение количества и методов обработки каждой поверхности . . . . .	67
3.7. Проектирование маршрутной технологии . . . . .	68
3.8. Расчет и назначение припусков и промежуточных размеров . . . . .	71
3.9. Анализ точности обработки и выбор методов контроля . . . . .	73
3.10. Разработка операций технологического процесса . . . . .	74
3.11. Назначение баз и технологическое проектирование приспособлений . . . . .	74
3.12. Выбор оборудования, инструмента и режимов обработки . . . . .	75
3.13. Нормирование операций. Научно-технически обоснованная норма времени. Определение квалификации работ . . . . .	75
3.14. Заключительные этапы проектирования технологического процесса . . . . .	77

<b>Глава 4. Организационно-технические пути повышения эффективности производства аппаратов</b>	79
4.1. Технологичность конструкции аппарата	80
4.2. Понятие о предельных возможностях производства	83
4.3. Унификация, стандартизация и преемственность конструкций	85
4.4. Типизация технологических процессов	88
4.5. Метод групповой обработки	90
4.6. Некоторые другие пути повышения эффективности технологии	92
<b>ЧАСТЬ II. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТИПОВЫХ ДЕТАЛЕЙ, УЗЛОВ, АГРЕГАТОВ. ОБЩАЯ СБОРКА И ИСПЫТАНИЯ КА</b>	96
<b>Глава 1. Изготовление и сборка сборных оболочек корпусов</b>	97
1.1. Изготовление обшивок	97
1.2. Изготовление обечаек	102
1.3. Изготовление деталей силового набора	106
1.4. Сборка панелей	113
1.5. Сборка оболочек корпусов КА	117
<b>Глава 2. Изготовление монококовых и каркасных корпусов</b>	120
2.1. Изготовление монококовых оболочек	120
2.2. Изготовление ферменно-каркасных корпусов	121
<b>Глава 3. Изготовление сборных оболочек корпусов из слоистых панелей</b>	122
3.1. Изготовление и сборка паяных слоистых панелей	124
3.2. Изготовление и сборка клееных слоистых панелей	126
<b>Глава 4. Изготовление оболочек корпусов из монолитных панелей</b>	132
<b>Глава 5. Изготовление и испытания солнечных батарей</b>	138
5.1. Изготовление	138
5.2. Испытания СБ	141
<b>Глава 6. Изготовление ЖРД</b>	142
6.1. Общая характеристика	143
6.2. Классификация	
6.3. Изготовление и сборка камер сгорания с гофрированными про- ставками	144
6.4. Изготовление трубчатых камер сгорания	154
6.5. Изготовление КС с выштамповками	159
6.6. Изготовление КС с фрезерованными пазами	162
6.7. Изготовление и сборка форсуночных головок и форсунок	164
6.8. Общая сборка камер сгорания	169
<b>Глава 7. Изготовление и испытания емкостей и баков</b>	170
7.1. Классификация и материалы баков и требования к ним	170
7.2. Изготовление деталей баков и емкостей	173
7.3. Особенности изготовления и сборки основных типов баков	182
7.4. Система испытаний баков и емкостей КА	190
7.5. Виды испытаний емкостей	192
7.6. Испытания на герметичность	196
7.7. Завершающие испытания и операции	203
<b>Глава 8. Изготовление и испытания трубопроводов</b>	204
8.1. Изготовление трубопроводов	204
8.2. Изготовление сильфонов	211
8.3. Контроль и испытания трубопроводов и сильфонов	216
<b>Глава 9. Изготовление и испытания РДТТ</b>	217
9.1. Конструктивно-технологические характеристики и материалы	
9.2. Общая схема изготовления	219
	279

	<i>Стр.</i>
9.3. Изготовление корпусов . . . . .	220
9.4. Изготовление сопел . . . . .	224
9.5. Сборка и испытания . . . . .	227
<b>Глава 10. Изготовление теплоизоляционных и теплозащитных покрытий КА . . . . .</b>	<b>228</b>
10.1. Изготовление теплоизоляционных покрытий . . . . .	229
10.2. Изготовление теплозащитных покрытий . . . . .	232
<b>Глава 11. Общая сборка КА . . . . .</b>	<b>238</b>
<b>Глава 12. Испытания КА . . . . .</b>	<b>248</b>
12.1. Система испытаний и контроля . . . . .	248
12.2. Классификация испытаний . . . . .	251
12.3. Виды испытаний . . . . .	255
12.4. Имитаторы условий космического пространства . . . . .	265
<b>Глава 13. Стерилизация КА . . . . .</b>	<b>268</b>
13.1. Цели и задачи стерилизации . . . . .	268
13.2. Требования к стерилизации . . . . .	268
13.3. Методы стерилизации . . . . .	269
13.4. Влияние стерилизации на материалы, аппаратуру и конструкцию КА . . . . .	271
13.5. Технология стерилизации и стерильной сборки . . . . .	272
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>277</b>

ИБ № 2229

Камалов Вильсон Сахапович

## ПРОИЗВОДСТВО КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Редактор *Е. И. Кравченко*  
 Художественный редактор *В. В. Лебедев*  
 Технический редактор *Т. И. Андреева*  
 Переплет художника *Е. Н. Волкова*  
 Корректоры: *А. А. Снастина, О. Е. Мишина*

---

Сдано в набор 22.09.81. Подписано в печать 28.05.82. Т-09349.  
 Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная.  
 Печать высокая. Усл. печ. л. 17,5. Уч.-изд. л. 20,54. Тираж 1377 экз.  
 Заказ 2 Цена 1 р.

---

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение»,  
 107076, Москва, Б-76 Строминский пер., 4.

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома  
 при Государственном комитете СССР  
 по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
 Хохловский пер., 7.



