

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ ИСПЫТАНИЕ

Доцент, кандидат технических наук

Зинин Александр

Владимирович

8 916 652 92 09

allzin@yandex.ru

2016

4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЛА

Статические испытания летательного аппарата (ЛА) являются основным инструментом для подготовки окончательного суждения о статической прочности летательного аппарата, инструментом, обеспечивающим всестороннюю, комплексную проверку всех процессов его создания, оказывающих влияние на статическую прочность конструкции.

Целью статических испытаний летательных аппаратов является оценка напряженно-деформированного состояния конструкции, анализа правильности выбора расчетной схемы и, в конечном итоге, проверка прочности.

Статическая прочность - способность конструкции воспринимать приложенные однократно внешние силы, определенные по нормам прочности, не получая недопустимых остаточных деформаций и не разрушаясь.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции - совокупность внутренних напряжений и деформаций, возникающих при действии на конструкцию внешних нагрузок, температурных полей и других факторов.

При проведении статических испытаний летательного аппарата на нем

4.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Нормы прочности летательных аппаратов - свод положений, регламентирующих прочность конструкций воздушных судов, при которой обеспечивается их безопасная эксплуатация. Нормы прочности - составная часть Норм летной годности воздушных судов. В научном плане Нормы прочности - инженерная дисциплина, разрабатывающая и обосновывающая требования к прочности к конструкции ЛА на основании достижений аэродинамики, статической и усталостной прочности, аэроупругости и динамики полета, базирующаяся на опыте эксплуатации и результатах наземных и летных испытаний и широко использующая вероятностно-статистические методы.

Расчетные случаи нагружения - случаи соответствующих условий эксплуатации, наиболее неблагоприятных в отношении прочности по действию нагрузок на ЛА или его составные части. Различаются случаи нагружения летательного аппарата в полете, при взлете и посадке, в наземных условиях.

Нагрузка на летательный аппарат - система сил, действующих на ЛА и являющихся основной для определения ее прочности. В эту систему входят аэродинамические, инерционные силы, тяга двигателей, силы от реакции земли при движении по аэродрому, от неравномерного изменения температуры конструкции, от акустических давлений, от

4.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Эксплуатационная нагрузка $R_{\text{эксpl}}$ - ожидаемое максимальное значение внешних нагрузок, возникающих в реальных условиях эксплуатации ЛА. После воздействия эксплуатационной нагрузки на конструкции не должно быть видимых остаточных деформаций.

Расчетная нагрузка $R_{\text{расч}}$ - предельное значение внешней нагрузки, по которому производится расчет конструкции ЛА на прочность. Конструкция не должна разрушаться при нагрузках, меньших расчетной нагрузки. Значение расчетной нагрузки определяется для каждого расчетного случая как произведение эксплуатационной нагрузки на коэффициент безопасности.

Коэффициент безопасности f используется при определении расчетных нагрузок на ЛА.

$$f = R_{\text{расч}} / R_{\text{эксpl}}$$

Коэффициент безопасности вводится для обеспечения высокого уровня безопасности ЛА по условиям статической прочности с учетом возможных разбросов внешних нагрузок и прочностных характеристик ЛА.

Значения коэффициента безопасности задаются в нормах прочности.

4.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Программа статических испытаний - документ, определяющий расчетные случаи нагружения, относительную величину нагрузки, до которой ее необходимо доводить в каждом из указанных расчетных случаев, последовательность проведения статических испытаний. Программа статических испытаний ЛА включает критические случаи нагружения Норм прочности по результатам испытания, на которые должно быть показано соответствие конструкции требованиям прочности и деформаций.

Лаборатория статических испытаний- включает испытательный зал для проведения статических испытаний, оборудованный силовым полом, силовым потолком или силовыми порталными устройствами, а также вспомогательные и бытовые помещения.

Силовой пол лаборатории статических испытаний- пол, оборудованный силовыми узлами, к которым крепится нагружающее оборудование при создании сил, действующих на испытываемую конструкцию вниз.

Силовой потолок лаборатории статических испытаний- стационарные порталные устройства, перекрывающие всю площадь силового пола, на которых устанавливаются передвигаемые силовые мосты и балки, обеспечивающие закрепление гидроцилиндров систем

4.2. ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Испытательные стенды- установки и сооружения, обеспечивающие реализацию нагружения объекта испытаний в целом или отдельных его частей на заданные программой статических испытаний расчетные случаи нагружения.

Нагрузочный узел- приспособление или устройство для приложения нагрузки к поверхности испытываемой конструкции. В качестве нагрузочных узлов при статических испытаниях наиболее часто применяются парусиновые лямки, резино-металлические узлы, рым-болты, хомуты с ложементами.

В типовой стенд статических испытаний натурной авиационной конструкции кроме стационарных силовых конструкций здания лаборатории (и порталных устройств, если в лаборатории нет стационарного силового потолка) входят нагрузочные узлы, объединенные рычажными системами, динамометры (или другие датчики измерения величины нагрузки в канале нагружения), гидроцилиндры и элементы крепления нагружающих систем к силовым конструкциям лаборатории.

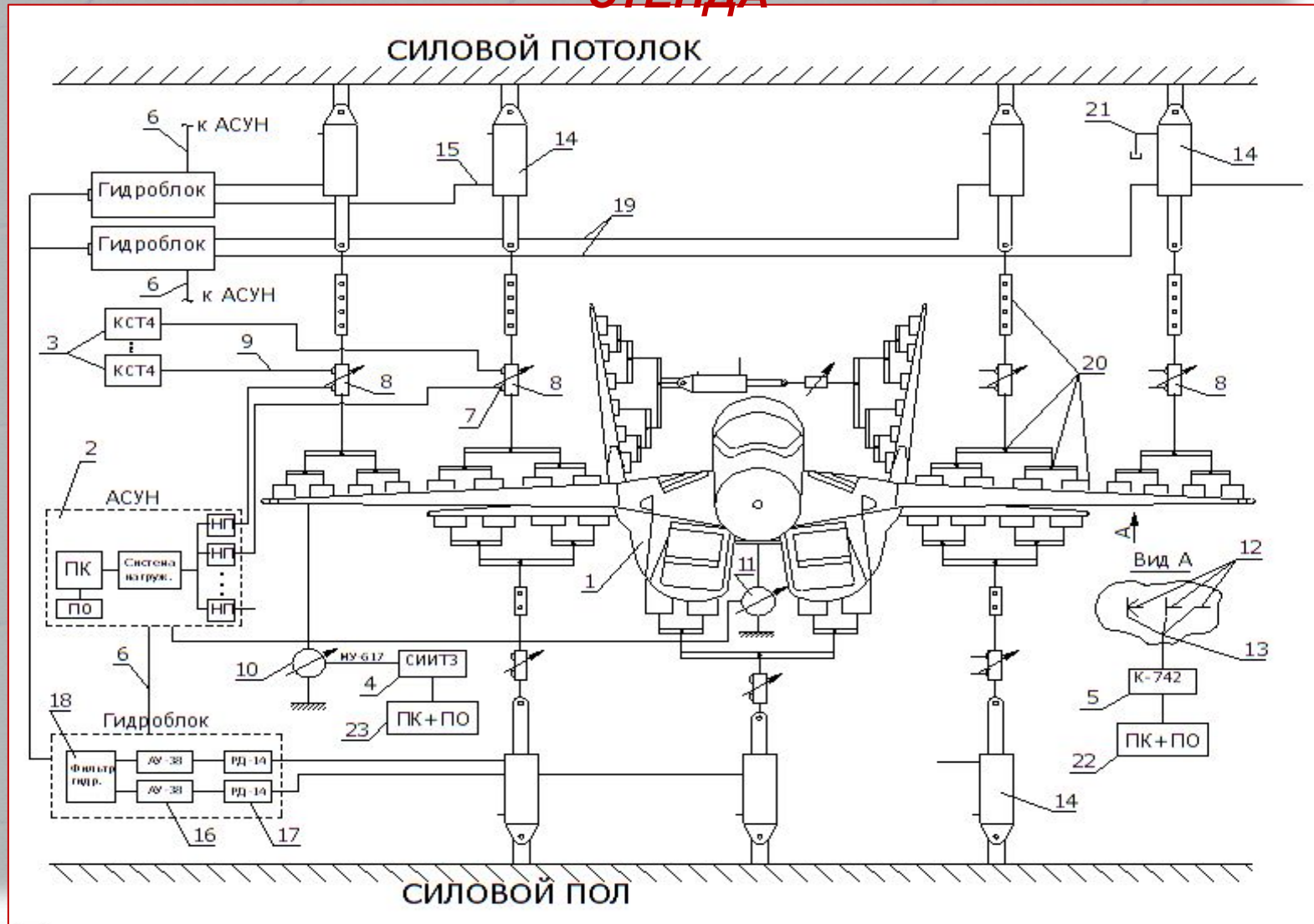
4.2. ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Испытательный стенд представляет собой оборудованную механизмами и аппаратурой зону зала испытаний, в которой на силовом полу закреплен летательный аппарат, к испытываемым элементам которого прикладываются нагрузки, соответствующие расчетному случаю.

