

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

-----

МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
( ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ )

---

**М.К. ЛЕОНТЬЕВ**

**ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЕ В  
АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ**

Учебное пособие

Утверждено  
на заседании редсовета  
21 февраля 2000

Москва  
Издательство МАИ  
2001

УДК 629.7.036-251(075.08)

**Леонтьев М.К. Тензометрирование в авиационных газотурбинных двигателях:** Учебное пособие. - М.: Изд-во МАИ, 2000. - 36 с.:ил.

Учебное пособие предназначено для изучения экспериментальных методов исследования напряженного состояния деталей и узлов в газотурбинных двигателях и, в частности, тензометрирования. Описаны цели и методы тензометрирования. Рассмотрены средства тензометрирования и их основные характеристики. Описаны конструкции и свойства тензорезисторов. Дано описание преобразователей основных механических величин. Рассмотрены тензометрические схемы и способы градуировки.

Предназначено для студентов, изучающих дисциплины “Конструкция и проектирование ВРД”, “Динамика и прочность”, “Колебания в двигателях летательных аппаратов” и выполняющих лабораторные работы по тензометрированию деталей авиационных ГТД.

Рецензенты: В.В.Иткин, М.Е.Колотников

© Московский государственный авиационный институт  
(технический университет), 2001

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Существует два направления в изучении напряженного состояния деталей и узлов конструкций авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) - расчетное и экспериментальное.

Современные расчетные методы дают возможность смоделировать практически любую форму детали или узла, различные условия внешнего нагружения - статические, динамические, температурные, позволяют получить напряженно-деформированное состояние (НДС) практически в любой точке детали. Точность расчетов очень высока и позволяет проектировать детали с высокой долговечностью и надежностью.

Вместе с тем в расчетных условиях не всегда представляется возможным правильно назначить действительные условия нагружения деталей - величины нагрузок, закономерности их проявления. Не всегда расчетная модель учитывает особенности формы детали. Не всегда используемые расчетные методы или сам конструктор учитывают все механизмы нагружения деталей в условиях эксплуатации. Поэтому экспериментальная оценка НДС деталей, хотя бы в отдельных, наиболее опасных точках является непременным, обязательным и завершающим этапом в исследовании работоспособности, долговечности и надежности деталей и узлов конструкций ГТД.

Для экспериментального определения НДС деталей и узлов авиационных двигателей применяются различные методы и средства, в которых используются различные принципы измерений. Среди них - рентгеновские, поляризационно-оптические (методы фотоупругости), хрупких и гальванических покрытий, методы, основанные на масштабном преобразовании деформаций поверхности детали с помощью тензометров и тензометрических преобразователей - *тензометрирование*.

С помощью тензометрирования определяется действительное НДС элементов, деталей и узлов, возникающее на эксплуатационных или специальных режимах работы конструкции. Основные цели тензометрирования следующие [1]:

- изучение действительных условий работы и нагружения деталей и узлов;
- определение фактических внешних нагрузок, статистических или функциональных закономерностей их появления;
- измерение деформаций и напряжений в узлах и деталях, возникающих при работе;
- установление запасов прочности и совершенствование конструктивной формы отдельных узлов и деталей;

- идентификация и оптимизация математических моделей, используемых для анализа НДС расчетными методами, установление масштабных факторов;
- проверка соответствия напряженно-деформированного состояния расчетным данным;
- определение количественных показателей надежности деталей и узлов при нормальной эксплуатации и при специальных режимах работы.

В основе тензометрирования лежат методы измерения и анализа деформаций, что, в свою очередь, дает возможность оценки действующих в конструкции напряжений.

Различают статическое и динамическое тензометрирование. Основная задача статического тензометрирования - получение и обработка информации о деформациях под действием статических или медленно меняющихся нагрузок на объект исследования.

Экспериментальное решение этой задачи позволяет найти распределение напряжений в узлах и деталях под действием внешних статических нагрузок, температурных полей и т.д.

Обычно при решении этой задачи измерения проводятся в большом количестве точек - от десятков до нескольких сотен. Поэтому весьма важно при проведении таких измерений быстроедействие средств тензометрирования (тензопреобразовательной аппаратуры). Быстродействующие аналогово-цифровые преобразователи в сочетании с современными ЭВМ позволяют решить эту задачу.

