

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации  
Кафедра № 24 - «Авиационной техники»

# ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ЖИВУЧЕСТЬ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Санкт-Петербург  
2010

**Эксплуатационная живучесть** — авиационных конструкций свойство конструкций ЛА обеспечивать безопасность эксплуатации по условиям прочности при частичном или полном разрушении силовых элементов из за усталостных, коррозионных, случайных повреждений...

Наиболее общим представляется определение свойства **живучести**, как способности системы адаптироваться к новым, изменившимся и, как правило, непредвиденным (аварийным) ситуациям, противостоять вредным воздействиям, выполняя при этом свою целевую функцию за счет соответствующего изменения структуры и поведения системы.

Увеличение высоты полета привело к росту избыточного давления в герметических кабинах, что также вызывает циклическое нагружения конструкции самолета.

Вскоре после того, как началась в самом начале 1950-х гг. эксплуатация первых самолетов гражданской авиации с герметизируемыми кабинами, три из них развалились на части в воздухе при странных, непонятных обстоятельствах: два из них вообще в относительно спокойной, не турбулентной атмосфере.

В результате тщательных, кропотливых исследований удалось установить, что причиной скоротечного буквально развала на части летательных аппаратов в воздухе стала усталостное разрушение металлических конструкционных материалов составных частей в результате действия циклических нагрузок замкнутых полостей при их периодически повторяющейся герметизации и последующей разгерметизации.

Предотвращение усталостных разрушений – одна из важнейших проблем авиации.

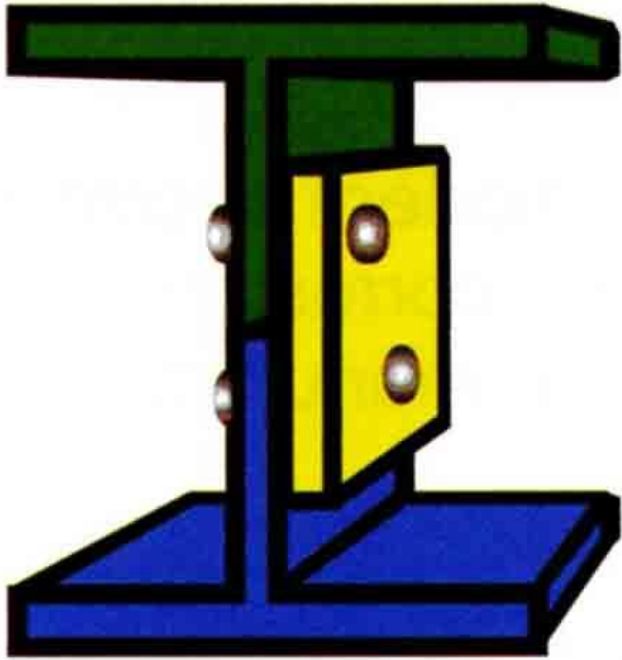
Повышение усталостной прочности конструкции может быть достигнуто несколькими способами.

Наиболее эффективным способом является уменьшение действующих напряжений в элементах конструкции. Но использование этого способа приводит к значительному увеличению массы и применяется поэтому лишь для отдельных наиболее ответственных деталей.

Другими эффективными способами повышения усталостной прочности являются:

- ✓ устранение концентраторов напряжений;
- ✓ ограничение скорости распространения трещин,
- ✓ создание конструкций с несколькими путями передачи нагрузок;
- ✓ правильный выбор материала конструкции.

## Эксплуатационная живучесть



### Fail-Safe Spar

Арепьев А. Н., Громов М. С., Шапкин В. С. Вопросы эксплуатационной живучести авиаконструкций. – М.: Воздушный транспорт, 2002. – 424 с.

Эксплуатационная живучесть включает в себя два принципа:

безопасность разрушения (*fail-safe*) и допустимость повреждения (*damage tolerance*).

**Безопасность разрушения (*fail-safe*)** есть свойство конструкции обеспечивать требуемую (нормируемую) остаточную прочность после частичного или полного разрушения основного силового элемента, которое обнаруживается при частых визуальных осмотрах конструкции.

**Допустимость повреждения (*damage tolerance*)** - это свойство конструкции обеспечивать требуемую остаточную прочность при наличии повреждения до тех пор, пока такое повреждение не будет обнаружено с помощью неразрушающих методов контроля при сравнительно редких периодических формах контроля.

Принцип эксплуатационной живучести обеспечивает повышение надежности летательных аппаратов за счет осмотров конструкции и дает возможность увеличивать их ресурс в 1.5...2 раза по сравнению с принципом **безопасного ресурса (safe life)**, который не допускает образование трещин в эксплуатируемых конструкциях.

Для обеспечения безопасности эксплуатации по условиям живучести должны быть удовлетворены требования по длительности роста усталостных трещин и по остаточной прочности поврежденной конструкции.

На этапе проектирования летательного аппарата эти требования обеспечиваются за счет

- ❖ применения конструктивных материалов с высокими характеристиками *трещиностойкости*,
- ❖ за счет конструктивных и технологических решений,
- ❖ за счет выбора соответствующего уровня напряжений.



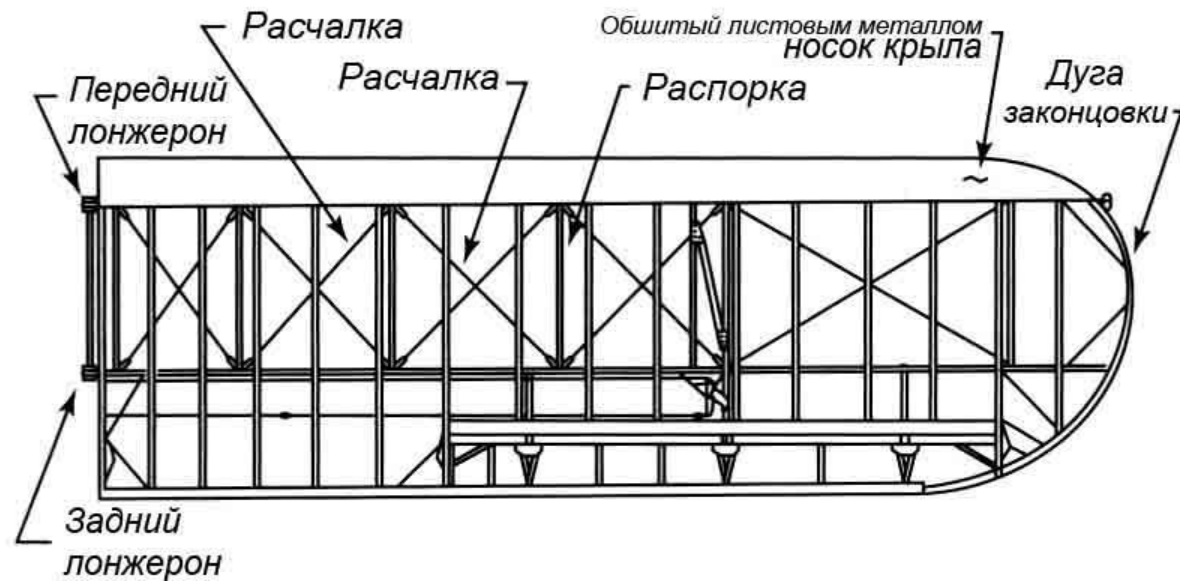
В период эксплуатации летательного аппарата требования к живучести обеспечивается за счет

- ❑ соответствующего **регламента технического обслуживания конструкции** и
- ❑ применения **средств контроля.**

Одной из основных задач конструкторов является – найти и осуществить на практике такие конструктивно-технологические решения отдельных элементов, узлов, агрегатов и систем в целом, которые даже при появлении первых разрушений позволяют летательному аппарату выполнить один или несколько полетов, в зависимости от возможности обнаружения места разрушения.

Такие конструкции и системы обладают **свойством «подождать»**, то есть продолжать функционировать еще некоторое время, если даже появился какой-либо дефект.

Это необходимо для того, чтобы **оптимальным образом спланировать обслуживание по месту и времени без ущерба для эксплуатации.**



Живучесть ферменных крыльев ниже балочных, так как иногда поломка даже одного, а тем более нескольких стержней фермы может привести к общему разрушению.



**Рис. Крыло ферменного типа с неработающей (полотняной) обшивкой**

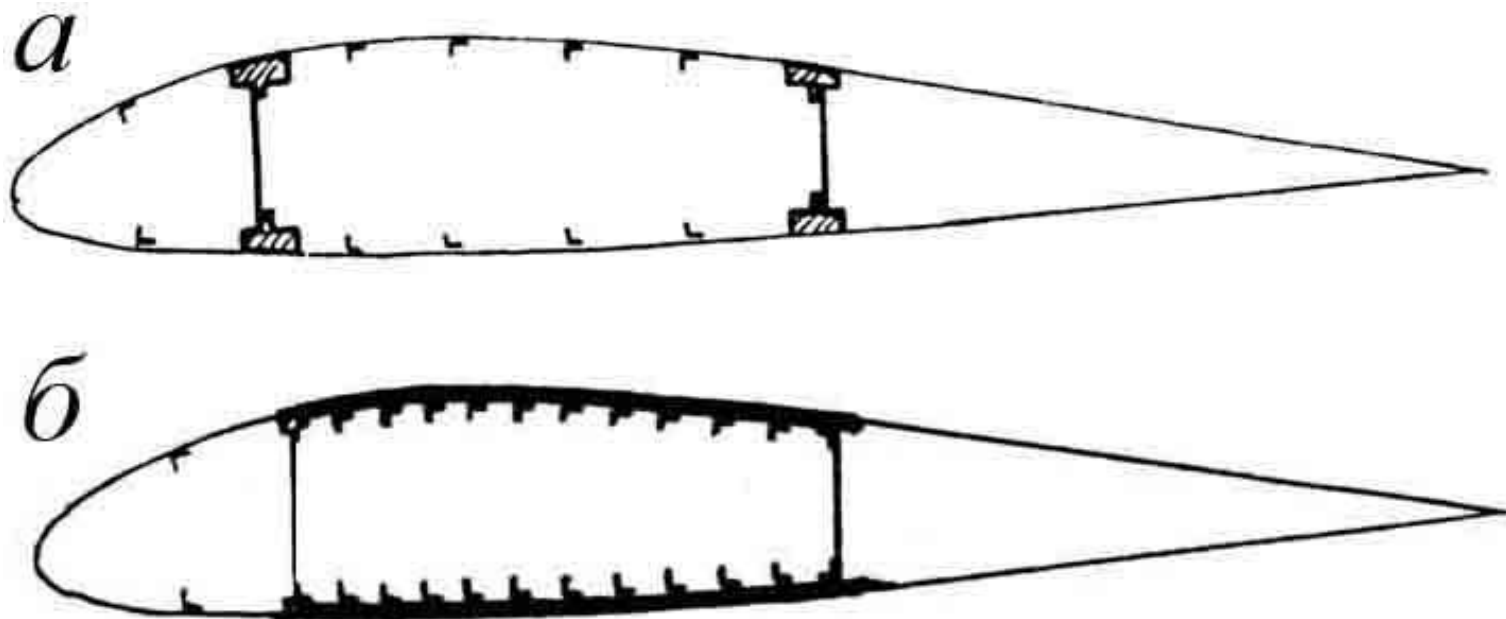


Рис. **Конструктивно-силовая схема крыла:**  
а – лонжеронная; б - моноблочная

Силовая схема крыла называется лонжеронной, если изгибающий момент в основном воспринимается поясами лонжеронов (рис., а). Эта схема, распространенная в начале развития авиации в настоящее время применяется на легких самолетах. Лонжеронное крыло имеет мощные пояса лонжеронов, сравнительно слабые стрингеры и тонкую обшивку.



Рис. Двухлонжеронное крыло

Лонжеронное крыло имеет мощные пояса лонжеронов, сравнительно слабые стрингеры и тонкую обшивку.