Воспроизведение распределенных поверхностных и массовых нагрузок осуществляется с помощью системы элементарных сосредоточенных сил, величины и места приложения которых выбираются в соответствии с законами распределения нагрузок вдоль ЛА и в поперечных сечениях агрегатов. Под элементарными сосредоточенными силами подразумеваются эквивалентные усилия, имитирующие распределенные нагрузки, прикладываемые на локальном участке поверхности испытываемого объекта с помощью нагрузочных узлов.

Для облегчения процесса управления нагружением элементарные сосредоточенные силы с помощью системы рычагов и тяг сводят к равнодействующим, усилия в местах действия которых воспроизводятся с помощью гидроцилиндров, закрепленных на силовом потолке лаборатории. Гидроцилиндры управляются автоматизированной

4.3. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА



4.3. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО

1	ЛА (или агрегат) с силовыми имитаторами	1 к-т
2	Автоматизированная система управления	48 кан.
3	Прибор КСТ-4	20
4	Измерительная система СИИТЗ	1
5	Измерительная система К-742	1
6	Жгут управления гидроблоками	24
7	Разъем	48
8	Тензодинамометр	48
9	Жгут тензодинамометра	10
10	Датчик перемещения МУ-617	30
11	Потенциометр многооборотный	6
12	Тензорезисторы	4000
13	Жгут тензорезисторов	300
14	Гидроцилиндры	165
15	Гидрорукав	350
16	Агрегат управления АУ-386	48
17	Регулятор давления РД14-00-1	48
18	Фильтр гидравлический	25/20
19	Элементы трубопроводов	---
20	Элементы рычажной системы	---
21	Дренажная, хлорвиниловая трубка d10	250м
22	Персональный компьютер РС IBM	1
23	Персональный компьютер РС IBM	1

4.3. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Стенд работает следующим образом. В соответствии с заданным распределением нагрузок автомат нагружения 1 устанавливает соответствующие коэффициенты редукции редукторов 4 и по программе изменения нагрузок регулирует давление масла в коллекторе 8, из которого масло поступает во входные полости 14 редукторов. Перепад давлений между входной и выходной полостями редуктора измеряется дифференциальными датчиками давления И, сигналы с которых через электромеханические приводы 12 воздействуют на задатчики редуцированного давления 11. При повышении давления в управляющих полостях 9 золотники распределителей 8 смещаются вверх, и масло из входных полостей поступает в силовозбудители и одновременно подводится в выходные полости 15. При этом конструкция нагружается, и давление на выходах редукторов 4 повышается. Повышение давления вызывает уменьшение величины управляющих сигналов дифференциальных датчиков давления. При уменьшении величины сигнала до нуля, давления в управляющих и выходных полостях каждого редуктора сравниваются, а их отношения к входному давлению становятся равными установленным коэффициентам редукции.

Показания одного из динамометров 6 являются входным сигналом для электрогидравлической следящей системы, Показания других динамометров используются в системе защиты, которая срабатывает при расхождении показаний динамометров выше допустимых норм

4.3. НАГРУЖАЮЩИЕ СИСТЕМЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Каждая лаборатория статических испытаний натурных авиакосмических конструкций имеет набор универсального оборудования, позволяющего обеспечить сборку нагружающих систем и монтаж испытательных стенов.

Перечень универсального оборудования лаборатории, необходимого для монтажа нагружающих стенов, включает нагрузочные узлы, элементы рычажных систем, силовые гидроцилиндры, порталные устройства, стойки, элементы крепления силовых цепочек к силовым конструкциям лаборатории, силоизмерительное и другое оборудование.

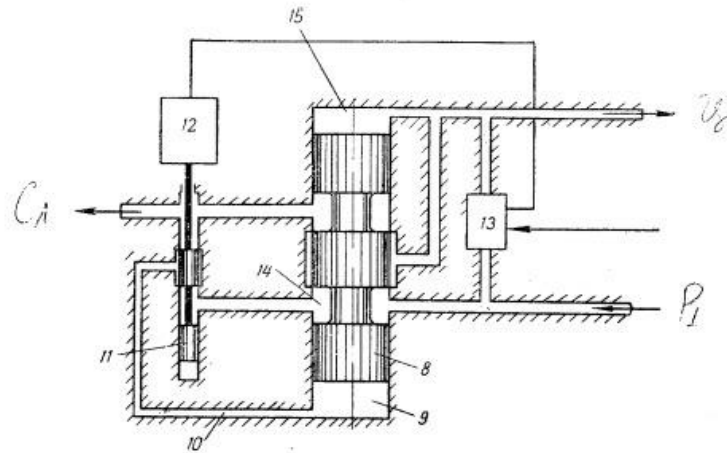
В качестве нагрузочных узлов применяются парусиновые лямки для передачи нагрузки к силовым элементам испытываемой конструкции.

В качестве рычагов, при помощи которых элементарные сосредоточенные силы сводятся к одной равнодействующей силе, чаще всего используют пакеты из швеллеров. Рычаги должны иметь прокладки, не позволяющие при затяжке болтов зажимать тяги между профилями. Отсутствие прокладок может привести к большим погрешностям нагружения из-за трения. По той же причине необходимо

4.3. НАГРУЖАЮЩИЕ СИСТЕМЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Редукторы давления позволяют в ходе эксперимента осуществлять плавное изменение распределения нагрузок по поверхности испытываемой конструкции по заданной программе в процессе проведения испытаний, например, при испытаниях с учетом явлений аэроупругости.

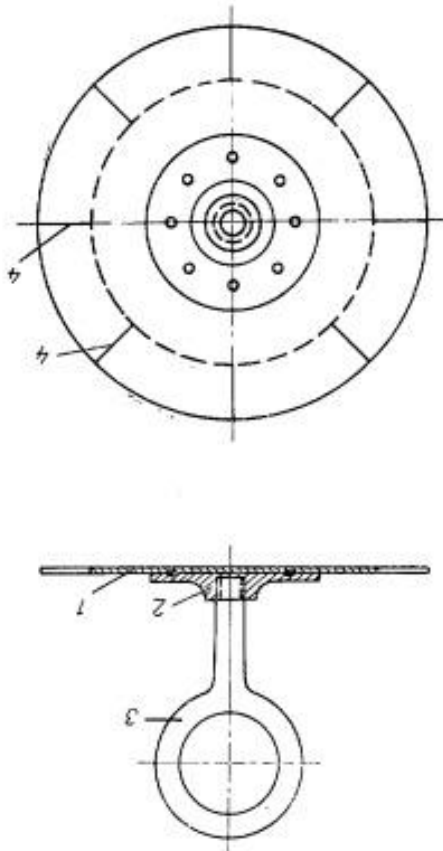
Плавное изменение заданного распределения нагрузок по поверхности испытываемой конструкции в процессе испытаний достигается тем, что каждый из редукторов стенда выполнен в виде четырехполостного с обратной связью по давлению золотникового распределителя, управляющая полость которого соединена каналом с задатчиком, подающим в полость редуцированное давление и кинематически связанным с электромеханическим приводом, воспринимающим сигнал управления от регулируемого дифференциального датчика давления, подключенного между входом и выходом редуктора.