Тензометрирование может проводиться как при упругих, так и при упругопластических деформациях деталей. С помощью тензометров могут быть замерены остаточные напряжения на поверхности детали, а также внутренние напряжения, появившиеся в процессе изготовления деталей.

Получение и обработка информации о зависимостях между действующими быстроменяющимися нагрузками и деформациями в узлах и деталях объекта исследования относится к динамическому тензометрированию. Число точек измерений, в которых одновременно проводятся измерения, может достигать нескольких сотен. Диапазон частот может меняться в широких диапазонах - от 0 до 50 КГц.

Для авиационных двигателей статическое и динамическое тензометрирование в первую очередь используется при оценке прочностных свойств валов, лопаток, дисков, корпусов двигателя и агрегатов, трубок топливных и масляных систем.

# 1. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ

## 1.1. Методы и средства тензометрирования

Методы тензометрирования различают по физическим принципам, положенным в основу средств преобразования деформации, - тензометров и тензометрических преобразователей. Тензометры и тензометрические преобразователи делят на механические, оптические, пневматические, струнные (акустические) и электрические.

Наибольшее распространение получили методы тензометрирования, использующие электрические тензометры и преобразователи. Их действие основано на изменении параметров электрической цепи тензометра (сопротивления, емкости или индуктивности) или генерирования электрических сигналов в соответствии с измеряемой деформацией. Среди электрических тензометров - тензометры сопротивления, индуктивные, емкостные, пьезоэлектрические и индукционные. Наиболее массово используются тензометры сопротивления (*тензорезисторы*), действие которых основано на изменении сопротивления металлов или полупроводников при деформациях.

Электротензометрирование осуществляют с помощью комплекса средств измерений. Они включают (ГОСТ 16263-70) первичные преобразователи (тензометры), промежуточные преобразователи (электрические схемы), измерительные приборы (регистраторы) и меры.

## 1.2. Первичные преобразователи

Первичными преобразователями при тензометрировании являются тензорезисторы, преобразующие измеряемую деформацию в изменение сопротивления.

При измерении механических величин (перемещений, сил, давлений) с применением тензорезисторов первичными преобразователями являются чувствительные элементы (обычно упругие), преобразующие измеряемую механическую величину в деформацию упругого элемента, которая в свою очередь воспринимается наклеенными на них тензорезисторами. На рис. 1 показаны схемы чувствительных элементов преобразователей механических величин.

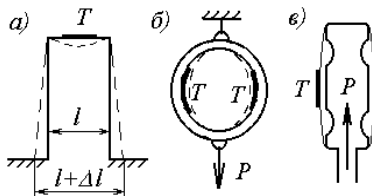


Рис.1. Схемы чувствительных упругих элементов тензорезисторных преобразователей:

*a* - перемещения; *б* - силы; *в* - давления

На рис.1,*a* показана П-образная скоба с наклеенным на нее тензорезистором. Перемещения опорных концов вызывают изгиб и, соответственно, деформацию верхней части скобы. Скоба в данном случае выполняет роль преобразователя перемещения с коэффициентом преобразования много меньше 1. Это позволяет привести величину измеряемых перемещений (обычно несколько миллиметров) в соответствие с допустимой деформацией тензорезистора (0.02 мм при базе 20 мм). На рис 1,*б* дана схема тензорезисторного измерителя силы. Деформация кольца пропорциональна силе  $P$ , приложенной к его проушинам. На рис 1,*в* - мембранный узел с наклеенным тензорезистором для измерения давления.

Проволочные тензорезисторы. Чувствительные элементы тензорезисторов могут быть выполнены в виде петлеобразной решетки из тонкой проволоки.

Существующие проволочные тензорезисторы делят на два основных типа:

- одноэлементные тензорезисторы для измерения деформаций в каком-то одном направлении;
- многоэлементные тензорезисторы для одновременного измерения деформаций в нескольких направлениях.

Некоторые конструкции таких тензорезисторов показаны на рис.2.