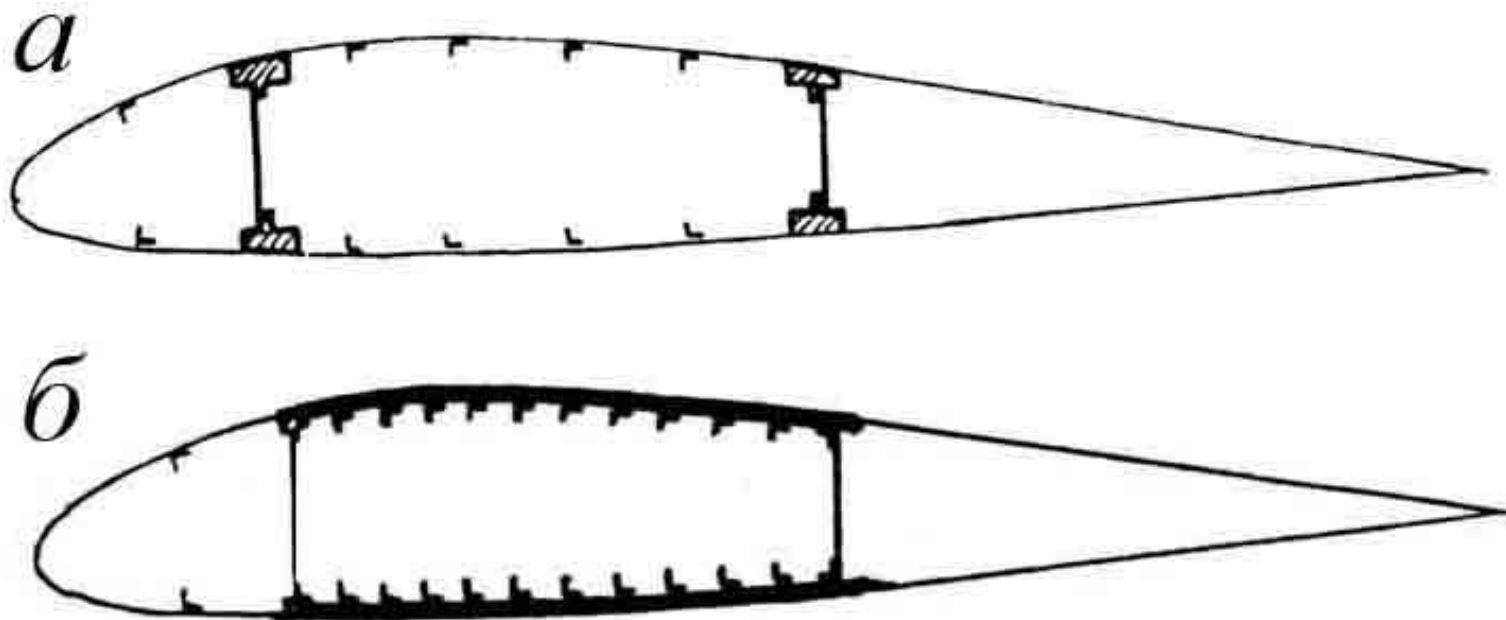
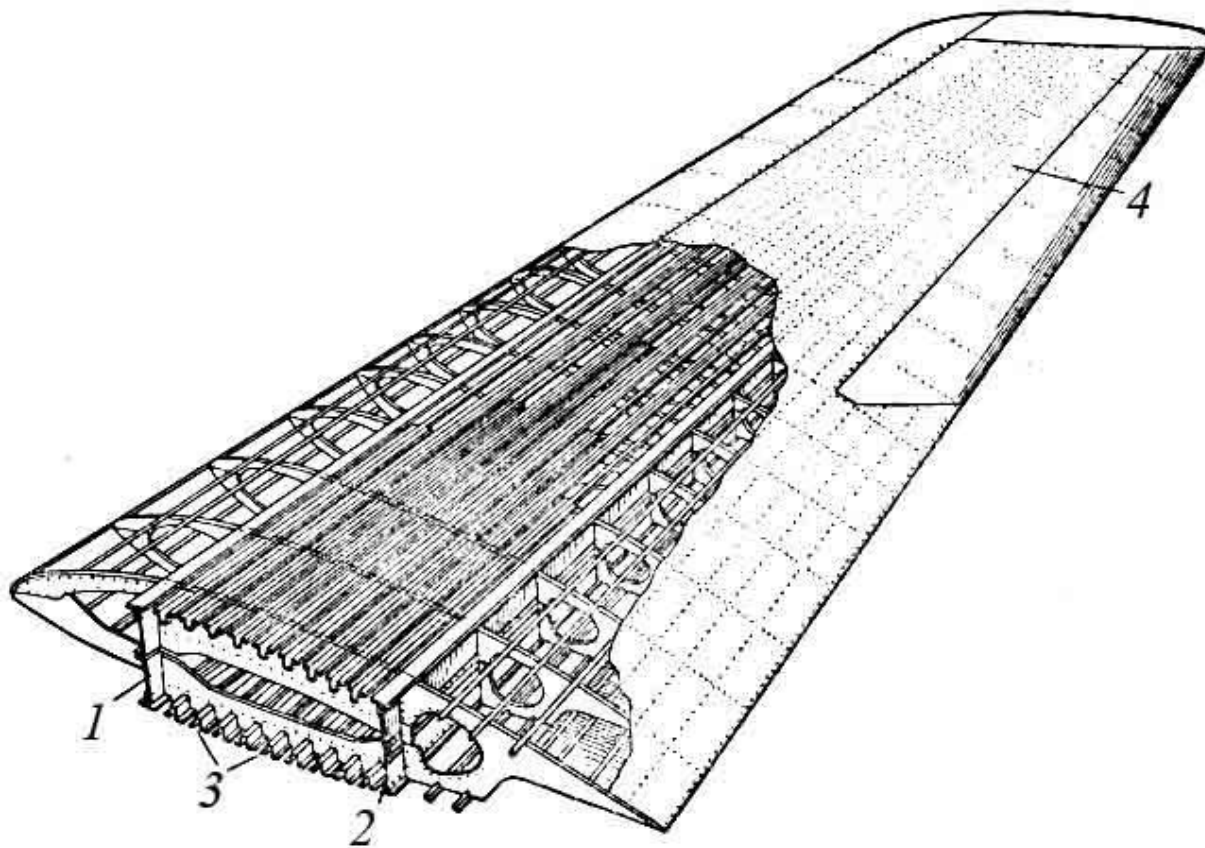


Рис. Конструктивно-силовая схема крыла:  
а – лонжеронная; б - моноблочная

Силовая схема крыла называется моноблочной, если изгибающий момент в основном воспринимается обшивкой и стрингерами (рис., б).



**Рис. Конструкция  
моноблочного  
крыла:**  
1 – передний  
лонжерон; 2 – задний  
лонжерон; 3 –  
стрингеры; 4 -  
обшивка

Моноблочное крыло имеет мощный стрингерный набор, толстую обшивку и сравнительно слабые пояса лонжеронов (площади поперечных сечений поясов того же порядка, что и площади сечений стрингеров).

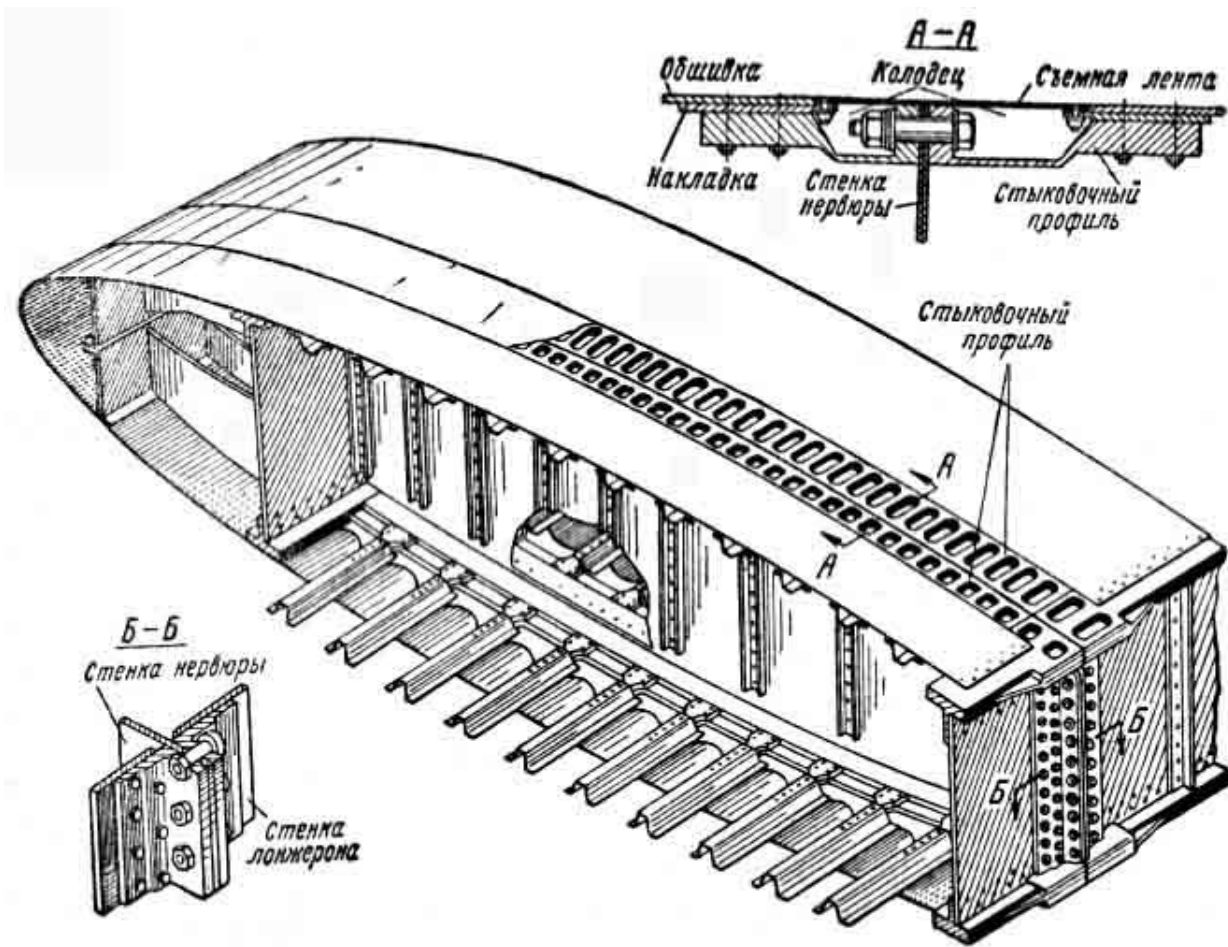


Рис. Конструкция контурного разъема моноблочного крыла

В моноблочном крыле выход из строя части силовых элементов в результате усталостных разрушений или случайных повреждений не приводит к немедленному разрушению всей конструкции. В лонжеронном крыле выход из строя хотя бы одного из поясов лонжеронов, как правило, приводит к быстрому разрушению конструкции.



Характерной особенностью дефектации планера является то, что силовые конструктивные элементы (кроме обшивки) в основном недоступны для внешнего визуального осмотра. Внешними признаками появления неисправностей, связанных с разрушением или появлением остаточных деформаций, может служить в ряде случаев состояние обшивки, где могут появляться волнистости в виде гофра, происходит ослабление и или обрыв заклепок. При обнаружении таких признаков необходимо произвести осмотр конструктивных элементов планера.

При дефектации обшивки особое внимание обращают на выявление усталостных трещин. Для учета повреждений обшивки планера на каждый летательный аппарат ведут формуляр силовых элементов планера, в котором отмечают все повреждения обшивки глубиной более 0,1 мм.

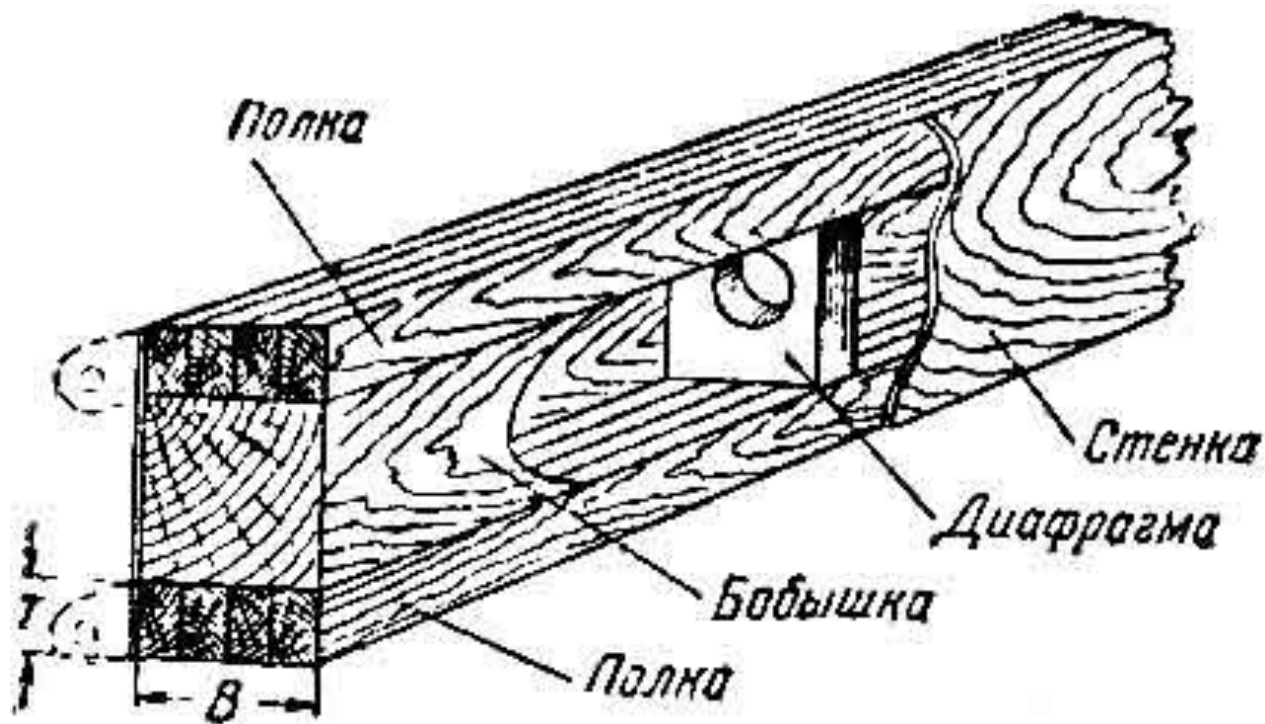


Рис. **Деревянный лонжерон**

Наиболее распространенное сечение деревянных лонжеронов – коробчатое.

Применяемый материал: сосна или ясень для поясов и березовая фанера для стенок. В настоящее время для поясов применяется еще облагороженная древесина – так называемая дельта-древесина. Деревянный лонжерон балочного типа, коробчатого сечения (рис.) состоит из следующих элементов: верхней и нижней полок; фанерных стенок; бобышек; диафрагм.