Принципиальная схема редуктора давления

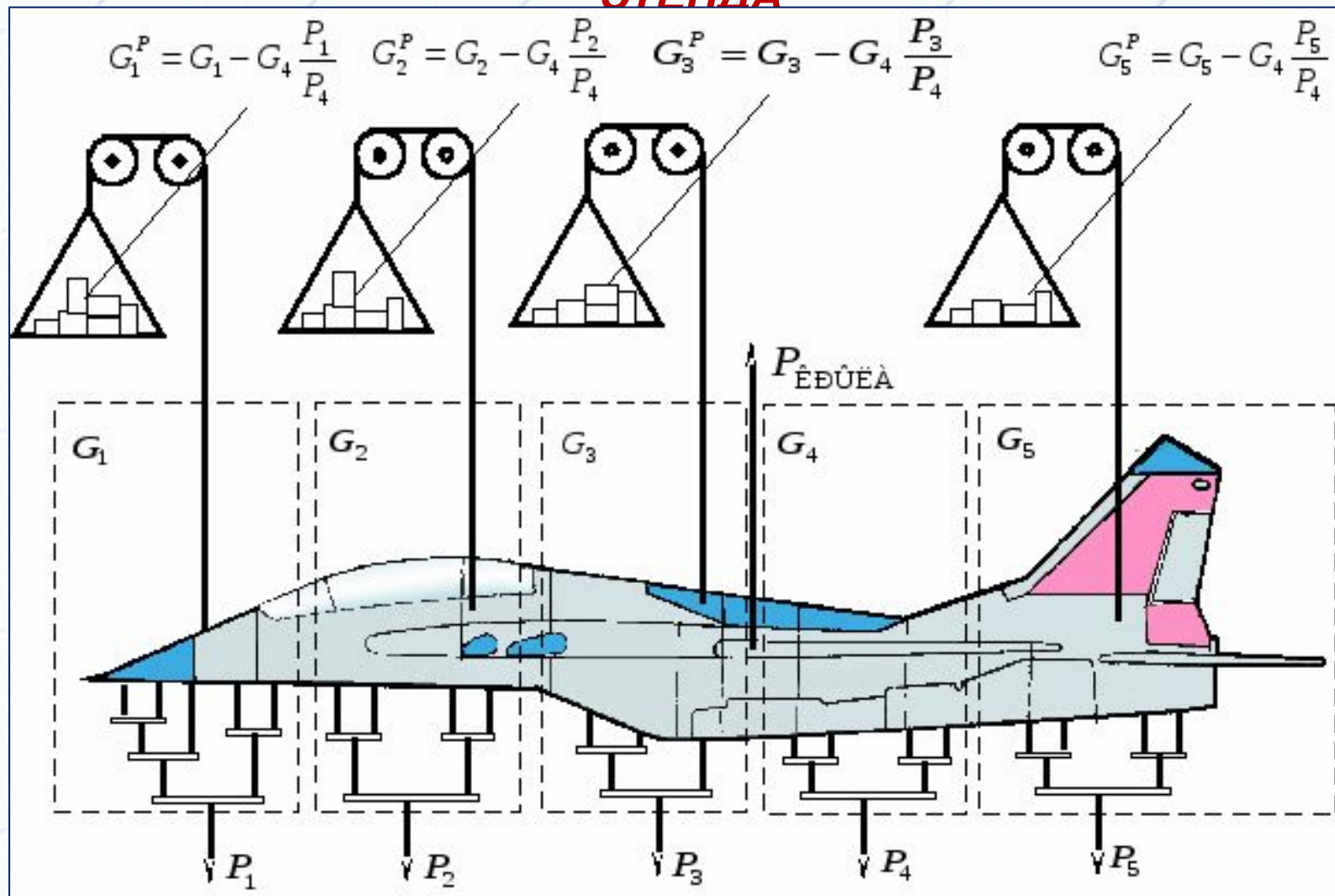
4.3. НАГРУЖАЮЩИЕ СИСТЕМЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Устройство для приложения нагрузки при статических испытаниях конструкций в условиях повышенных температур.

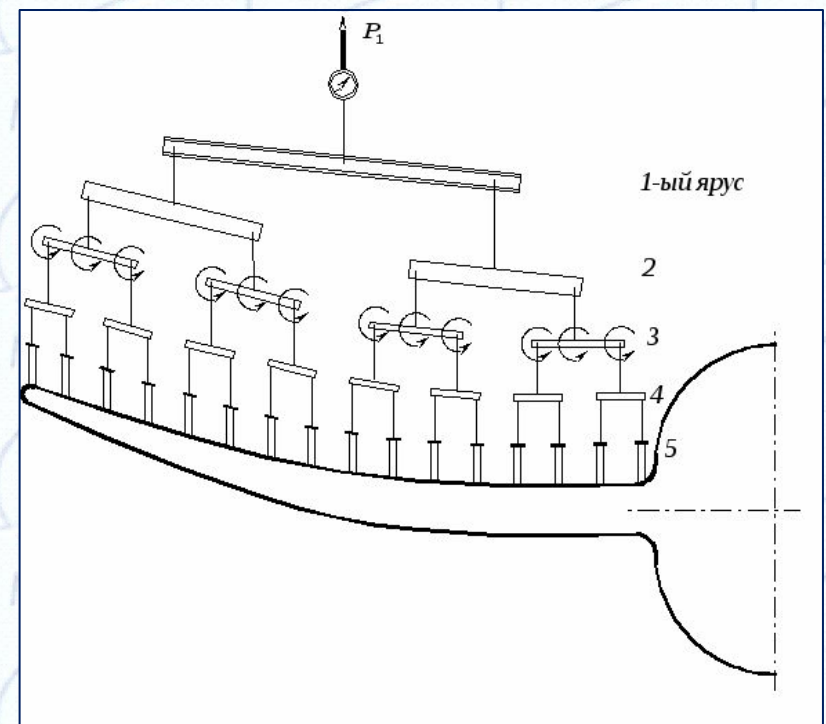
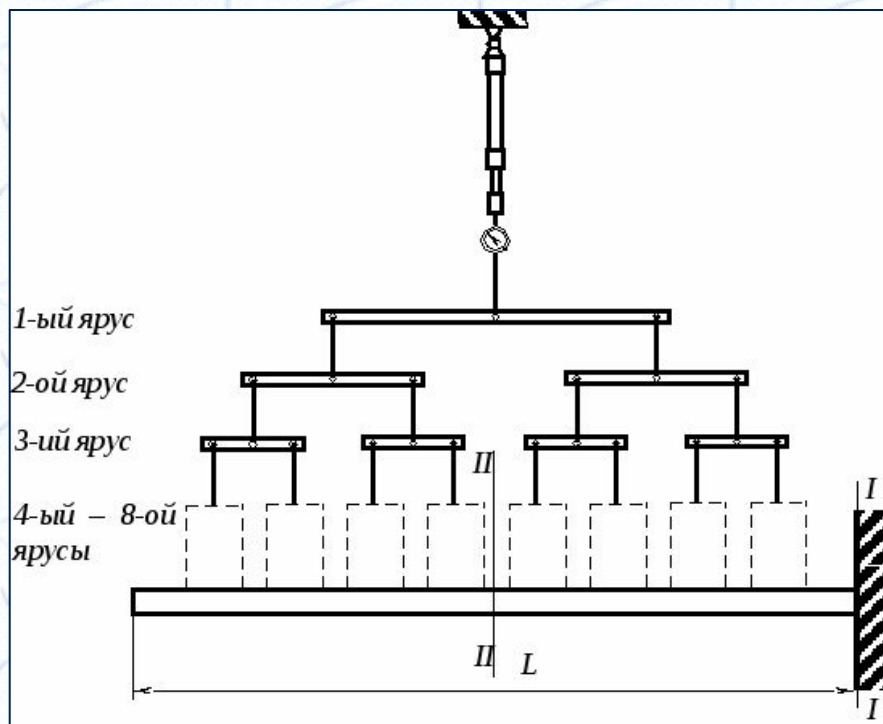


Устройство содержит плоскую металлическую накладку 1, приклеиваемую к обшивке с помощью термостойких клеев, профилированную шайбу 2 с резьбой, которую приваривают к накладке, и проушину. Накладка имеет радиальные прорезы 4 для уменьшения жесткости.