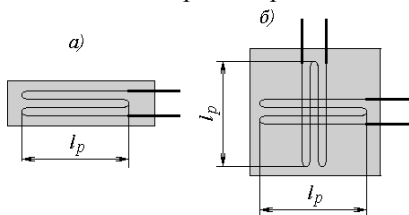


Рис.2. Проволочные тензорезисторы:

*a* - одноэлементный - многовитковой с петлевой решеткой; *б* - многоэлементный - две решетки под углом  $90^\circ$ ;  $l_p$  - активная база тензорезистора

Применяемые материалы - константан (60%Cu+40%Ni), манганин (84%Cu+12%Mn+4%Ni), нихром (80%Ni+20%Cr) и др. Проволока может быть получена методом волочения (диаметр от 10 до 30 мкм) или методами микрометаллургии (2...6 мкм).

Проволочные тензорезисторы отличаются относительной простотой изготовления, в равной степени пригодны при измерениях статических и динамических деформаций, для измерения упругих и упругопластических деформаций. Вследствие высокого совершенства формы сечения и качества поверхности проволока обладает хорошей деформируемостью и динамической стойкостью. Она легко поддается термообработке, что позволяет использовать ее для высоко- и низкотемпературной тензометрии. Тензорезисторы из проволоки обладают хорошими метрологическими свойствами.

На рис. 3 показана конструкция тензорезистора с проволочным чувствительным элементом. Чувствительный элемент проволочного тензорезистора 1 прикрепляют к основе 2 из изоляционного материала (бумага, синтетическая пленка и др.) с помощью связующего 3 (клея, цемента), который передает деформацию чувствительному элементу. Для электрического соединения тензорезистора с измерительными схемами имеются выводы 4.

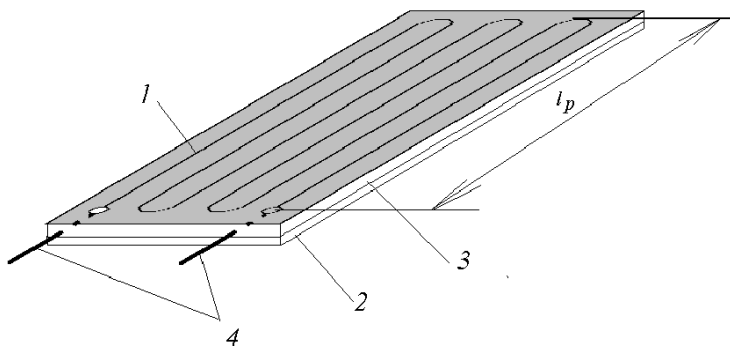


Рис.3. Конструкция тензорезистора с проволочным чувствительным элементом

Проволочные тензорезисторы на бумажной основе могут работать при температурах до 225...325 К. Тензорезисторы для повышенных температур имеют стеклотканевую или органосиликатную основу и могут выдерживать до 475...725 К.

В табл. 1 приведены некоторые типы проволочных тензометров и их основные характеристики

Таблица 1

Маркировка	Номинальное сопротивление R, Ом	Рабочий диапазон температур Т, К	Активная база $l_p$ , мм	Габаритные размеры	
				L, мм	B, мм
ПНКБК-3-50	50	225-325	3	9	4
ПНКБК-5-75	75		5	11	4
ПНКБК-10-150	150		10	16	4
ПНКБК 20-150	150		20	25	4
E428-001	120	295-395	3	8	9
E428-002	145		3	8	9
E428-023	400		10	25	11
E-428-031	400		23	35	7
E428-035	500	295-415	23	35	9
ДКТ-С	205,5	235-475	20	33	5
ЛХ-354	700	225-575	23	33	7
НФЦ15-10-200	200	295-725	10	28	8

Фольговые тензорезисторы. Другим распространенным типом тензорезисторов являются фольговые. Технология их изготовления основана на использовании фотохимических процессов и обеспечивает получение решеток толщиной от 5 до 10 мкм, практически любой формы, с базами от 0,3 мм и более (рис.4).