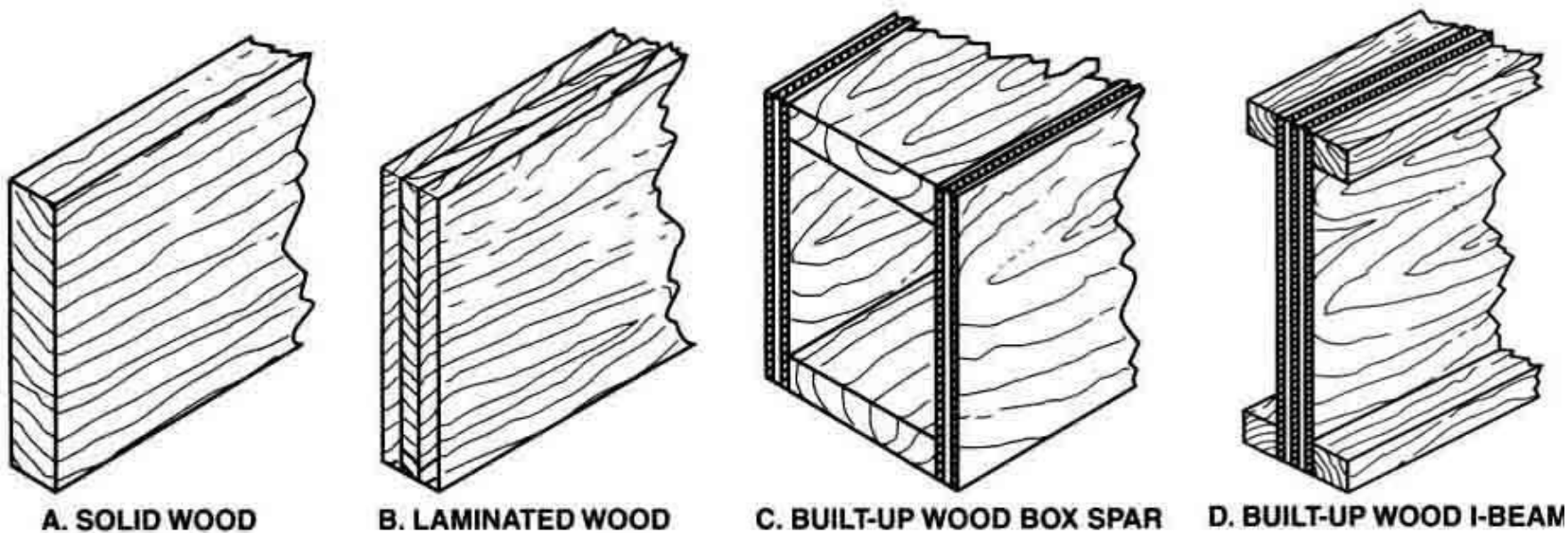


Рис. **Разновидности деревянных лонжеронов:**  
А - из цельного куска; В – клеенный послойно; С – клеенный послойно коробчатый; D – клеенный послойно двутавровый

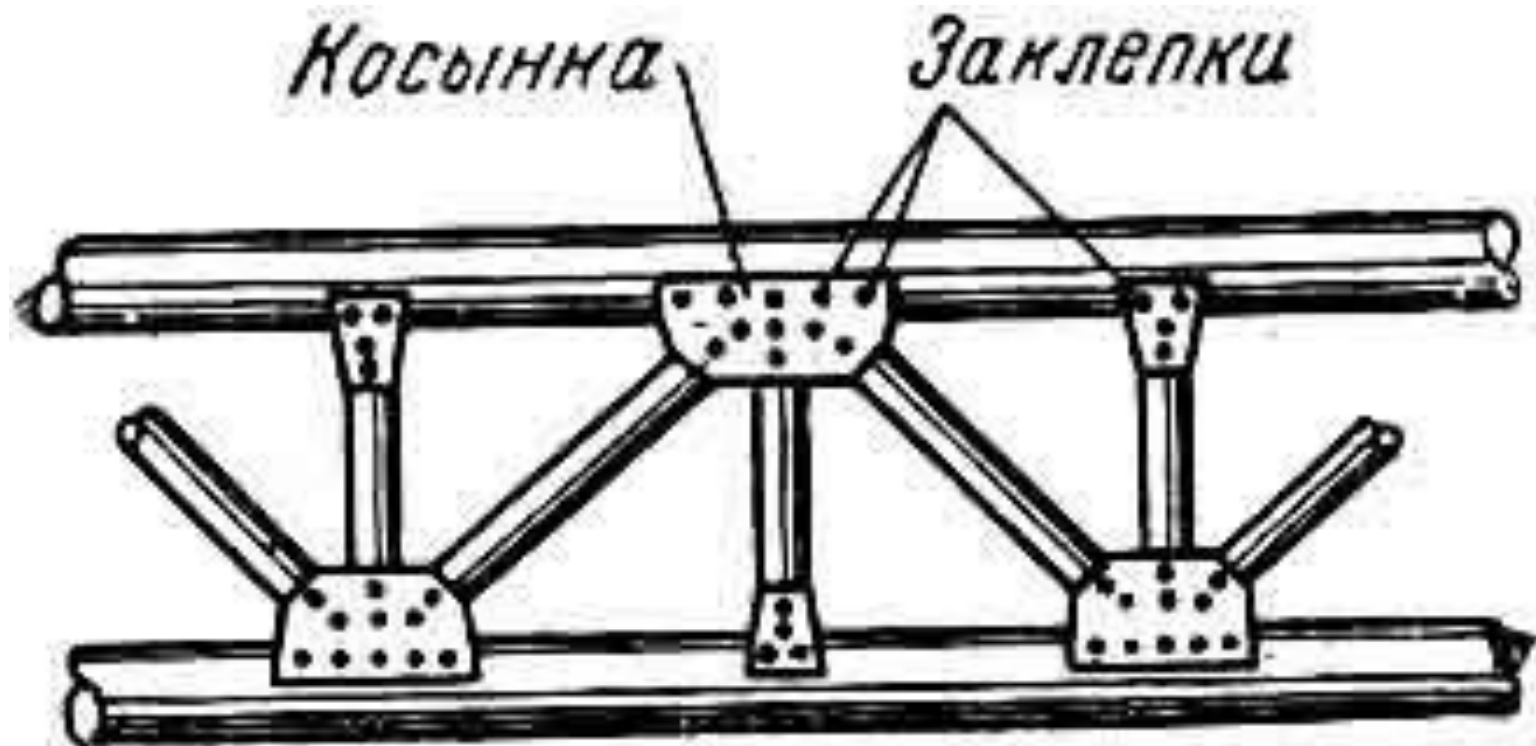


Рис. Ферменный клепанный лонжерон

Здесь элементы решетки («стенки») соединяются с поясами лонжерона при помощи косынок и заклепок

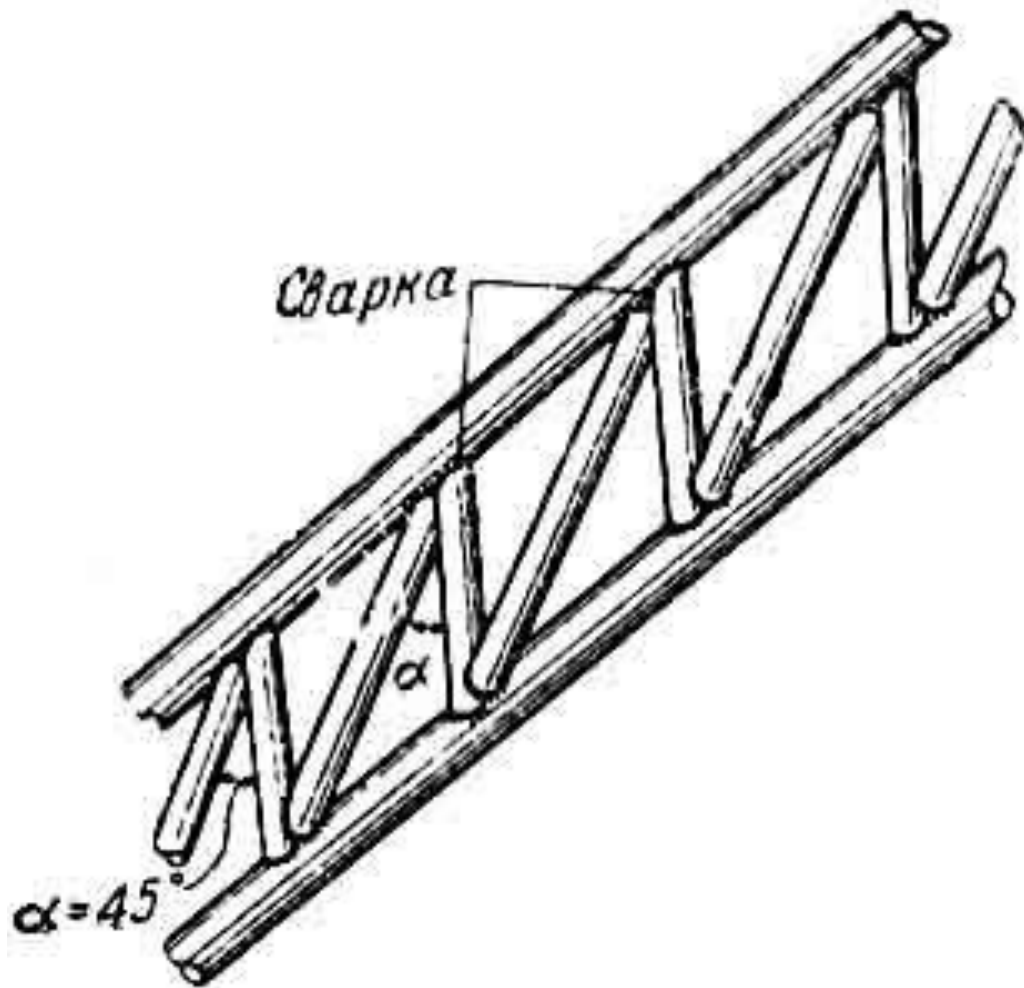


Рис. Ферменный сварной лонжерон

В сварном лонжероне стойки и раскосы припиливаются к поясам и затем привариваются

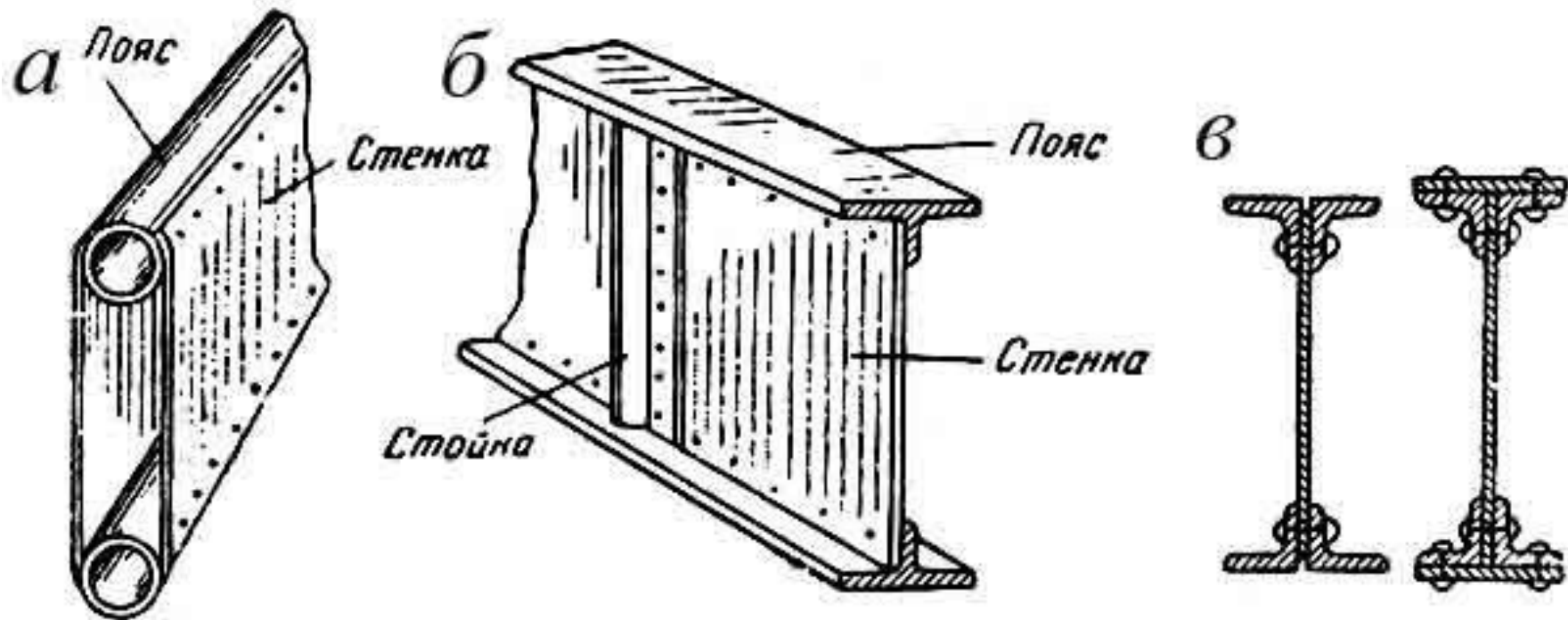


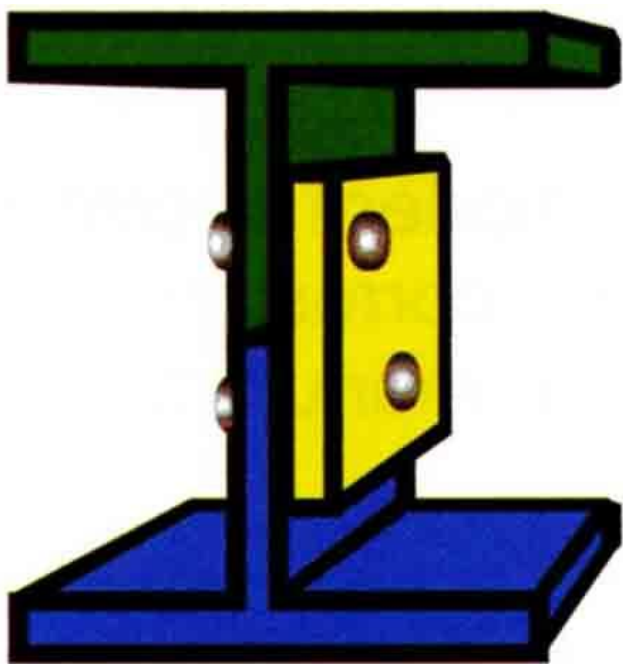
Рис. **Балочный металлический лонжерон:**

а - с поясами закрытого (трубчатого) профиля; б, в - с поясами открытого (уголкового и таврового) профиля

Трубчатые пояса хотя лучше работают на сжатие, но они неудобны из-за того, что в них применяется закрытая клепка, - это усложняет производство, контроль при эксплуатации и ремонте. Поэтому трубчатые (и другие закрытые) пояса в настоящее время почти не употребляются..