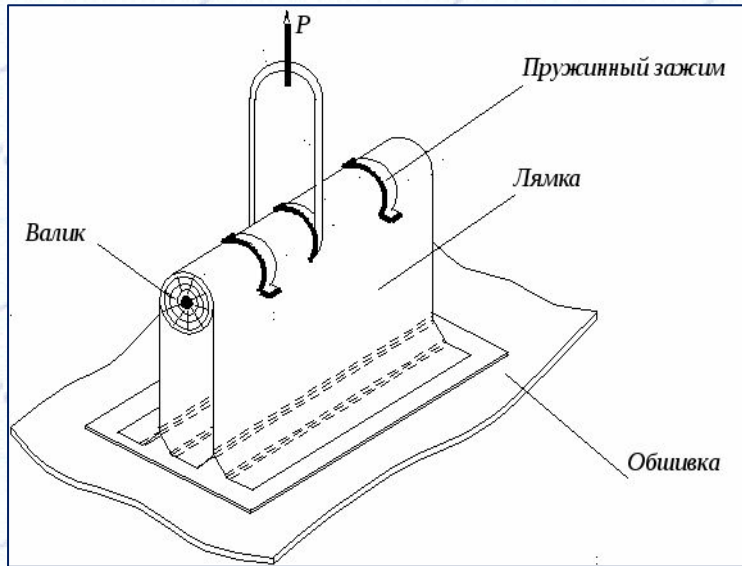
4.3. НАГРУЖАЮЩИЕ СИСТЕМЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА



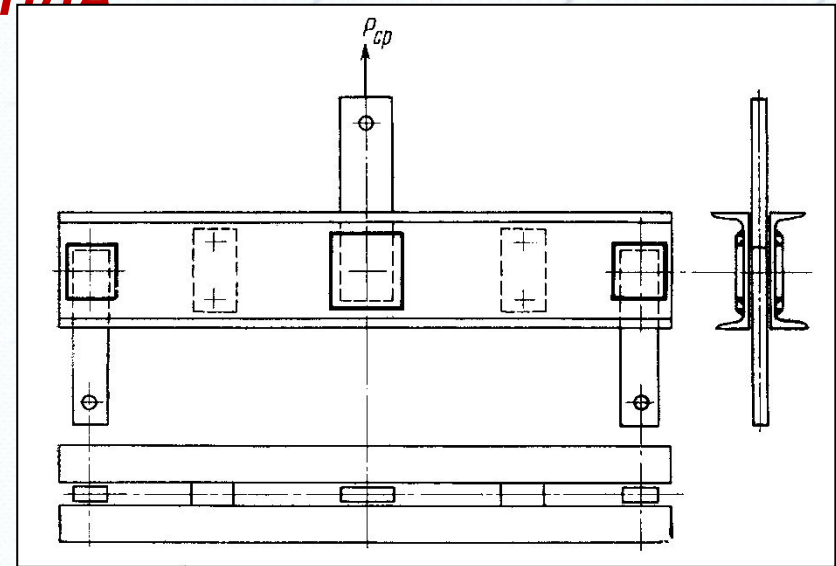
4.3. НАГРУЖАЮЩИЕ СИСТЕМЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА



4.3. НАГРУЖАЮЩИЕ СИСТЕМЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА



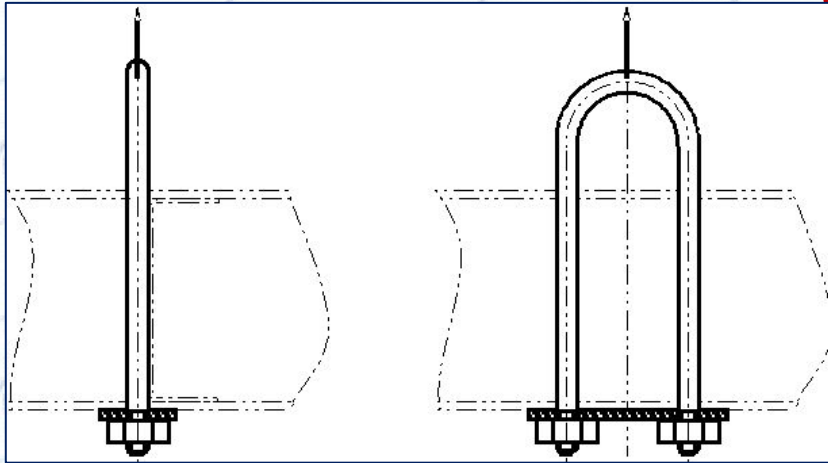
Парусиновая



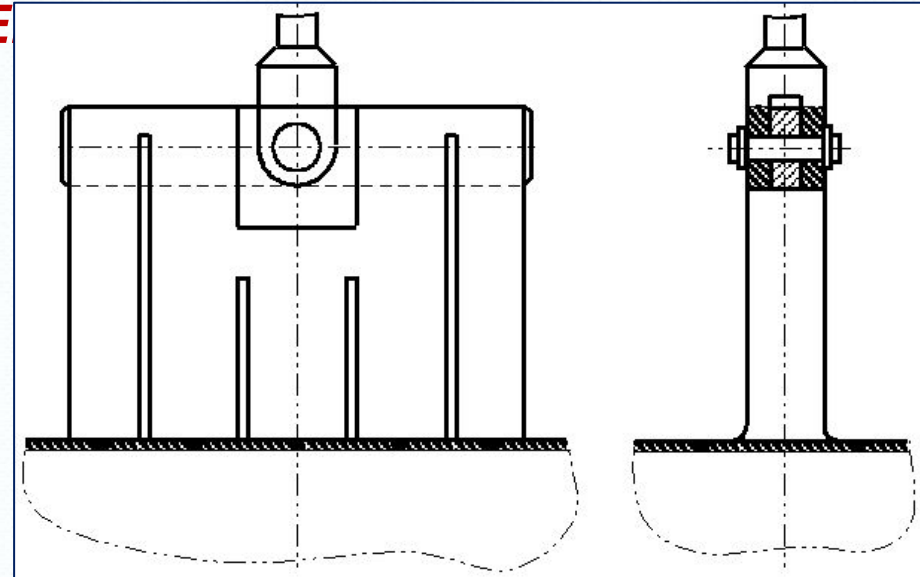
Рычаг системы

Традиционное нагружающее устройство – парусиновая лямка при все своей простоте имеет ряд недостатков. Во-первых, лямки искажают температурное поле при статических испытаниях, сопровождаемых нагревом конструкции. Во-вторых, лямки позволяют приложить нагрузку только в одном направлении, следовательно, чтобы испытать самолет на такие случаи как A' и D' , когда в первом случае нагрузка приложена вверх, а во втором – вниз, необходимо создавать две отдельные рычажные системы. Третий недостаток – затрудненный подход к обшивке

4.3. НАГРУЖАЮЩИЕ СИСТЕМЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕ



Данное приспособление можно использовать для приложения нагрузки вблизи силовых элементов - лонжеронов, нервюр и шпангоутов. Недостатком является необходимость выполнения отверстий в обшивке. Это устройство, как и парусиновые ляжки может быть



Данное приспособление служит для передачи нагрузок непосредственно к обшивке. Недостаток - необходимость использования точечной сварки.

4.4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ

Важной задачей при статических испытаниях ЛА является исследование напряженно-деформированного состояния конструкции.

Такие эксперименты сводятся к измерению относительных деформаций в отдельных точках с последующим вычислением напряжений в этих точках конструкции. Кроме исследования общего напряженного состояния конструкции, при статических испытаниях исследуют НДС в зонах различных нерегулярностей (вырезах, стыках и пр.) с выявлением мест концентрации напряжений.