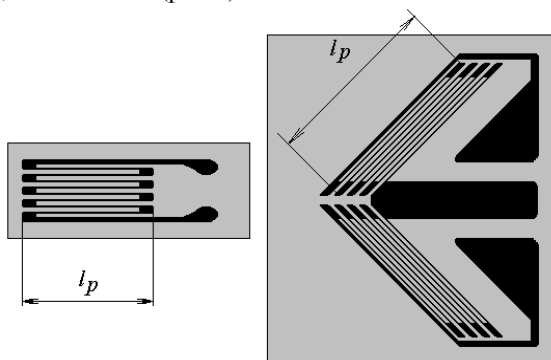


Рис.4. Фольговые тензорезисторы с различными конструкциями решетки

Для изготовления решеток используются те же материалы, что и для проволочных тензорезисторов. Основой является пленка из синтетической смолы или бумага, пропитанная клеем. Выводы тензорезисторов обычно выполняют из медной проволоки.



Фольговые тензорезисторы имеют, как правило, более высокие технико-метрологические характеристики по сравнению с проволочными и, в частности, большие рабочие токи, большие выходные сигналы, меньшую чувствительность в поперечном направлении.

Полупроводниковые тензорезисторы. Чувствительные элементы могут быть также образованы напылением в вакууме полупроводниковой пленки. Такие датчики называются *пленочными*. Полупроводниковые тензорезисторы используют в основном для холодного тензометрирования, так как при нагревании они меняют свои свойства.

Все вышеперечисленные датчики прикрепляются на поверхность чувствительного деформируемого элемента или непосредственно детали с помощью связующих материалов. Тип связующего материала определяется температурой поверхности, на которую наклеивается тензорезистор, а также от величины ожидаемых напряжений. Для турбинных (горячих) деталей используются различного вида цементы, для компрессорных (холодных) - различные клеи.

Прикрепляемые датчики используются для измерения относительной деформации  $\mathcal{E}_i$  в пределах 0.005...2%.

Измерительная база тензометров для измерения динамических деформаций выбирается с учетом длины волны исследуемого процесса.

К основным достоинствам тензорезисторов относятся:

- \* возможность измерения деформаций при разных размерах базы, начиная с десятых долей миллиметра;
- \* возможность дистанционного измерения в большом количестве точек;
- \* возможность измерения в широком диапазоне температур при самотермокомпенсации;
- \* возможность измерения при различных внешних условиях (влажность, давление, ионизирующее излучение и др.), неблагоприятных для других измерительных средств;
- \* возможность измерения многокомпонентных деформаций.

Тензорезисторы имеют также:

- \* незначительную массу;
- \* широкий частотный диапазон, включающий статические деформации и низкий порог реагирования;
- \* высокую надежность;
- \* сравнительно низкую стоимость.

Среди недостатков:

- \* невозможность индивидуальной градуировки;
- \* возможность только однократного применения;

\* относительно невысокая чувствительность и относительно низкий уровень выходных сигналов;

\* для проволочных тензорезисторов трудность образования сложных решеток, а также решеток с базой менее 3 мм.

### 1.3. Промежуточные преобразователи

К числу промежуточных преобразователей относятся электрические схемы и усилители, объединяемые вместе с блоками питания в тензостанции. Электрические схемы выполняют роль преобразования изменения сопротивления тензорезисторов в изменение электрического сигнала на выходе из промежуточного преобразователя. Различают потенциметрические электрические схемы, рис. 5, а и мостовые, рис.5, б.

На рис. 5, а введены следующие обозначения:  $R_1$  - компенсационный датчик;  $R_2$  - рабочий датчик (тензометр);  $U$  - напряжение питания;  $\Delta U$  - падение напряжения на рабочем датчике. Промежуточные преобразователи по потенциметрическим схемам выполняются обычно для измерения динамических деформаций. Поэтому для исключения постоянной составляющей устанавливают конденсатор  $C$ . Если сопротивление нагрузки  $R_H \gg R_2$ , то при скачкообразном изменении деформации тензорезистора, вследствие изменения его сопротивления на  $\Delta R$ , на выходе появится сигнал