Более удобны и распространены пояса открытого профиля.

Материал поясов: цельнокатанная, термически обработанная высококачественная сталь и дюралюмин.



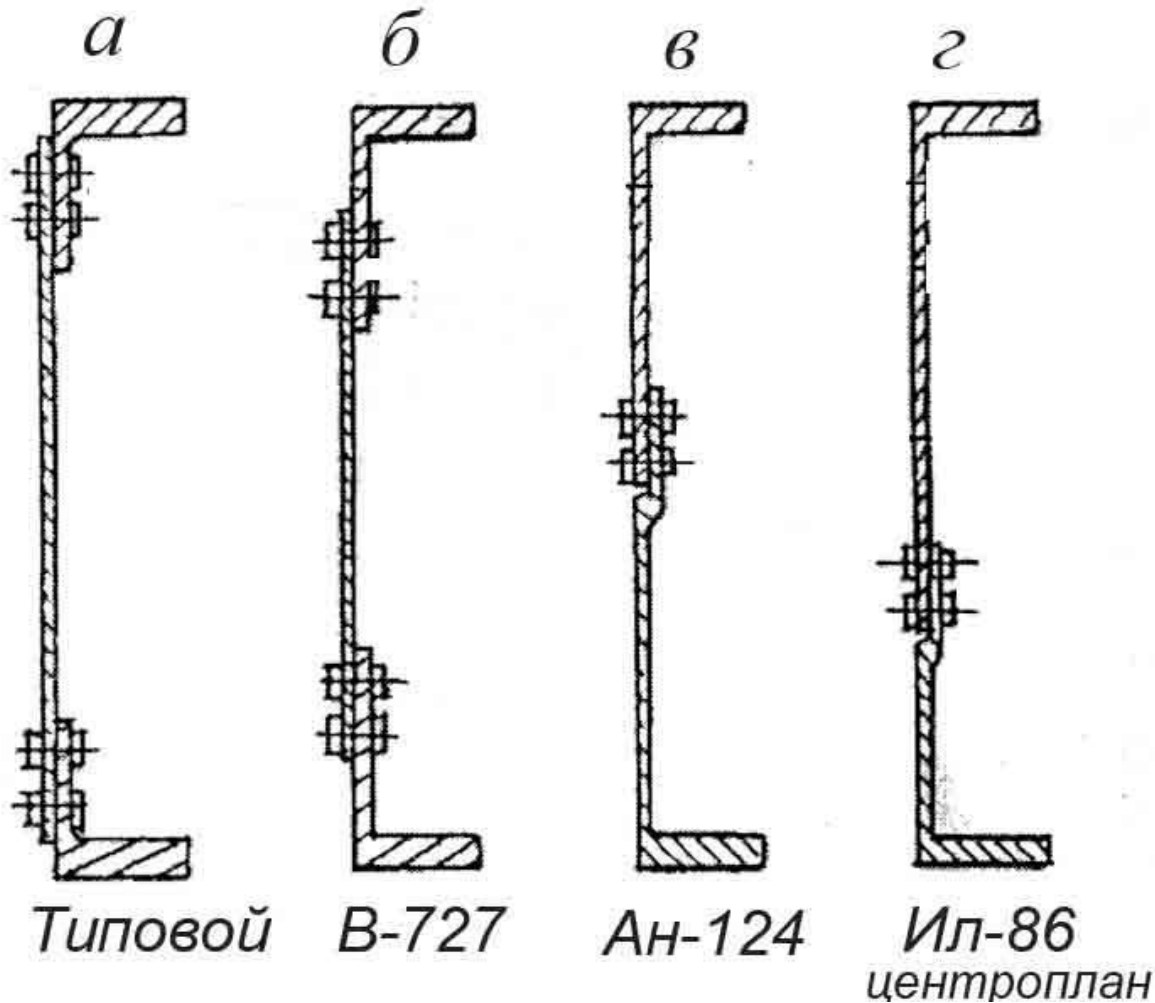
## Fail-Safe Spar

Рис. Сборный лонжерон

**Сборные лонжероны** имеют ряд преимуществ, обосновывающих их применение на современных самолетах:

- более рационально используются конструкционные материалы и имеют высокий коэффициент использования материалы (КИМ);
- обеспечивается принцип безопасности при повреждении, поскольку разрушение одного из элементов, пояса или стенки, не передается на смежный элемент и сохраняется несущая способность лонжерона;
- при повреждении возможен восстановительный ремонт путем замены или установки усиливающих элементов.

Монолитная конструкция не обеспечивает принцип безопасности при повреждении и может эксплуатироваться только по назначенному ресурсу.



На рис. даны примеры сечений сборных конструкций лонжеронов.

Вариант *а* использовался на Ил-18, Ил-62, Ил-76, В-747, А-300;  
 вариант *б* - - на В-747;  
 вариант - *в* - на Ан-124;  
 вариант *г* - на Ил-86 в центроплане.