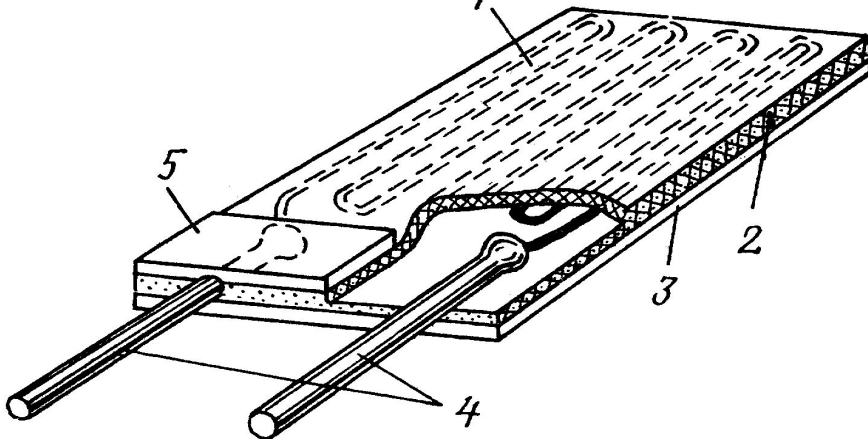
При статических испытаниях современного самолета в условиях нормальных температур количество устанавливаемых на конструкции измерителей относительных деформаций достигает 15 — 20 тыс. шт.

Основным требованием к измерителям относительных деформаций, применяемым при статических испытаниях летательных аппаратов, является возможность использования при массовых измерениях. Этому требованию полностью удовлетворяют наклеиваемые на конструкцию тензорезисторы, которые и нашли широкое применение при исследованиях напряженного состояния.

4.5. ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ

Тензорезистор состоит из тензочувствительной решетки, диэлектрической основы и выводных проводников. Диэлектрическая основа соединяется с тензометрической решеткой и конструкцией при помощи связующего слоя. Принцип действия тензорезисторов основан на изменении электрического сопротивления тензочувствительной решетки при ее деформировании вместе с конструкцией.

При деформировании тензочувствительной решетки происходит изменение ее геометрических размеров и удельного сопротивления, что приводит к изменению сопротивления тензорезистора. По изменению сопротивления тензорезистора можно судить об относительной деформации конструкции.



- 1—тензочувствительная решетка;
- 2—связующий слой;
- 3—бумажная диэлектрическая основа;
- 4—выводные провода;
- 5—накладка

4.5. ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ

Материал тензочувствительной решетки должен удовлетворять определенным требованиям, главные из которых следующие:

- линейная зависимость сопротивления от деформации в широком диапазоне измерения;
- возможно большее значение тензочувствительности и ее стабильность;
- высокое удельное сопротивление;
- малая термоэлектродвижущая сила по отношению к материалу выводных проводов;
- достаточная механическая прочность;
- малый температурный коэффициент сопротивления;
- хорошая свариваемость, легкость пайки и хорошая обрабатываемость.

Для изготовления тензочувствительной решетки в основном: применяется тонкая проволока или фольга из константана или железохромалюминиевого сплава ОХ21Ю5ФМ. В отдельных случаях может использоваться нихром, магнанин, никель, платина и т. д..

4.5. ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ

Основными характеристиками тензорезисторов являются: тензочувствительность, ползучесть, температурное приращение сопротивления, электрическое сопротивление изоляции и погрешность.

Тензочувствительность зависит от свойств материала, формы и конструкции решетки.

Тензочувствительность проволоочного петлевого тензорезистора может быть определена по формуле:

$$K = \left(\left(1 + 2\mu_n \right) + \frac{\Delta\delta/\delta}{\Delta l/l} \right) \frac{l + \pi r/2 (1 - \mu)}{l + \pi r}$$

где

μ_n

- коэффициент
Пуассона
материала

μ

- коэффициент Пуассона
материала
конструкции;

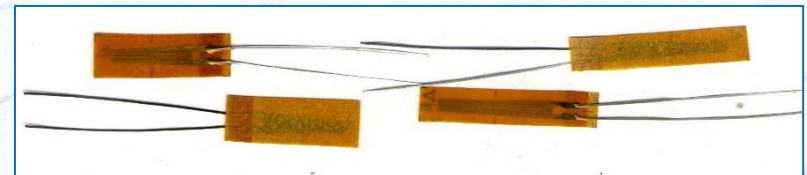
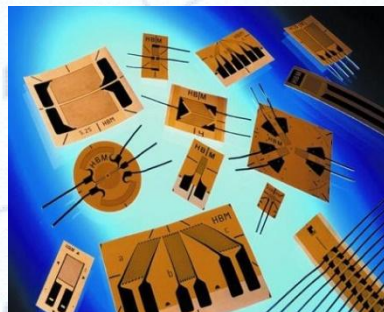
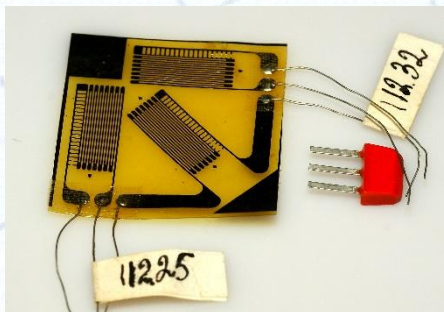
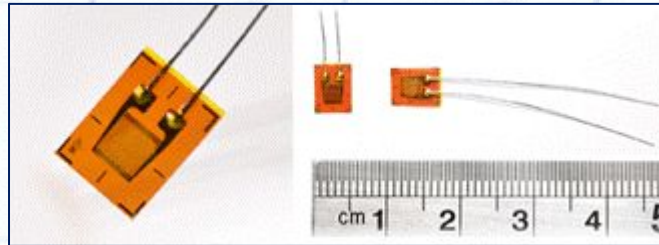
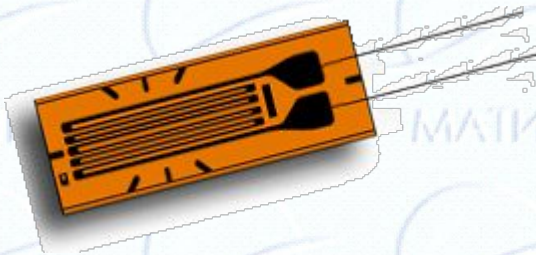
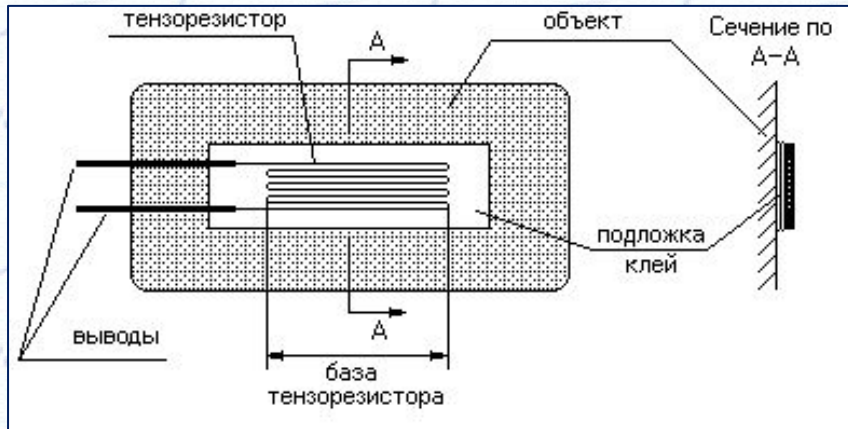
δ

- удельное сопротивление
материала проволоки;