$$\Delta U \approx \frac{R_1 \cdot \Delta R}{(R_1 + R_2)^2} \cdot U$$

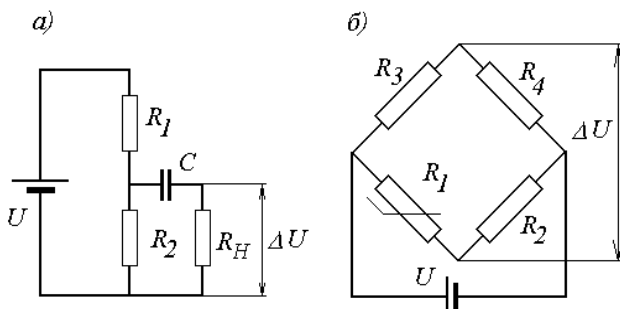


Рис.5. Схемы включения тензометров в измерительную цепь:  
а - потенциметрическая; б - мостовая

Мостовая схема включения тензометра представлена на рис.5, б. Здесь  $R_3$  - тензометр;  $R_2, R_4$  - нерабочие сопротивления;  $R_1$  - регулируемое сопротивление (реохорд). Обычно мост имеет полную симметрию

$R_1=R_2=R_3=R_4$ . При условии  $R_1R_4=R_2R_3$  мост уравновешен и ЭДС на выходе моста равна 0. При изменении сопротивления тензометра на  $\Delta R$  получим падение напряжения

$$\Delta U \approx \frac{U}{4} \frac{\Delta R}{R} .$$

Приведенная мостовая схема включения датчика применяется для статического тензометрирования, однако с небольшими изменениями она может быть использована для тензометрирования и переменных деформаций.

Усилители. Величина электрического сигнала на выходе тензорезистора очень мала (обычно несколько милливольт). Поэтому для усиления сигнала применяются тензометрические усилители - масштабные преобразователи, не меняющие в процессе преобразования физической природы преобразуемого сигнала.

#### 1.4. Измерительные приборы

Преобразование электрических сигналов в форму, удобную для восприятия наблюдателем, производится с помощью измерительных приборов.

Измерительные приборы могут классифицироваться по принципу действия:

- \* приборы прямого действия - напряжение, возникающее на измерительной диагонали мостовой схемы вследствие деформации тензорезистора, усиливается и подается на показывающий или регистрирующий прибор;

- \* приборы сравнения - сопротивление тензорезистора сравнивается с эталонными сопротивлениями или напряжение на измерительной диагонали моста сравнивается с напряжением от калиброванного источника тока.

Измерительные приборы могут также делиться на приборы визуальные (шкальные и цифровые) и регистрирующие.

В качестве регистрирующих приборов могут использоваться:

- \* магнитографы с регистрацией данных на магнитной пленке;

- \* электронно-лучевые осциллографы с регистрацией данных на фотопленке (шлейфовые осциллографы);

- \* измерительные комплексы - анализаторы, построенные на базе ЭВМ. Информация в процессе измерений преобразуется с помощью АЦП (аналогово-цифровых преобразователей) в числовую форму и записывается в памяти компьютера на жестких дисках.

Специальные программы-анализаторы могут практически мгновенно провести амплитудный анализ полученного сигнала, частотный анализ для переменных величин, статистический анализ и др.

### 1.5. Меры

К мерам относятся средства, с помощью которых можно воспроизвести физические величины заданного размера, а также провести градуировку измерительной цепи. Среди этих средств :

\* устройства для воспроизведения заданных деформаций - изгибаемые балки равного сопротивления изгибу, равного момента или растягиваемые стержни равного сечения;

\* камертонные устройства для задания переменных деформаций определенной частоты и амплитуды;

\* для тензорезисторных преобразователей механических величин - градуировочные устройства. Например, для воспроизведения величин деформаций используют компараторы;

\* для воспроизведения электрических сигналов, необходимых при градуировке промежуточных преобразователей, тензометрических приборов, и измерительных устройств - тензокалибраторы и калиброванные источники постоянного или переменного тока.

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ И СВОЙСТВА ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

Измерение деформаций с помощью тензорезисторов основано на тензоэффекте - свойстве материалов менять электропроводность (электрическое сопротивление) при изменении объема или напряженного состояния. Тензоэффект характеризуется величиной, устанавливающей связь между относительным сопротивлением  $\rho$  и относительной деформацией  $\varepsilon$  в направлении измерений.