Рис. Сборные лонжероны



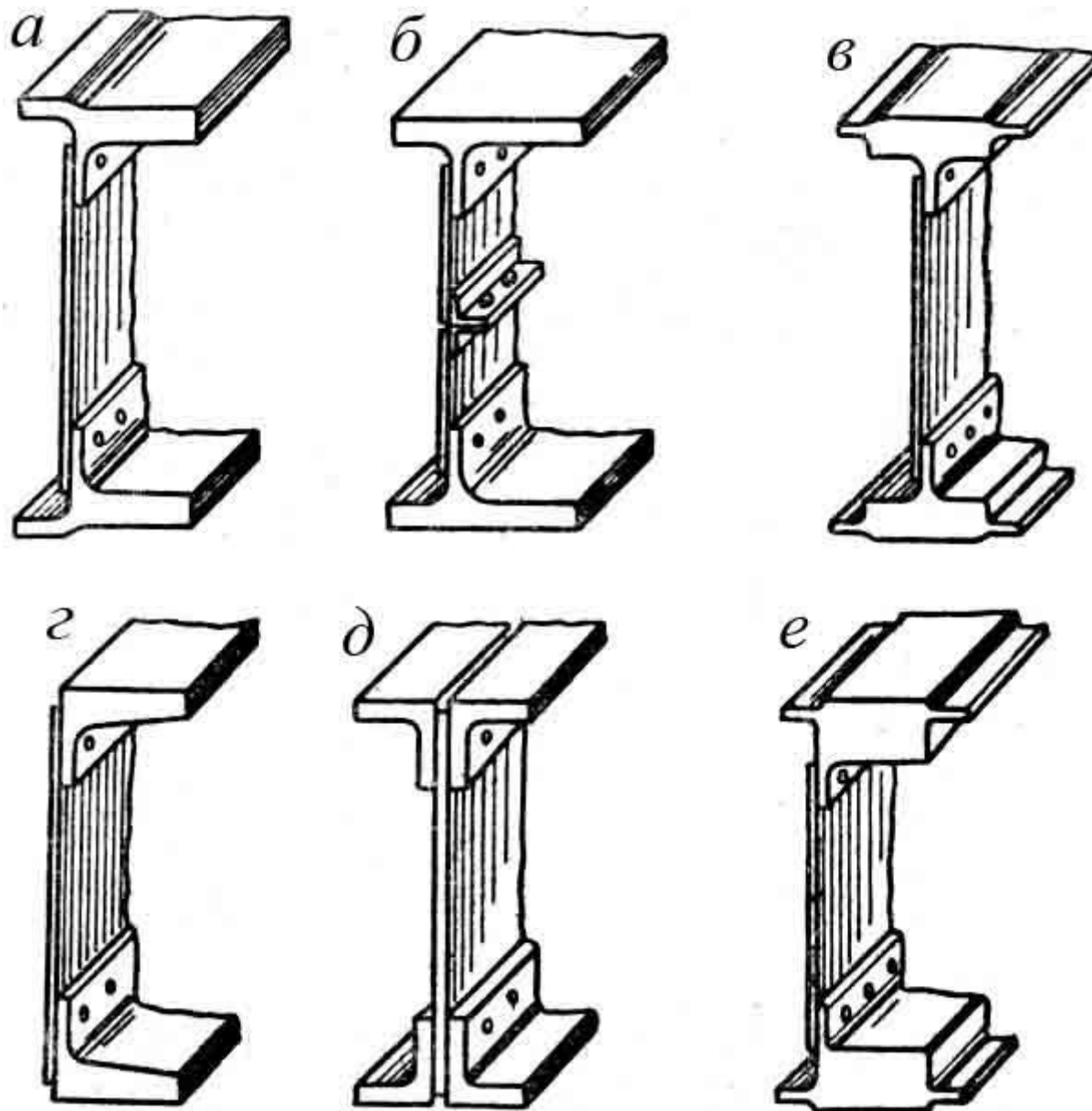


Рис. Типовые сечения балочных лонжеронов

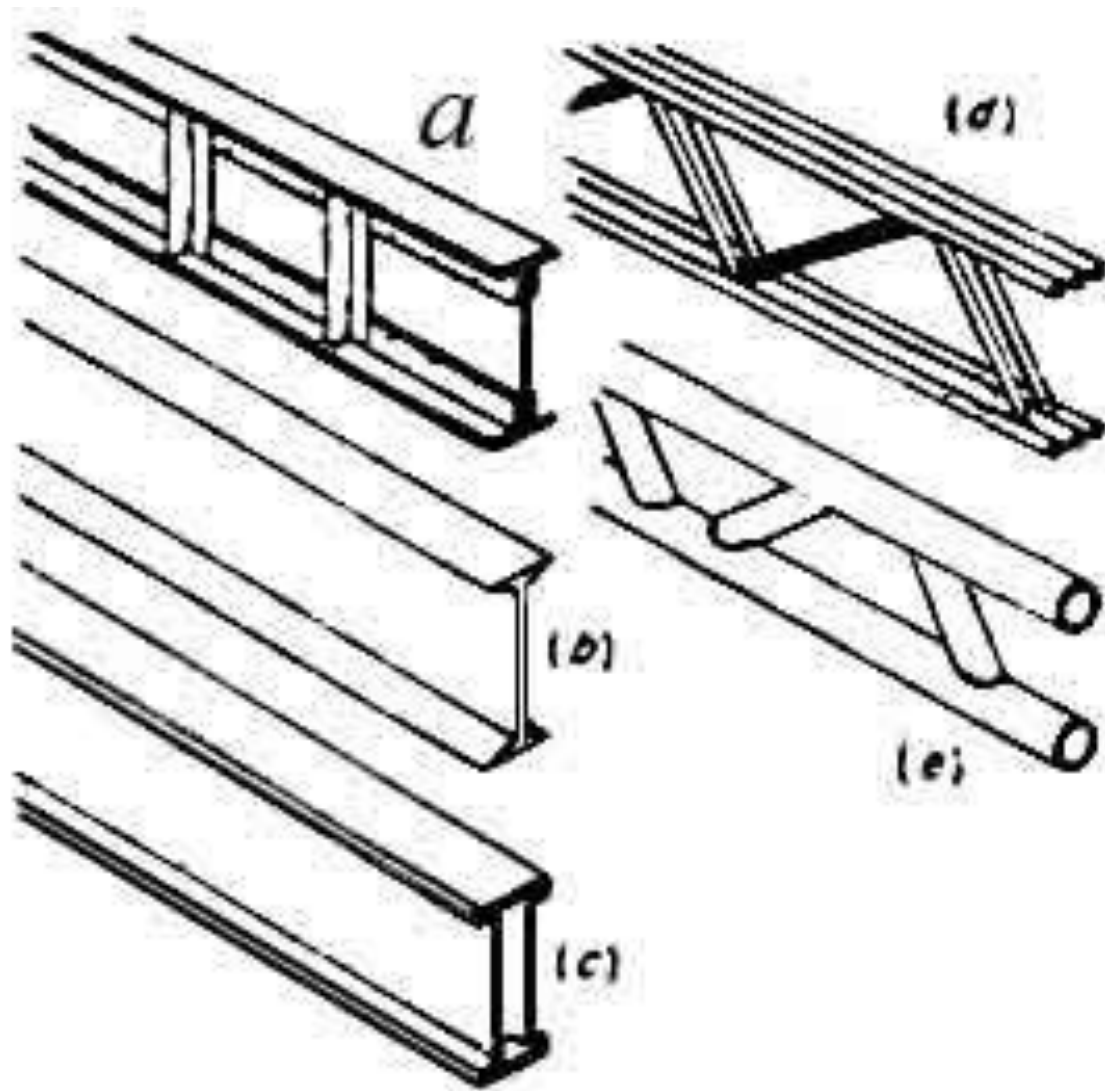
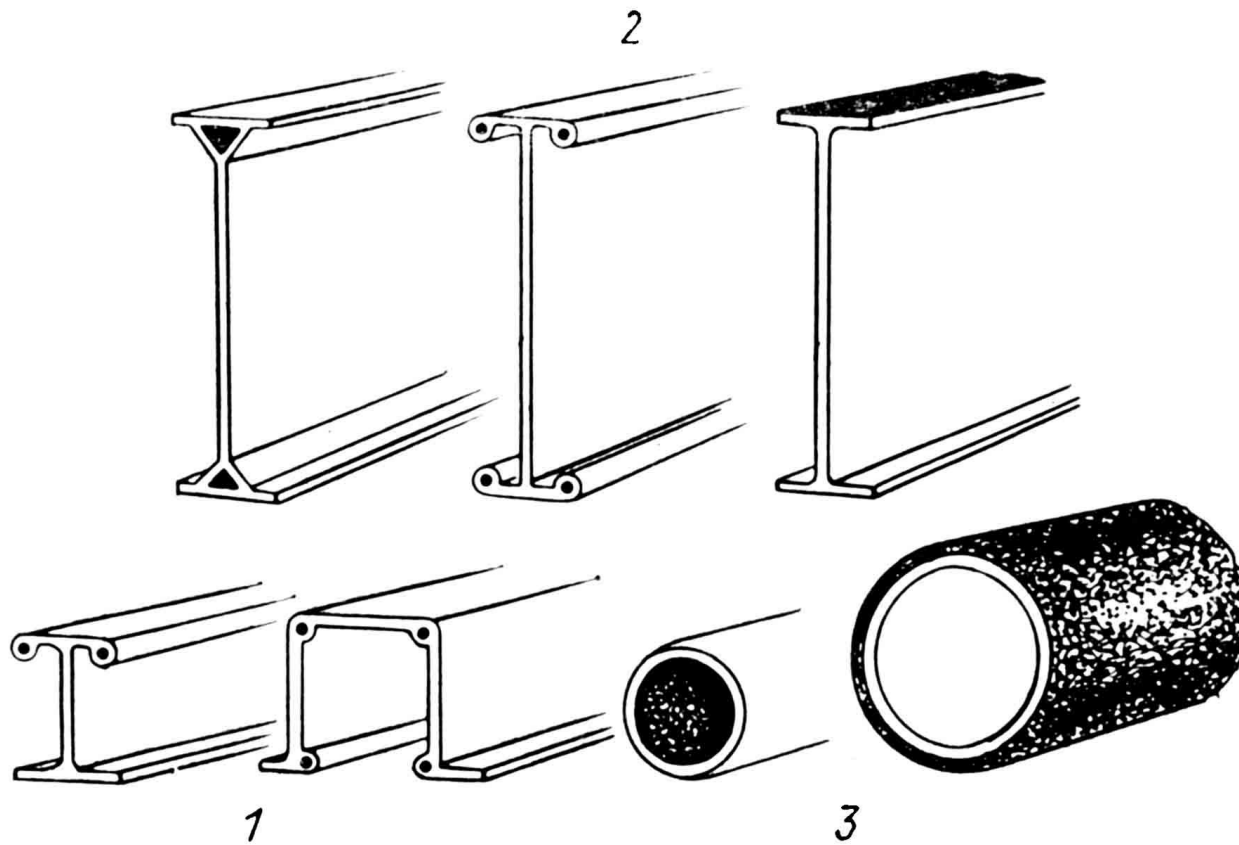


Рис. **Конструкция лонжеронов:**

а – ферменный клепанный; б – балочный прессованный; в – балочный с двойной стенкой; г – ферменный сварной с поясами, стойками и раскосами закрытого трубчатого профиля из нескольких трубок; д - ферменный сварной с поясами, стойками и раскосами закрытого трубчатого профиля



**Рис. Упрочнение эпоксидным угле- и боропластиком элементов конструкции из традиционных материалов:**

**1 – элементы (ребра) жесткости; балки; 3 – стержни, трубы**

Один из путей повышения эксплуатационной живучести деталей из традиционных материалов заключается в локальном упрочнении, при котором они подкрепляются элементами из композиционных материалов в виде накладок и вставок

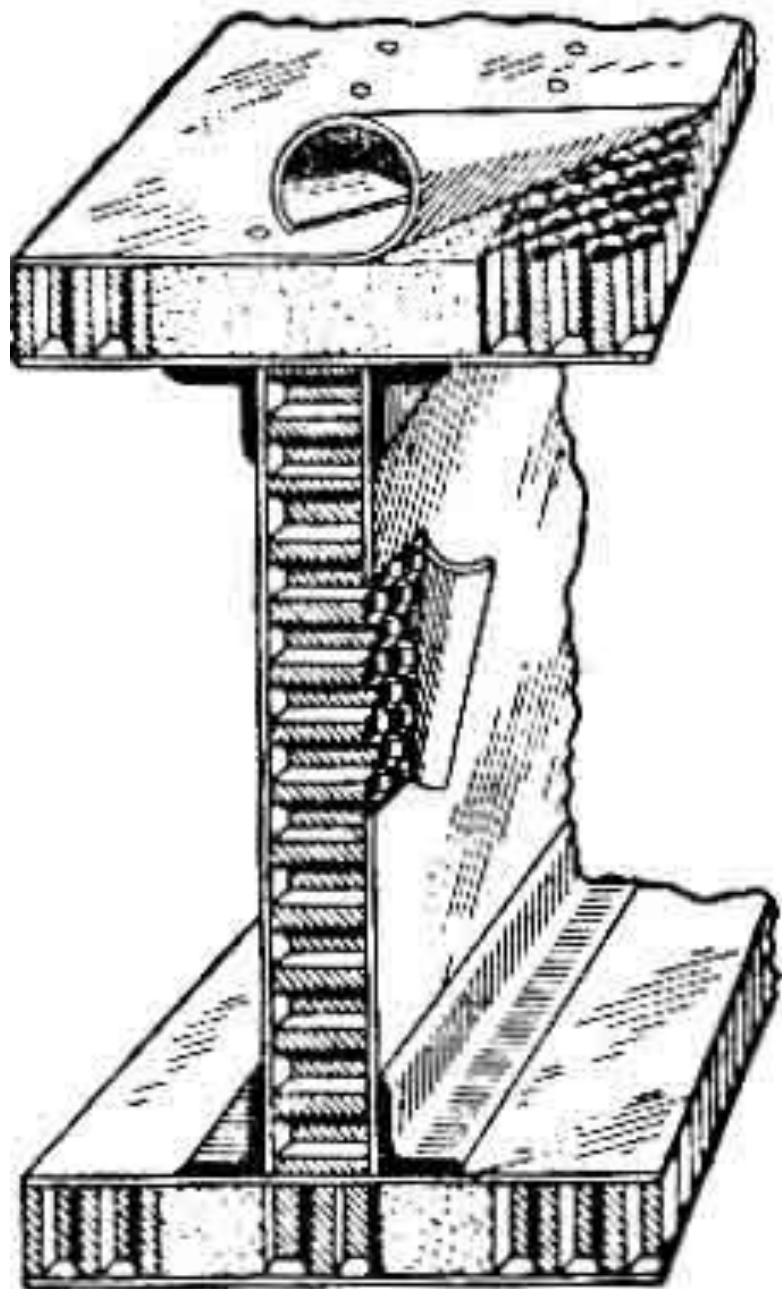
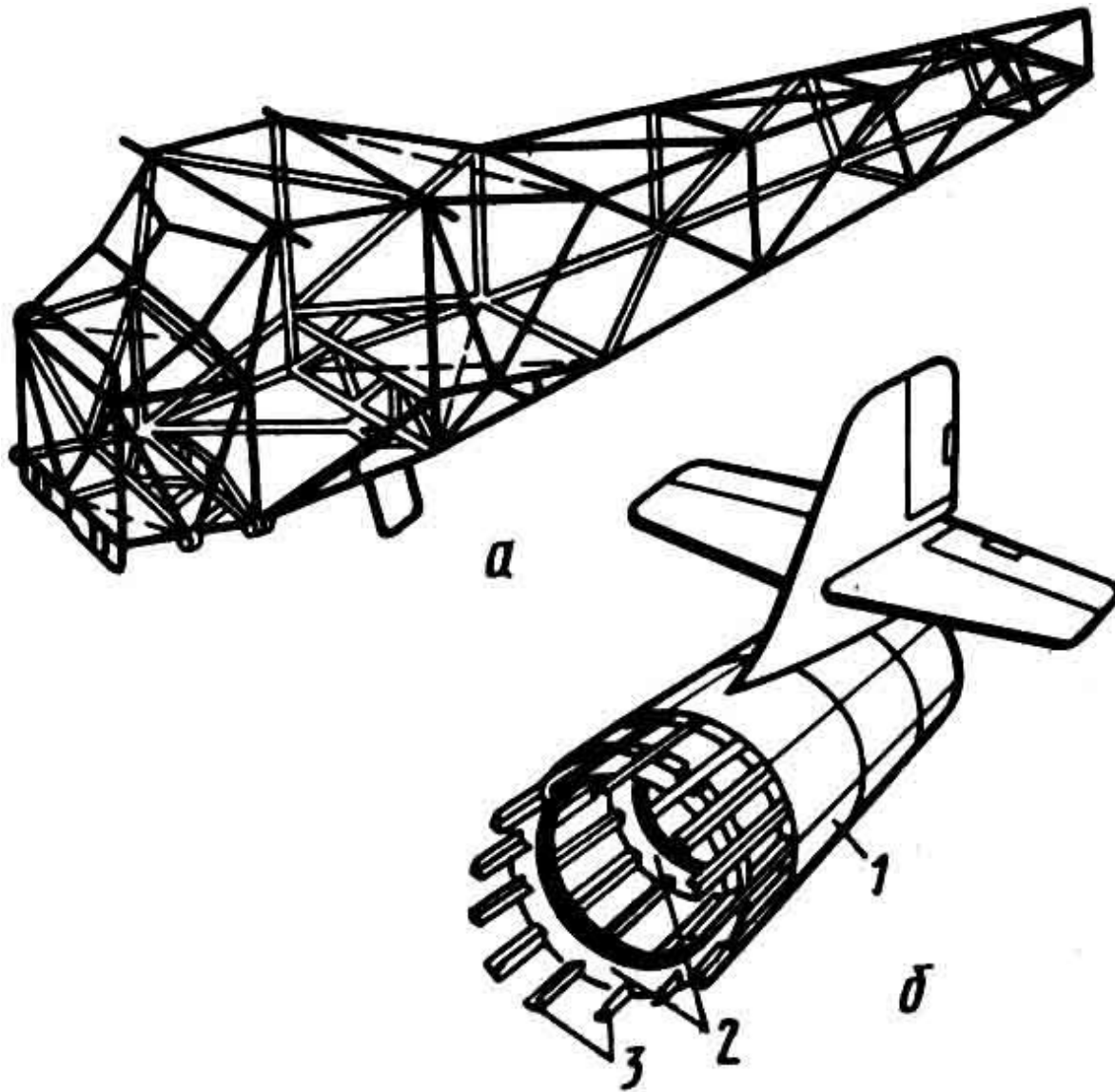


Рис. Конструкция трехслойной обшивки крыла со стенкой лонжерона



По конструктивно-силовой схеме фюзеляжи выполняются двух схем: ферменной и балочной.