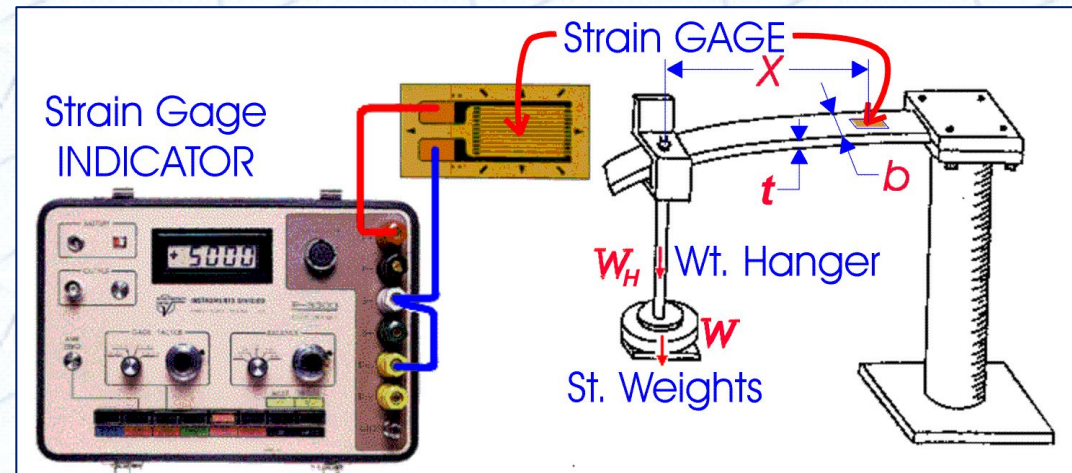
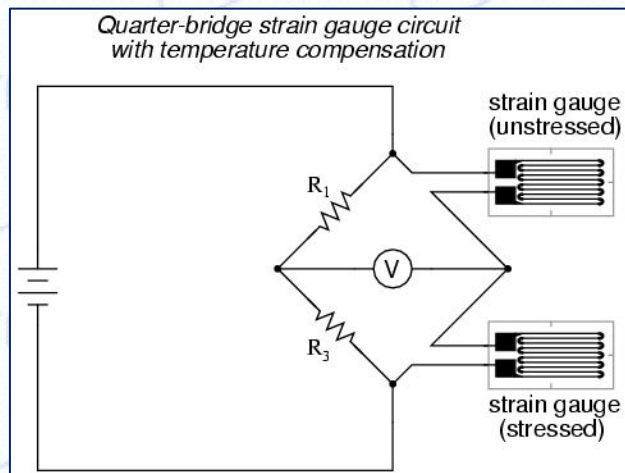
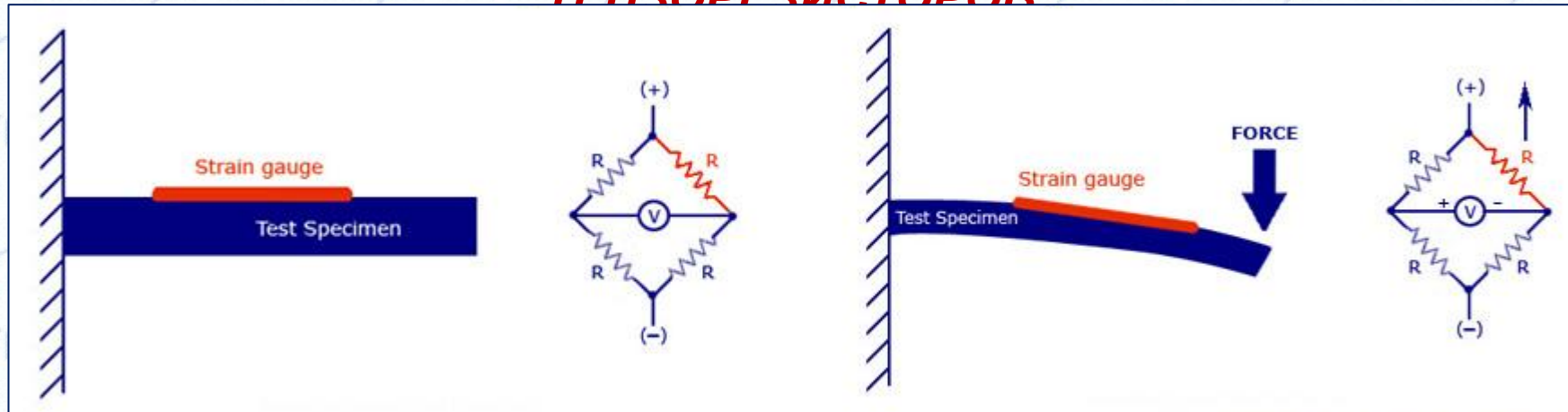
r

- радиус закругления петли
тензорезистора.

4.5. ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ



4.6. СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ



strain gauge - измеритель деформации

4.7. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ

№	Источник ошибки	Величина ошибки
1	Разброс по толщине тензорезистора (ТР)	1 ÷ 2 %
2	Влияние длины (базы) ТР типа КФ	1,5 ÷ 2,0 %
3	Разброс коэффициента тензочувствительности	1 ÷ 3%
4	Влияние влажности среды хранения ТР	1 ÷ 2%
5	Влияние ошибки в ориентировании ТР (зависит от базы ТР)	± 2%
6	Разброс толщины клеевого подслоя	Зав. от базы ТР
7	Изменения температуры окружающего пространства (ТР самокомпенсирован)	0,1%
8	Разность температуры между рабочим и компенсационным ТР	0,4%
9	Разброс модуля упругости материала, на который наклеен ТР	5,0%
10	Влияние разной длины и температурного коэффициента сопротивления соединительных проводов	0,2%
11	Изменение влажности окружающего измерительную цепь пространства	0,2%
12	Влияние ползучести	изменяется во времени
13	Влияние поперечной тензочувствительности	нет для КФ
14	Влияние времени сушки клея	от 0 до 3%
15	Старение характеристики клея и тензопроволоки	-5% до +5%

Из анализа таблицы видно, что если учесть независимые от исполнителя факторы, вызывающие погрешности измерений, то ошибка тензоизмерений с учетом разброса модуля упругости E (5 %) будет составлять 7÷10 %

4.8. РАЗМЕЩЕНИЕ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ НА ИЗДЕЛИИ

При тензоизмерениях остаточных и внутренних напряжений, возникающих при изготовлении деталей и узлов, связанных с неравномерным нагревом и охлаждением, применяют метод деструкции, т.е. изучаемый участок вырезают (засверливают) и с помощью малобазных ТР (3-5 мм) в 2^x - 3^x направлениях в каждой точке измеряют относительные деформации.

При тензоизмерениях на объектах из композиционных материалов в местах концентраций напряжений наклеивают ТР с меньшим шагом, а для тонкостенных элементов – с 2^x сторон (внутренней и наружной).

При одноосном напряженном состоянии для определения напряжения достаточно измерения относительной деформации в одном направлении, но для тонкостенных элементов конструкции рекомендуется устанавливать два ТР друг напротив друга по толщине элемента, чтобы исключить влияние местного изгиба.

В элементах, находящихся в сложно-напряженном состоянии, для определения компонентов напряжений (σ_x , σ_y , τ_{xy}) измерение относительных деформаций необходимо выполнять в 3^x направлениях, т.е. в каждой расчетной точке надо устанавливать три тензорезистора, а для тонкостенных элементов это количество удваивается за счет

4.9. МЕТОДЫ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ

Выбор метода нагрева при воспроизведении температурных полей зависит как от особенностей испытываемого изделия, так и от характерных для него тепловых условий полета.

Общие требования к системе нагрева :

- Получение высоких температур и тепловых потоков с большой плотностью.
- Плавное и быстрое изменение плотности теплового потока.
- Возможность измерения плотности теплового потока.
- Получение заданного закона распределения плотности теплового потока по нагреваемой поверхности.
- Отсутствие ограничения для деформаций испытываемой конструкции.
- Возможность приложения нагрузок к испытываемой конструкции и измерения ее перемещений, деформаций и температур.
- Возможность наблюдения за конструкцией в процессе нагревания.
- Применение простого, дешевого и надежного в эксплуатации оборудования.
- В зависимости от используемого вида теплообмена различают три основных способа нагрева конструкций в лабораторных условиях:
- Теплообмен теплопроводностью через контакт испытываемой

4.9. МЕТОДЫ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ

Существует также и четвертый способ нагрева, основанный на выделении тепла самой испытываемой конструкцией при прохождении через нее электрического тока. Однако данный способ мало пригоден для испытания натурных конструкций.