Тензочувствительность проводника характеризуется зависимостью

$$S_M = \frac{\Delta R_M l_M}{R_M \Delta l_M} = 1 + 2\mu + m \quad ,$$

где

$l_M$ ;  $R_M$ ;  $\Delta l_M$ ;  $\Delta R_M$  - длина и сопротивление тензочувствительного элемента и их приращение вследствие деформации;

$\mu$  - коэффициент Пуассона;

$m$  - коэффициент, учитывающий изменение физических свойств материала.

В формуле члены  $1 + 2\mu$  определяют зависимость величины  $S_M$  от изменения геометрии, а последний член - от изменения свойств материала образца.

В табл. 2 показаны характеристики некоторых проводниковых тензочувствительных сплавов.

Таблица 2

Тензочувствительные материалы	$\rho$ , Ом·см	$\varepsilon$ , %	$S_M$	Компоненты
Константан	500	1...2	2...2.3	Cu+Ni
Манганин	450	2...3	0.4	Cu+Mn+Ni
Нихром	1000	1...1.5	2.1...3	Ni+Cr
Платинородий	200	1.5...2	5.5	Pt+Rh

Для большинства материалов при простом напряженно-деформированном состоянии коэффициент  $\mu = 0,3$ , поэтому разница в величине  $S_M$  объясняется изменением коэффициента  $m$ , зависящего от удельного сопротивления, температуры, деформации.

Чувствительность тензорезисторов  $S_T$  отличается от чувствительности материала и зависит также от свойств связующего, влажности, температуры. Для проволочных петлевых тензорезисторов наиболее влияющим фактором является их база - из-за чувствительности петель к поперечным деформациям, а также вследствие того, что петли являются менее активными участками решетки при восприятии продольных деформаций. При уменьшении базы тензорезистора его чувствительность уменьшается из-за увеличения относительной длины петлевых участков.

На чувствительность тензорезистора существенным образом влияет качество его приклейки к поверхности, т.е. от условий передачи деформации на тензорезистор.

Наличие поперечных к оси тензометра деформаций поверхности также может вызвать некоторое изменение сопротивления, а следовательно, изменить и характеристику тензочувствительности. Поэтому для повышения точности измерений при конструировании тензорезисторов поперечную тензочувствительность датчика стремятся свести к 0.

Ползучесть тензорезисторов - затухающий процесс изменения сопротивления при постоянной деформации. Определяется несовершенством характеристик основы тензорезистора и связующего.

Обычно ползучесть тензорезистора не превышает 0.5...5% за 1 ч. В наибольшей степени проявляется при первом нагружении после приклейки.

Механический гистерезис имеет место при циклических нагружениях преимущественно в пределах первых циклов. Проявляется в виде невоспроизводимости отсчетов (при равных деформациях) при нагружении и разгрузке. Величина гистерезиса колеблется в пределах 0.5...5% и зависит от конструкции тензорезистора, величины измеряемой деформации, числа предыдущих нагружений, материала основы и клея, температуры и влажности окружающей среды.

Температурные характеристики: температурный коэффициент сопротивления (ТКС), температурный дрейф нуля, температурная ползучесть. ТКС - величина, характеризующая влияние температуры на изменение сопротивления тензорезистора. Она может меняться и в широких пределах и быть источником значительных температурных погрешностей при измерениях. Решение этой проблемы может быть получено схемной компенсацией, применением самотермокомпенсированных тензорезисторов или путем внесения поправок в результаты измерений.

Динамические характеристики тензорезисторов. Среди важнейших - зависимость результатов от соотношения между измерительной базой и длиной волны динамического процесса.

### **3. ГРАДУИРОВКА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

В измерительную схему помимо самого тензорезистора входят другие устройства - преобразователи, усилители, регистраторы, кабели, различного рода соединения. Обладая определенными электрическими характеристиками, они меняют величину и вид проходящего через них электрического сигнала. Для того чтобы учесть эти изменения, требуется проводить полную градуировку тензометрической схемы измерения, начиная от тензометра и кончая регистратором.