Рис. Конструктивно-силовые схемы фюзеляжей:  
а – ферменного; б – балочного; 1 – обшивка; 2 – шпангоут; 3 - стрингер



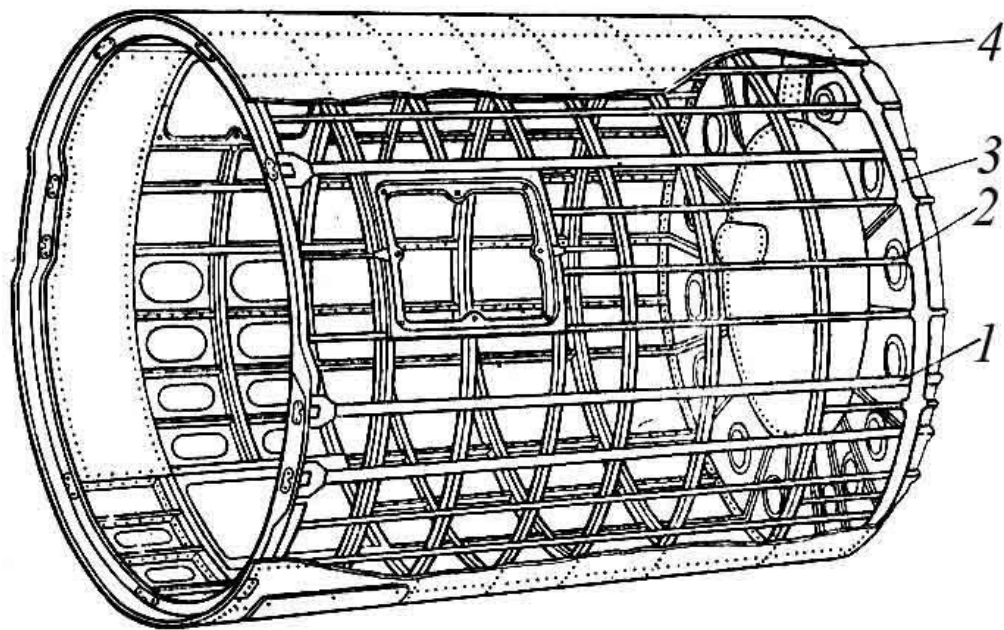


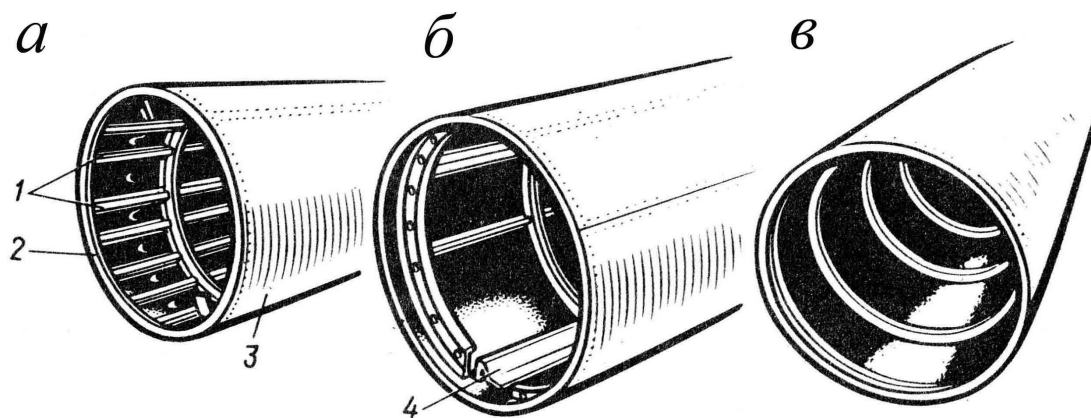
Рис. Балочный фюзеляж:

1 – лонжерон; 2 – стрингер; 3 – шпангоут; 4 – обшивка

Стремление придать фюзеляжу хорошие аэродинамические формы, получить высокое качество поверхности, создать при малой массе прочную и жесткую конструкцию, которая обладала бы высокой живучестью и позволяла бы полностью использовать внутренние объемы, привело к широкому распространению балочных фюзеляжей.

Конструкция балочного фюзеляжа состоит из жесткой обшивки, продольного набора (лонжеронов и стрингеров) и поперечного набора – шпангоутов.





**Рис. Конструктивные схемы балочных фюзеляжей:**

а – полумонокок стрингерный; б – полумонокок лонжеронный; в – бесстрингерный (монокок); 1 – стрингеры; 2 – шпангоут; 3 – обшивка; 4 – лонжерон

Все балочные фюзеляжи в зависимости от степени участия в силовой работе отдельных элементов можно подразделить на лонжеронные и стрингерные (фюзеляжи типа полумонокок) и бесстрингерные (фюзеляжи типа монокок).

Фюзеляжи полностью выполненные по схеме монокока, встречаются редко, так как для компенсации выреза в бесстрингерной обшивке требуется установка усилений, значительно увеличивающих массу конструкции.



Для обеспечения усталостной прочности конструктивных элементов планера необходимо значительно усиливать стенки конструкций особенно в зоне вырезов под окна и двери либо установкой накладок – дублеров (rip-stop doublers), либо увеличением толщины стенки.

Для обеспечения усталостной прочности конструктивных элементов планера необходимо значительно усиливать стенки конструкций особенно в зоне вырезов под окна и двери либо установкой накладок – **дублеров** ( **rip-stop doublers** ), либо увеличением толщины стенки.

При периодическом техническом обслуживании производят осмотр силовых элементов планера после вскрытия соответствующих панелей, люков и других элементов.

Для обеспечения эксплуатационной живучести конструкции гермокабины фюзеляжа без увеличения его веса часто применяется двухслойная конструкция, состоящая из обшивки и приклеенной к ней дублера – тонкого листа выполненного в виде решетки (**дублер-решетка**), которые вместе образуют слоистую оболочку гермокабины фюзеляжа.

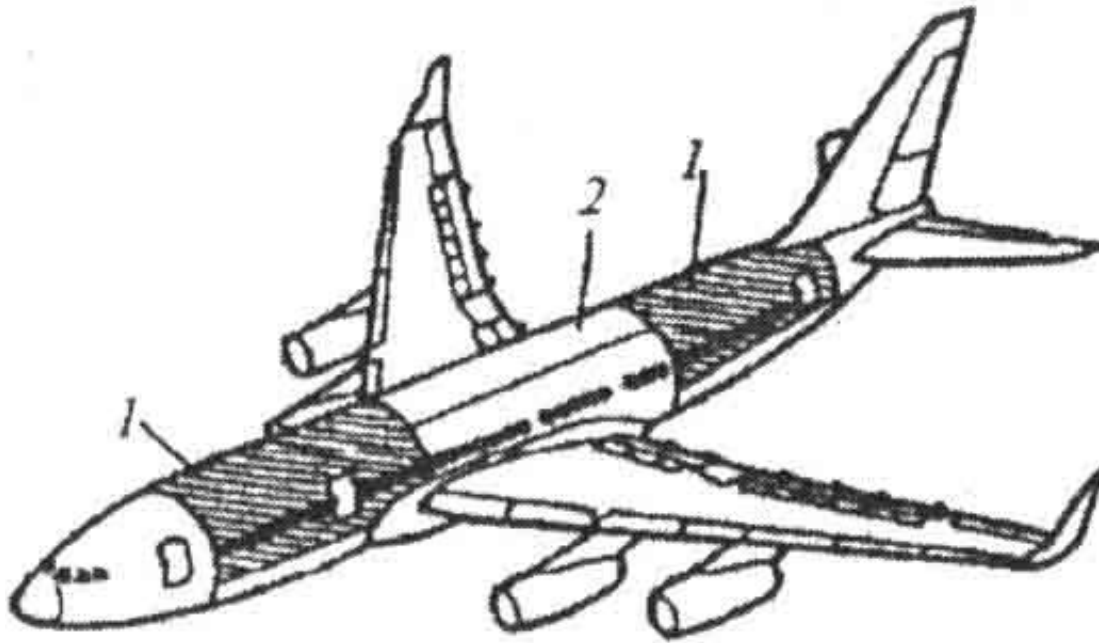
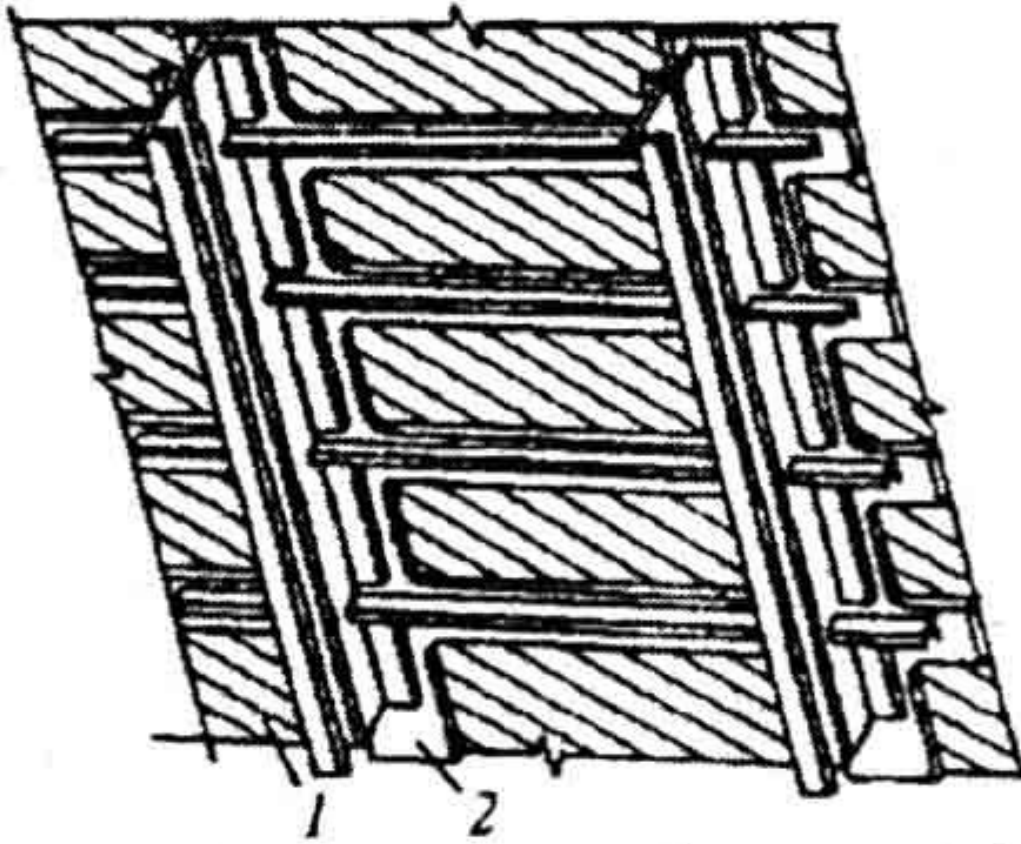


Рис. Зоны применения на:  
1 – слоистых оболочек (дублер-решеток);  
2 – фрезерованных панелей.

Из такой слоистой оболочки может быть выполнена вся поверхность гермокабины либо только ее верхняя часть. В последнем случае слоистая оболочка может располагаться по всей длине гермокабины либо только в носовой и хвостовой частях, как показана на рис.



Общее представление о конструкции такой слоистой оболочки дает рис.

Рис. Типовая панель обшивки с дублером-решеткой (вид изнутри кабины):

1 – обшивка; 2 – дублер-решетка

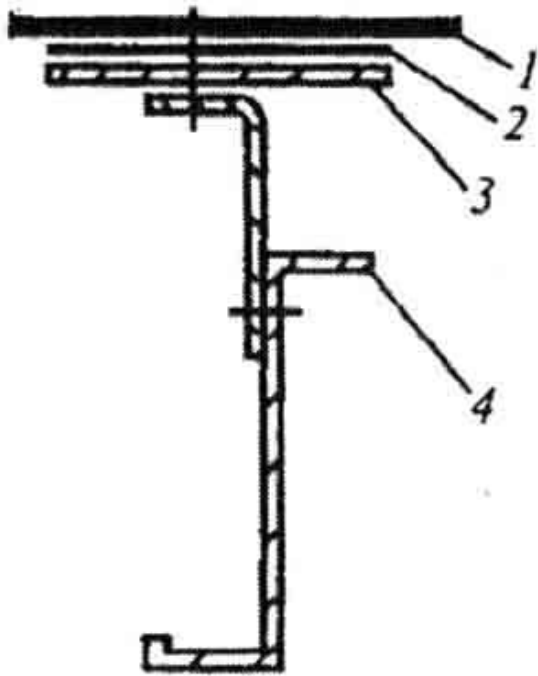


Рис. Типовое расположение с дублера-решетки под шпангоутом:

1 – обшивка; 2 – клей; 3 - дублер-решетка (ширина в пределах 70 мм при толщине 1,2 мм); 4 – типовой шпангоут

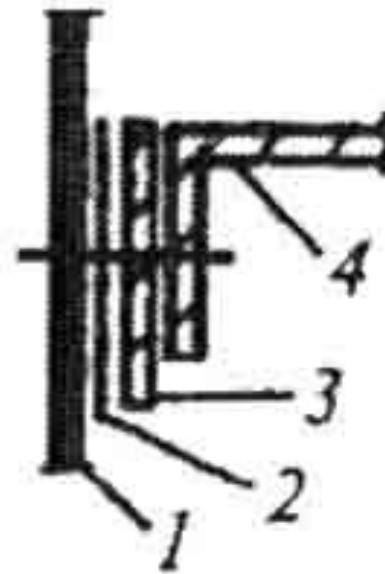


Рис. Типовая расположение дублера-решетки под стрингером):

1 – обшивка; 2 – клей; 3 - дублер-решетка (ширина в пределах 35 мм при толщине 1, 2 мм); 4 - стрингер

Дублер-решетка расположена на внутренней поверхности обшивки вдоль поперечных и продольных элементов каркаса фюзеляжа (рис.).