Наибольшее распространение получил второй способ нагрева, основанный на лучистом теплообмене. Для того используются инфракрасные нагреватели. Они просты по конструкции, удобны и надежны в эксплуатации, позволяют создавать лучистые потоки большой плотности и нагревать испытываемую конструкцию до высокой температуры.

Недостатком инфракрасных нагревателей является сложность воспроизведения переменных тепловых полей.

Для создания стационарных тепловых полей используются термокамеры, осуществляющие конвективную теплоотдачу от движущегося с небольшой скоростью воздуха и лучистый теплообмен от горячих стенок камеры.

Теплообмен контактом нагретого тела с испытываемой конструкцией осуществляется при помощи так называемых тепловых одеял, которыми обкладывается конструкция.

4.10. ПОДГОТОВКА ИЗДЕЛИЯ К ИСПЫТАНИЯМ

Подготовка к проведению статических испытаний ЛА проводится на базе представленных разработчиком объекта испытаний документов:

- программы испытаний, включающей в себя перечень расчетных случаев нагружения для ЛА в целом и отдельных элементов и агрегатов, ориентировочную последовательность их проведения и величины нагрузки в % от расчетной, до которых необходимо провести нагружение в каждом из приведенных в программе расчетных случаях;
- заданий на испытания, включающих в себя сведения о распределенных и сосредоточенных внешних нагрузках и инерционных силах, теоретические схемы агрегатов и схемы уравнивания объекта испытаний;
- указаний о местах размещения тензорезисторов и датчиков измерения общих и местных деформаций (на схематических чертежах объекта испытаний и его элементов);
- чертежей отдельных агрегатов и элементов конструкции объекта испытаний и чертежей ложных агрегатов (силовых макетов отсутствующих агрегатов, как то: двигателей, колес шасси, бустеров, спецгрузов, приборного и другого оборудования, не устанавливаемого на объекте испытаний), приспособленных для приложения к ним заданных на эти агрегаты нагрузок;

4.11. ПРОВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЛА

4.11.1 Первый этап

После ^{испытаний} окончания всех монтажных работ по объекту перед испытаниями проверяются :

- соответствие рычажной системы заданиям, загрузочным схемам;
- соответствие крепежных деталей прикладываемым усилиям;
- правильность установки силовых колонн;
- места крепления силовозбудителей к силовым элементам;
- соответствие ходов штоков силовозбудителей ожидаемым деформациям;
- правильность установки и подключения тензодинамометров;
- достаточна ли подвижность и шарнирность соединений;
- работа всех систем, используемых в прочностном эксперименте;
- безопасность рабочих мест персонала, участвующего в испытании;
- места установки ограждений для страховки на случай разрушения испытываемого объекта.

Намечается линия ограждения испытываемого объекта и места расположения присутствующих на испытаниях, но не участвующих в эксперименте. В случае ведения кино- и фотосъемки выбираются места расположения кино- и фотоаппаратов, пультов управления, а также обслуживающего персонала.

4.11. ПРОВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЛА

4.11.1 Первый этап испытаний

Непосредственно перед испытаниями проводятся следующие работы:

- проводится инструктаж занятого в эксперименте персонала и расстановка его по рабочим местам;
- контролируется величина рабочего давления маслонасосной станции, при этом учитывается максимально возможная при данном испытании нагрузка;
- устанавливаются нивелиры, проверяется соответствие высоты подвески реек и угломеров перемещению конструкции, организуется освещение реек и индикаторов;
- при работе с информационно-вычислительной системой (ИВС) производится подготовка исходных данных для проведения испытаний конкретной конструкции.
- подключение необходимых каналов управления нагружением и измерения приложенных нагрузок;
- порядок подготовки аппаратных средств ИВС и поканальной наладки стенда нагружения проводится с помощью программного обеспечения ИВС в режиме «Тест».

4.11. ПРОВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЛА

4.11.2 Второй этап

испытаний

На данном этапе проверяются в действии используемые системы управления нагружением и измерениями. Проводится предварительная (пробная) обтяжка испытываемого объекта нагрузкой $40-50\% R_{расч.}$

Для повышения качества испытаний при статических испытаниях используется автоматизированные системы с применением ПК, математическое и программное обеспечение которых позволяет выполнять следующие функции:

- управление пространственным положением испытываемой конструкции по любой координате (крен, тангаж, высота);
- автоматическое нагружение объекта испытания с целью воспроизведения реальных нагрузок, прикладываемых к конструкции в соответствии с заданной программой;
- автоматическое сравнение реализуемых силовозбудителями нагрузок с заданными и выдача сообщений оператору и в систему нагружения (ввод и корректировка необходимых исходных данных в процессе испытаний);
- защиту конструкции от повреждения и контроль состояния технологического оборудования;
- тестирование и диагностику элементов системы управления

4.11. ПРОВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЛА

4.11.2 Второй этап испытаний

Основными технологическими режимами работы ИВС является:

- а) обтяжка;
- б) режим статических испытаний до эксплуатационных нагрузок;
- в) режим нагружения до расчетных нагрузок или разрушения;
- г) режим усталостных испытаний.

Для сбора, регистрации и обработки данных экспериментов рекомендуется применять информационно-измерительные системы (ИИС) с быстродействием не менее 20 измерений в секунду в комплексе с ПК. Погрешность ИИС, без учета погрешности датчиков, не должна превышать 0,5% диапазона измерений.

Нагружение проводится согласно таблицам нагрузок, в которых указываются температура и влажность в процессе испытаний.

Таблицы нагрузок, прикладываемых на испытываемые изделия, и схемы рычажных систем регистрируются в специальном журнале.

После поканальной наладки стенда нагружения проводится пробная обтяжка объекта до нагрузок $40-50 \% P_{\text{расч.}}$ - ступенями по $5+10 \% P_{\text{расч.}}$ при тщательном осмотре стенда и объекта.

4.11. ПРОВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЛА

4.11.3 Третий этап испытаний (нагружение до эксплуатационных нагрузок)

Этап нагружения до эксплуатационных нагрузок может быть разбит на **три подэтапа**:

- первый подэтап - опробование систем, то есть пробное нагружение ступенями через 5+10% до 40+50% расчетной нагрузки и тщательный осмотр конструкции и всех систем, занятых в испытании;
- второй подэтап - обтяжка испытываемого объекта ступенями через 5+10% до эксплуатационной нагрузки с проведением необходимых тензоизмерений и параллельным осмотром конструкции и систем при нагружении и с тщательным осмотром конструкции после снятия нагрузки на предмет обнаружения остаточных деформаций;
- третий подэтап - нагружения объекта для производства 3^x кратных замерами по тензометрии и общим деформациям конструкции, как правило, для этого нагружения ведутся этапами (ступенями) через 5+10% до 67% от расчетной нагрузки всего выполняется до 10 этапов (ступеней).

4.11. ПРОВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЛА

4.11.3 Третий этап испытаний (нагружение до эксплуатационных нагрузок)

Ведущий инженер по испытаниям ведет постоянное наблюдение за нагружением и состоянием испытываемого объекта, за состоянием рычажных систем и систем страховки, в случае необходимости, дает соответствующие команды об изменении режимов нагружения.

Время нагружения одного этапа (увеличение нагрузки на 5-40%) не должно быть затянутым. Если нагружение одного этапа происходит долго и в процессе нагружения отдельные точки не могут достичь заданной нагрузки, а объект имеет тенденцию отклонения в пространстве от первоначального положения то весьма вероятно, что система не уравнивается. В этом случае объект необходимо разгрузить и прекратить испытания. После устранения выявленных неполадок нагружение можно продолжить.

Ненатянутыми должны быть тросы и рычажные системы верхних и боковых сил, страхующих основные нагружающие системы на случай их отказа, при этом провисание страхующих систем допускается не более 5% их длины. Нагрузка доводится до эксплуатационной в соответствии с заданием на данное испытание, а затем производится ступенчатая разгрузка.