Существует два вида градуировки - статическая и динамическая. В обоих случаях устанавливается связь шкалы регистрирующего прибора (выходного параметра) с величиной истинной деформации (напряжения) при нагружении. На рис. 6 показана принципиальная схема измерительной цепи, используемой при статической и динамической градуировке.

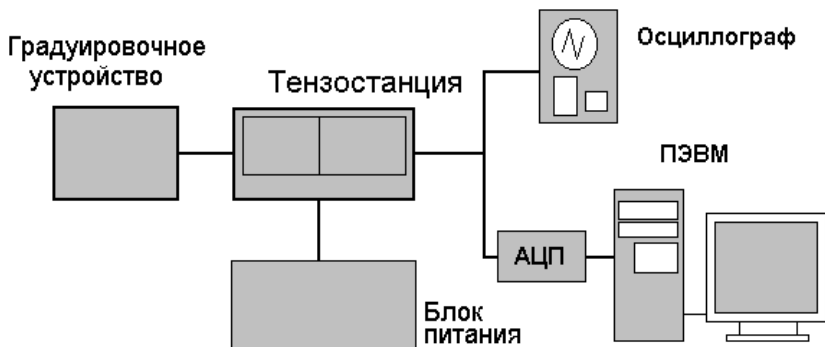


Рис.6. Тензометрическая схема, подлежащая градуировке

### 3.1. Статическая градуировка тензометрической аппаратуры

Для определения градуировочных коэффициентов при статическом тензометрировании используют различные градуировочные устройства. Для большинства устройств основой является упругий элемент, на поверхности которого с помощью системы нагружения воспроизводят деформацию заданной величины. В качестве упругого элемента часто используют балки постоянного сечения и равного сопротивления изгибу.

На рис.7 показана схема градуировочного устройства для определения тензочувствительности тензометра ( $T$ ), а также проведения градуировки измерительной цепи.

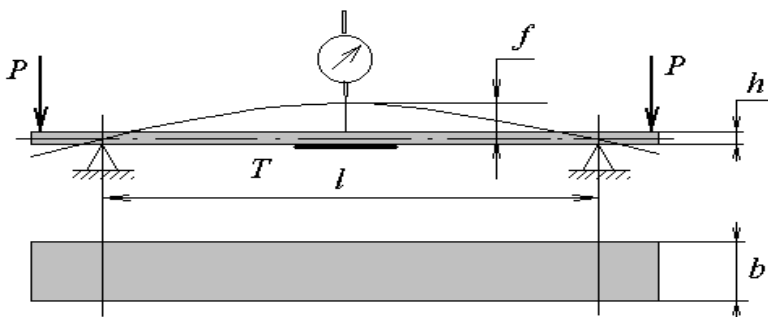


Рис.7. Градуировочное устройство с балкой постоянного сечения

Упругий элемент в виде балки прямоугольного сечения располагается на двух опорах. К консольным концам балки прикладываются равные силы  $P$ , вызывающие ее изгиб. На рабочий участок балки между опорами действует постоянный изгибающий момент, который вызывает равномерную деформацию рабочего участка длиной  $l$ . Приближенная формула для определения относительной деформации балки имеет вид

$$\varepsilon = 4f \frac{h}{l^2}, \quad (1)$$

где

$f$  - прогиб балки (замеряется индикатором часового типа);

$h$  - высота поперечного сечения (5мм);

$l$  - базовая длина (200 мм).

Градуировка тензометрической цепи проводится в следующей последовательности.

Оператор с помощью устройства нагружения последовательно задает калиброванное перемещение упругой балки  $f$  в пределах 0.2...1.2мм с шагом 0.2 мм.

На балке наклеены два тензометра, которые включены в мостовую схему промежуточного преобразователя.

Контроль деформации балки ведется с помощью индикатора часового типа.

Падение напряжения на измерительной диагонали моста регистрируется электронно-лучевым осциллографом, а также через АЦП преобразуется в числовые данные, которые обрабатываются компьютером.

Осциллограф предназначен для наблюдения за результатами в процессе тензометрирования и контроля работоспособности всей измерительной цепочки. На экране компьютера оператор может видеть соответствие используемой шкалы для замера деформации реальному перемещению упругой балки. С помощью дополнительных функций программы компьютера оператор может также быстро получить значения градуировочного коэффициента и вычислить точность, с которой он получен.