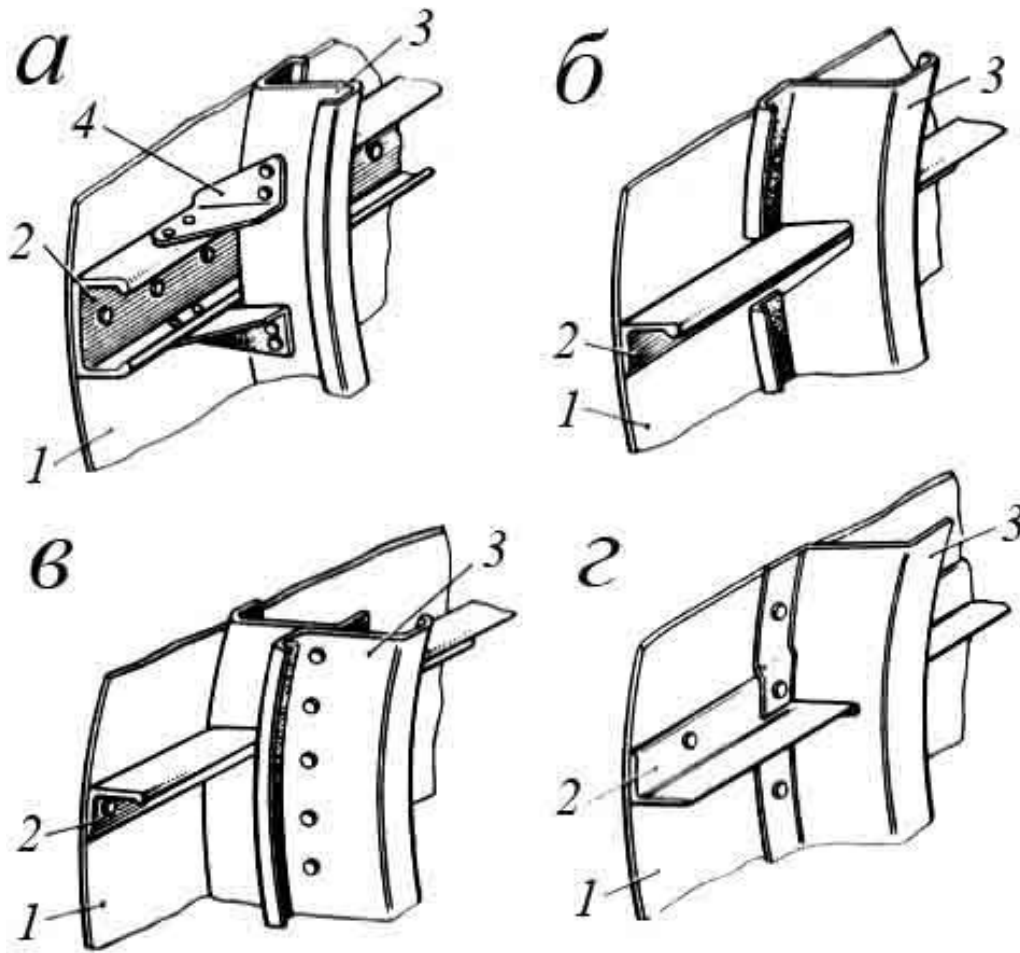


Рис. **Виды сопряжения шпангоутов и стрингеров:**

а - крепление обшивки только к стрингерам; б, в, г – крепление обшивки к стрингерам и шпангоутам; 1 – обшивка; 2 – стрингер; 3 – шпангоут; 4 – фитинг (уголковая накладка – технологический компенсатор)

Могут применяться два вида взаимного сопряжения нормальных шпангоутов, неразрезных стрингеров и обшивки.

1. Шпангоуты соединяются с обшивкой не непосредственно, а через стрингеры (рис., а). Стрингеры крепятся к шпангоутам с помощью компенсаторов. Такое сопряжение позволяет упростить технологию сборки фюзеляжа.
2. Шпангоуты непосредственно соединяются с обшивкой (рис. б, в, г), Для прохода стрингеров в шпангоуте делаются вырезы.

Такие шпангоуты (рис., **б, в, г**) лучше подкрепляют обшивку (повышают ее критические напряжения), Кроме того, в этом случае шпангоуты способны ограничивать распространение усталостных трещин, повышая, таким образом, **живучесть конструкции.**



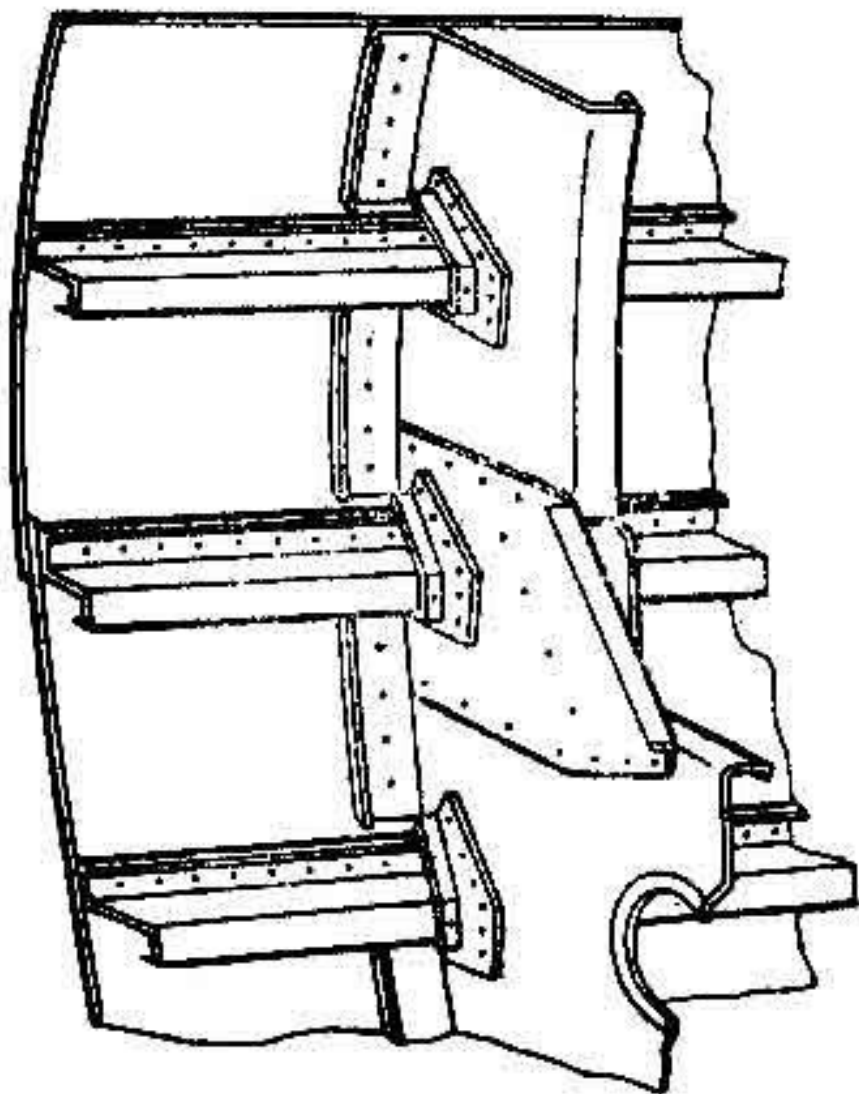


Рис. Подкрепление выреза под стрингер в усиленном шпангоуте

В усиленных шпангоутах очень часто для подкрепления вырезов под стрингеры устанавливаются **специальные накладки** (**rip-stop doublers**) - создание конструкций с несколькими путями передачи нагрузок .

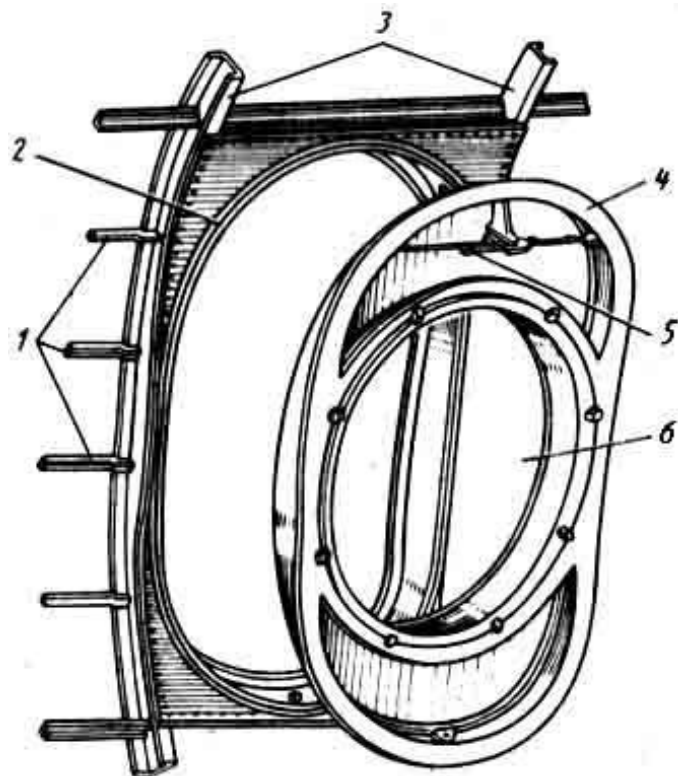


Рис. **Аварийный люк:**  
 1 – стрингер; 2 – рама; 3 – шпангоут; 4 – крышка люка; 5 – рукоятка замка; 6 – вырез для остекления

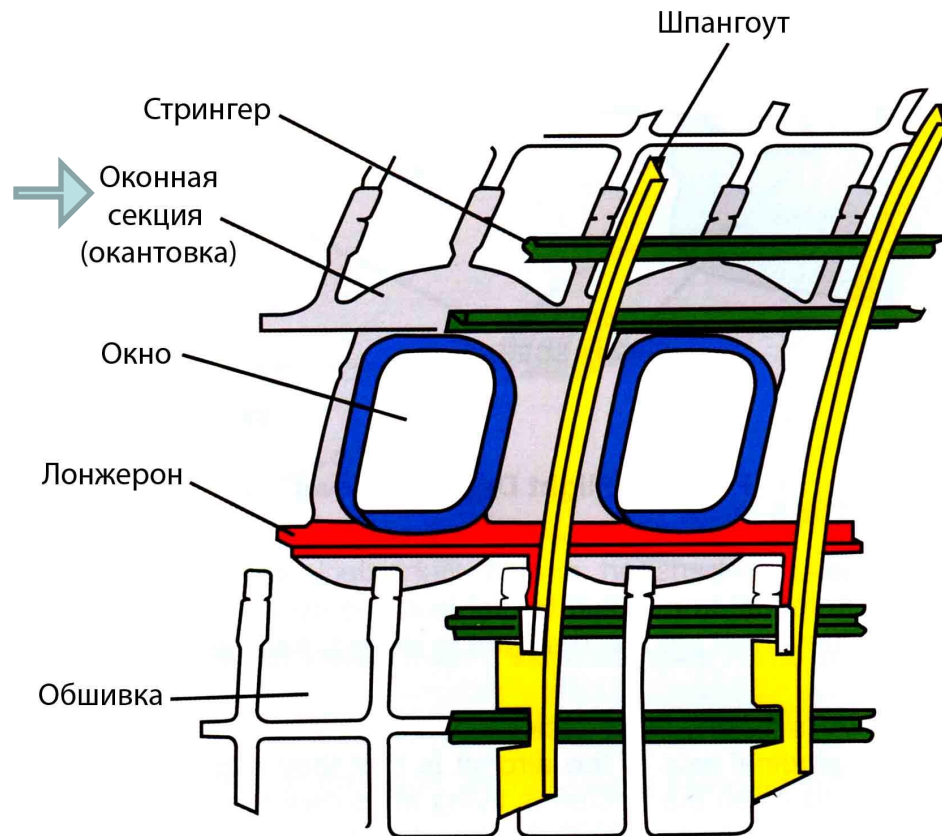


Рис. **Конструктивное оформление остекления пассажирских кабин**

Вырезы в обшивке фюзеляжа под двери и люки компенсируются клепанными или литыми рамами, окантовывающими вырезы (рис.).

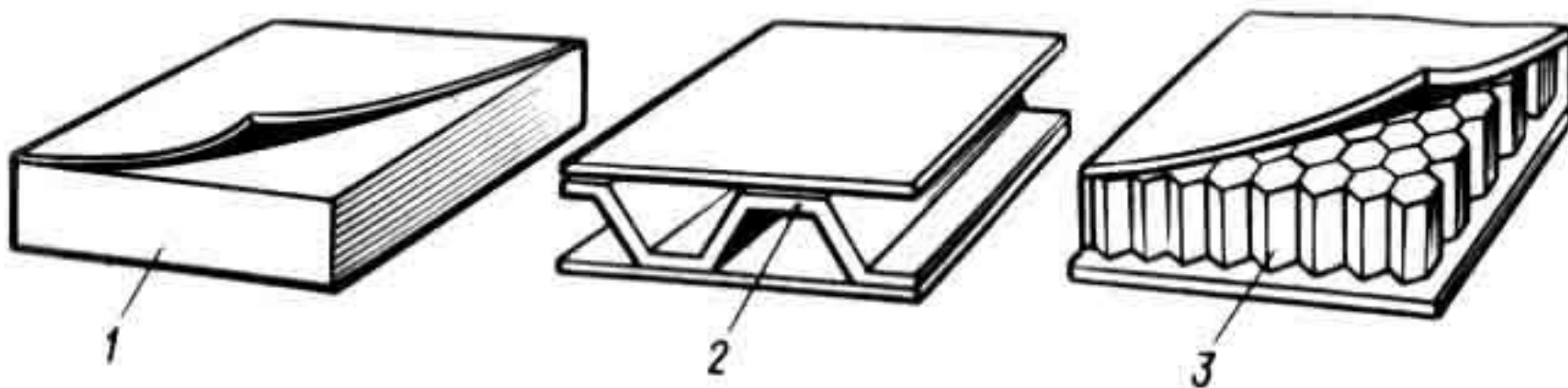


Рис. **Трехслойные конструкции:**  
а – пенопласт; б – гофр; в - соты

Усталостная прочность у слоистых панелей обшивки выше, чем у эквивалентной однослойной обшивки.