4.11. ПРОВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЛА

4.11.3 Третий этап испытаний (нагружение до эксплуатационных нагрузок)

После проведения испытаний ведущий инженер по испытаниям совместно с руководителями групп по обеспечению и проведению эксперимента проводит анализ неполадок и вырабатывает мероприятия по их устранению для продолжения работы.

После окончания испытаний и обработки на ПК материалов тензометрии результаты измерений просматриваются и анализируются. При необходимости принимается решение о повторении нагружения с отсчетами по тензометрии. Участки изоны, в которых обнаружены значительные величины напряжений, подвергаются наиболее тщательному осмотру.

Если при нагружении до эксплуатационных нагрузок обнаруживаются разрушения или недопустимые остаточные деформации, то конструкция ремонтируется (дорабатывается). После доработки статические испытания повторяются в описанном порядке.

4.11. ПРОВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЛА

4.11.4 Четвертый этап (нагружение до расчетных нагрузок или разрушения)

После нагружения конструкции до эксплуатационных нагрузок и анализа проведенных замеров производится подготовка всех систем для испытания до расчетных нагрузок или разрушения согласно программе испытаний.

Система нагружения, как правило, проверяется уже при нагружениях до эксплуатационных нагрузок и перед нагружением до расчетных нагрузок необходимо устранить все замеченные неполадки. Особое внимание необходимо уделить достаточности ходов штоков силового возбудителя, безопасности персонала, участвующего в испытаниях, и страховке испытываемого объекта при вероятном разрушении какого-нибудь агрегата.

Если производятся кино- и фотосъемки, то заранее выбираются места установки аппаратов, средств освещения и производится инструктаж персонала, занятого на кино- и фотосъемках.

В процессе испытаний до расчетных нагрузок не делаются длительные остановки при нагружении выше эксплуатационных нагрузок, а, как только достигается заданная нагрузка, через 3-5 сек. дается команда о нагружении следующей и так продолжают грузить до достижения заданной программой испытаний нагрузки или до момента разрушения.

4.11. ПРОВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЛА

4.11.4 Четвертый этап (нагружение до расчетных нагрузок или разрушения)

В случае, когда испытания ведутся до $100\% R_{\text{расч.}}$, на этапе $67\% R_{\text{расч.}}$ следует сделать остановку и тщательно осмотреть конструкцию и нагружающие системы (запас ходов силовозбудителей, наличие деформаций). При нагружении до расчетных нагрузок необходимо производить регистрацию показаний всех каналов нагружения и представление результатов измерений по окончании испытаний.

После достижения заданной нагрузки производится ступенями разгрузка до эксплуатационной нагрузки и остановка для осмотра конструкции испытываемого объекта. В случае разрушения испытываемого объекта нагрузка в некоторых точках может упасть до нуля, а отдельные точки могут перегрузиться. Поэтому, как только произойдет разрушение, необходимо дать команду о снятии нагрузки на "перегруженных" точках до той, которая была перед разрушающей нагрузкой и далее ступенями снижать ее до уровня эксплуатационной, а после осмотра объекта нагрузку нужно снять до нуля.

4.11. ПРОВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЛА

4.11.4 Четвертый этап (нагружение до расчетных нагрузок или разрушения)

В дальнейшем производятся испытания тех агрегатов, которые сохранились после предыдущих испытаний до разрушения, но их следует тщательно осматривать и принимать решение об их испытании, только убедившись, что повреждений эти агрегаты не имеют. Нагрузки на уравнивающих силах можно получать как реакции, но они не должны превышать расчетных величин, заданных таблицами нагрузок, при достижении максимальных значений на основных нагружающих силах. Особенное внимание на это нужно обратить в тех случаях, когда какой-либо агрегат испытываемого объекта доводится до разрушения.

Узлы (агрегаты) и детали, подвергавшиеся статическим испытаниям, к установке на летное изделие без документального оформления и разрешения главного конструктора не допускаются.

4.11. ПРОВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЛА

4.11.5 Проведение

тензометрии

Нагружение до эксплуатационной нагрузки (до 67% от расчетных нагрузок) проводится ступенями по 5-10% $R_{расч}$. При достижении каждой ступени нагружения производится запись показаний тензорезисторов и дистанционных датчиков перемещений.

Нагрузка на каждой ступени выдерживается в течении времени, необходимого для регистрации показаний измерительных приборов и проведения необходимых осмотров состояния испытываемой конструкции и систем стенда нагружения. Опрос тензорезисторов на каждой ступени проводится три раза, для уменьшения вероятности вмешательства случайной погрешности. Также проведение 3-х кратных замеров позволяет оценить достоверность напряженно-деформированного состояния конструкции.

После достижения 67 % от расчетной нагрузки производится разгрузка стенда ступенями по 5-10 % $R_{расч}$. При достижении каждой ступени разгружения производится запись показаний тензорезисторов.

Результаты тензометрии записываются программой информационно- измерительной системы для дальнейшего анализа. При обработке результатов измерений производится линейный прогноз на 90% и 100% $R_{расч}$.

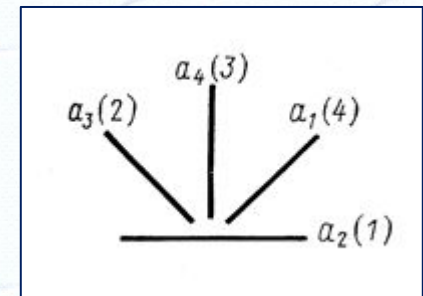
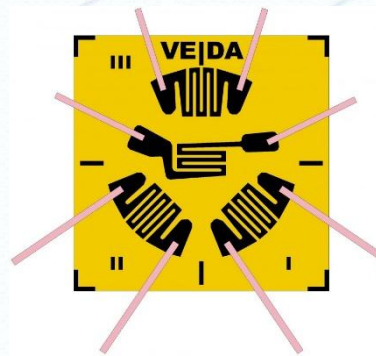
4.11. ПРОВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЛА

4.11.6 Обработка результатов тензометрии

Напряженное состояние конструкции летательных аппаратов при нормальных температурах определяется по показаниям одиночных тензорезисторов при одноосном поле напряжений или тензометрических розеток при двухосном поле напряжений. Напряжения в одноосном поле определяются по формуле:

$$\sigma = E(T) \cdot \varepsilon$$

$E(T)$ – модуль упругости материала
конструкции при
температуре
испытаний T



Розетка из 4
тензодатчиков

4.11. ПРОВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЛА

4.11.6 Обработка результатов

тензометрии

При двухосном напряженном состоянии деформации измеряются тензометрическими розетками.

Для определения главных напряжений необходимо знать не менее трех величин напряжений в произвольно выбранных направлениях. Для этой цели используются различные типы тензометрических розеток.

Наличие в розетке четырех тензорезисторов позволяет производить контроль правильности результатов измерений. Определение величины и направления главных напряжений по показаниям тензорезисторов данной розетки может производиться по формулам:

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{\max} + \mu \varepsilon_{\min}) = A'' + B'';$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{\min} + \mu \varepsilon_{\max}) = A'' - B'';$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_4}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} = \frac{\varepsilon_2 - A}{\varepsilon_1 - A} = \frac{A - \varepsilon_4}{A - \varepsilon_3},$$

$$A'' = A \frac{E}{1-\mu};$$

$$B'' = B \frac{E}{1+\mu};$$

$$\varepsilon_{\max} = A + B;$$

$$\varepsilon_{\min} = A - B;$$

$$A = \frac{1}{4} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4) = \frac{1}{2} (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) = \frac{1}{2} (\varepsilon_2 + \varepsilon_4);$$

$$B = \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_4)^2} = \sqrt{(\varepsilon_1 - A)^2 + (\varepsilon_2 - A)^2} = \sqrt{(\varepsilon_3 - A)^2 + (\varepsilon_4 - A)^2}.$$

$\operatorname{tg} 2\alpha$ – угол между направлением главного напряжения и направлением первого тензорезистора