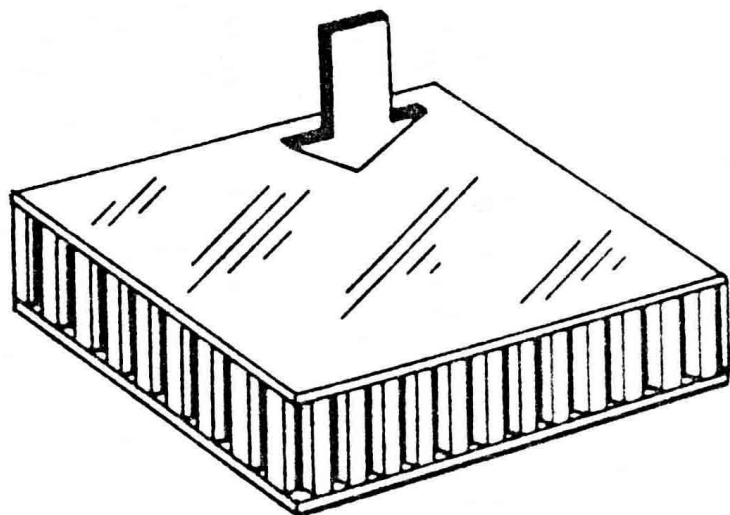
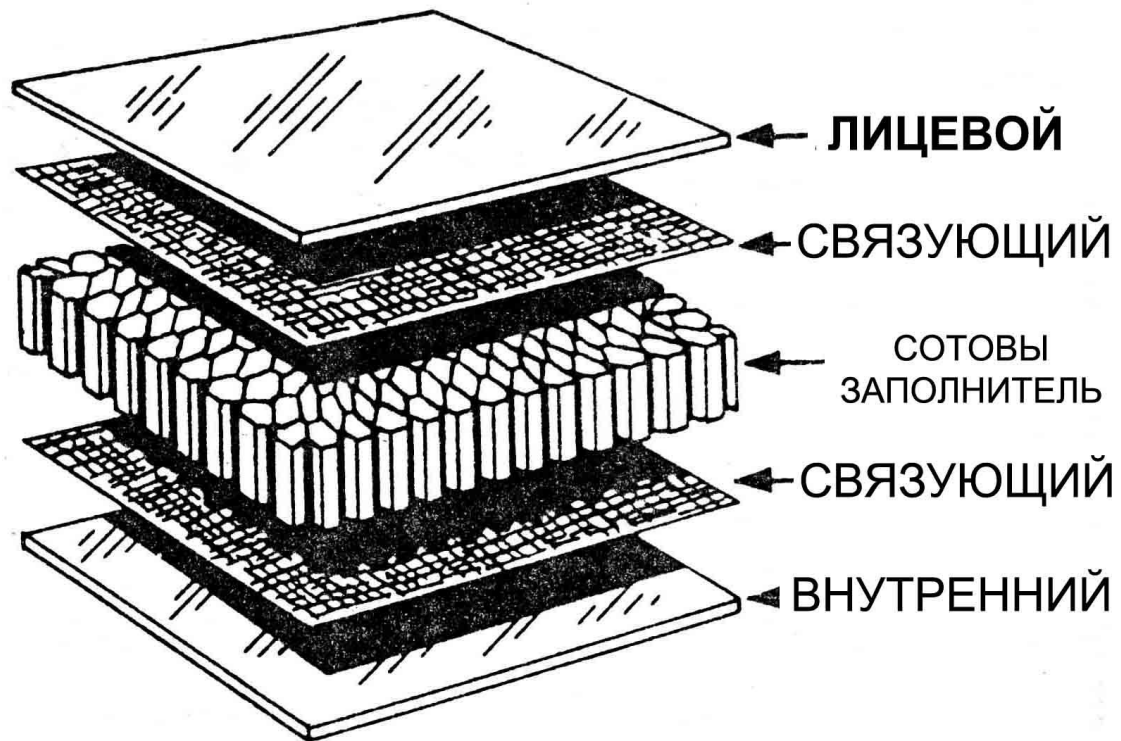
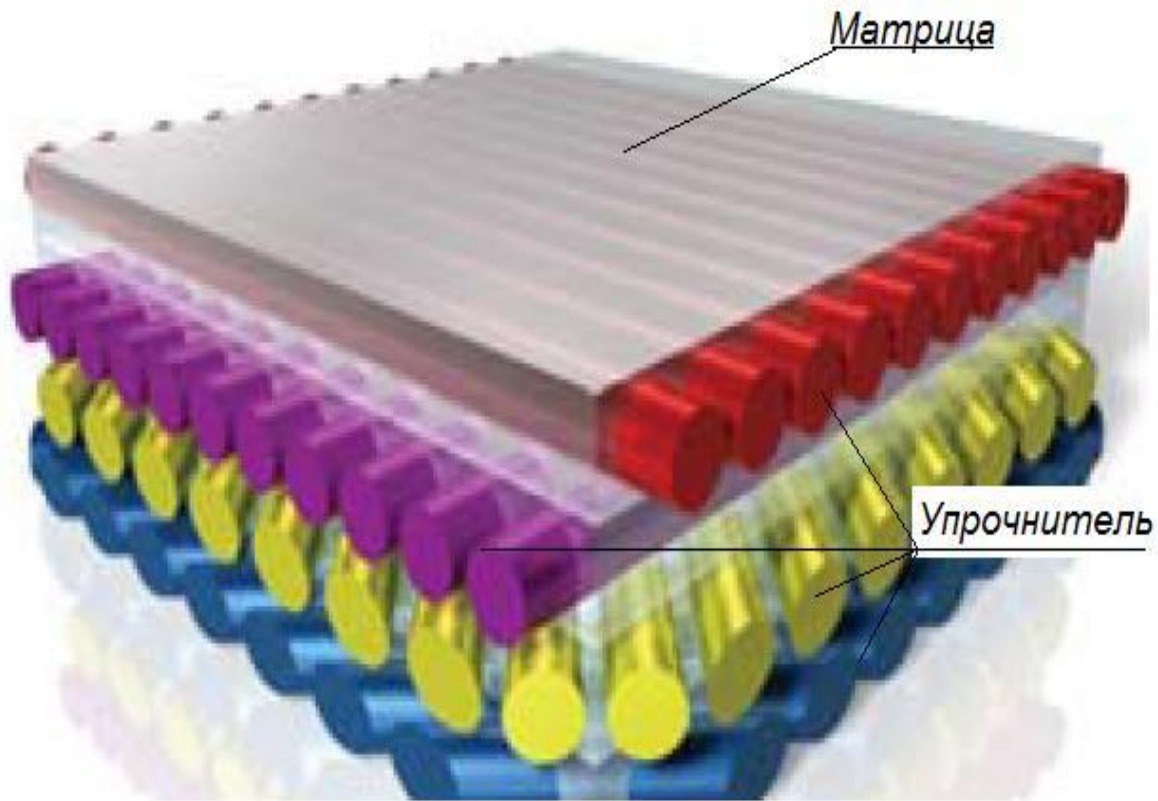


Рис. Структура  
многослойной  
конструкции



**Рис. Структура  
композитного  
материала**

Основная особенность волокнистых композитов – это возможность создания из них материалов и изделий с заданными свойствами, наиболее полно отвечающими характеру и условиям работы деталей и конструкций. Используя разные матрицы и меняя в них содержание армированных волокон, их ориентацию в слоях материала, сочетая в одной матрице волокна с различными упруго-прочностными свойствами, можно создавать материалы с заданным комплексом свойств.





Рис. Композитные материалы, применяемые в конструкции самолёта Боинг 787 [ 25]

В принципе, взятый Боинг курс на самолета из композиционных материалов минимизирует необходимость проверок механического состояния воздушного судна. Однако, как говорят специалисты, некоторые элементы конструкции, например шасси или направляющие закрылков, подвергаются высоким концентрированным нагрузкам, поэтому маловероятно, что они когда-либо будут выполняться из композитов и контроль их состояния остается актуальным.

Прогресс в производстве компактных, но мощных по объемам памяти и быстродействию информационно-коммуникационных систем имеет в системе технического обслуживания летательных аппаратов и авиационных двигателей следующее одно из наиболее перспективных применений – осуществление мониторинга состояния конструкции самолета. Реализация этой возможности позволит избавиться от трудоемких форм базового обслуживания, в ходе которого производится контроль механического состояния воздушного судна. Вместо этого сенсоры, встроенные при изготовлении самолета в его несущую конструкцию, будут собирать данные и передавать их для анализа на вычислительный комплекс. Компания Боинг уже провела оценку подобных возможностей на самолетах 737 и 777, у которых сенсоры в зоне дверей отслеживали механические воздействия, а сенсоры на ряде металлических элементов контролировали усталостные повреждения, что особенно важно в областях, требующих специальные проверки на предмет возникновения трещин.

Как сообщает компания Боинг в самолете Боинг 787 реализован непрерывный мониторинг 65 тыс. параметров, а вообще бортовая система HMS (Health Management System – система управления техническим состоянием) способна работать с 120 тыс. параметров.

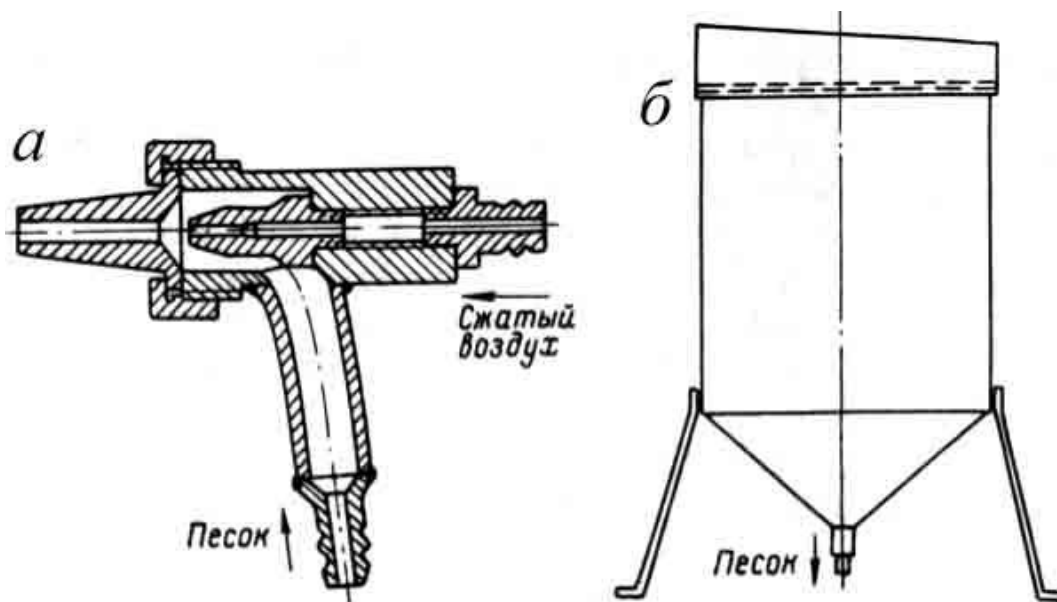


Рис. Оборудование для дробейструйной обработки:  
а – пистолет-рапылитель; б – бункер для абразива

Широкое распространение для повышения усталостной прочности деталей получил метод упрочнения поверхностных слоев наклепом с помощью дробейструйной обработки.



**Разработаны вихретоковые дефектоскопы, которые позволяют выявлять усталостные трещины в зоне галтельных переходов, болтовых соединений и заклепок. Приборы включены в Государственный реестр и внесены в регламент по техническому обслуживанию самолетов.**



**Рис. Дефектоскоп «ДАМИ»**

- реализует импедансный, вихретоковый и ударный методы контроля

### **Использованная литература:**

- 1. Ремонт летательных аппаратов: Учебник для вузов гражданской авиации. А. Я. Алябьев, Ю. М. Болдырев, В. В. Запорожец и др.; Под ред. Н. Л. Голего. – 2-е изд., перераб. и доп.- М: Транспорт, 1984. – 422 с.*
- 2. Бейлин. Л. А., Мейер А. А. Ремонт самолетов, вертолетов и авиационных двигателей. Учеб. пос. для сред. учеб. заведений ГА. – М.: Транспорт, 1966. – 428 с.*
- 3. Ингликов М. А. Ремонт технических систем. Л.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1978. – 322 с.*
- 4. Ремонт и техническая эксплуатация лесотехнического оборудования. – Л.: Агропромиздат. ленингр. отд-ние, 1989. – 312 с.*
- 5. Горохов В. А., Лоцманов С. Н., Михайлов А. А., Петрунин И. Е. Авиационное ремонтное дело. Часть 1 и часть 2. Под ред. д.т.н. проф. А. А. Михайлова. М.: Военное издательство МО СССР, 1970.*

Якущенко В.Ф. Ремонт воздушных судов: Учебное пособие / СПбГУГА. С.-Петербург, 2010.