Расчет относительной деформации балки градуировочного устройства  $\varepsilon$  ведется в соответствии с формулой (1). Каждому нагружению ставится в соответствие показания шкалы регистрирующего устройства  $A$ , мм. По полученным значениям строится зависимость  $A=f(\varepsilon)$  (рис.8).



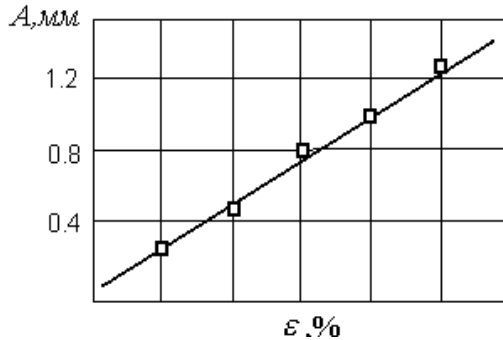


Рис. 8. Определение градуировочного коэффициента

### 3.2. Динамическая градуировка тензометрической цепи

В некоторых случаях для получения высокой точности измерений используются градуировочные устройства камертонного типа [3] (рис. 9).

Разброс камертонной градуировки меньше разброса тензочувствительности. Это связано с особыми свойствами камертона - полностью уравновешенной первой формой колебаний. Моменты и сила в заделке камертона равны нулю и моделируют абсолютно жесткую заделку. При этом такое моделирование жесткой заделки намного точнее чем, например, зажатие в тисках.

В случае камертона не требуется частотная подстройка, так как камертон сам встает на резонансную частоту. Все остальные формы практически мгновенно затухают.

Камертон иногда изготавливают из того же материала и по той же технологии, что и деталь, исследования которой проводятся. Применение одинакового материала позволяет воспроизвести условия, тождественные условиям работы детали, однако это значительно удорожает саму деталь.

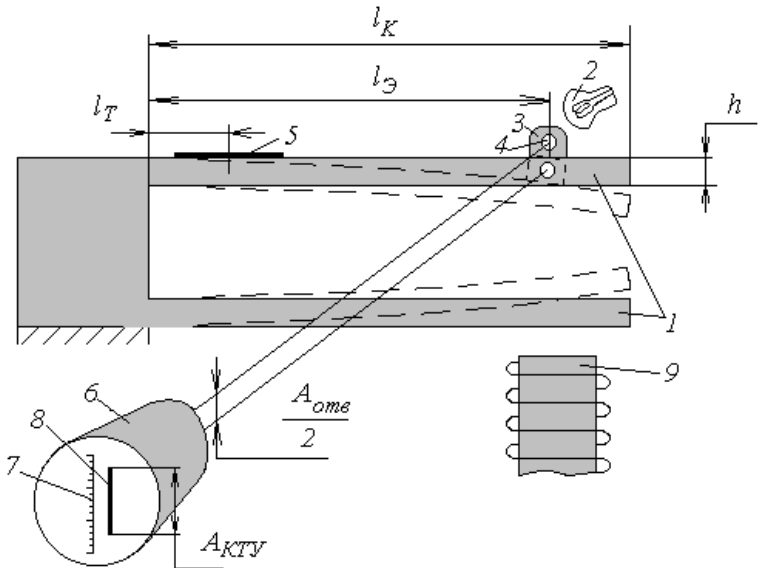


Рис.9. Схема камертонного устройства

При использовании камертонов существует следующая последовательность работ.

\* Рабочий тензорезистор измерительной цепи заменяют тензорезистором 5, наклеенным на камертонное градуировочное устройство (КТУ).

\* С помощью электромагнитной катушки 9 возбуждают гармонические колебания балок камертона 1.

\* Луч света от источника 2, проходя через отверстие 4 в экране 3, колеблющемся на балке камертона с размахом  $A_{отв}$ , проходит через микроскоп 6 и создает световую полосу 8 на экране 7. Размер полосы на экране микроскопа  $A_{КТУ}$ . Коэффициент увеличения  $m = A_{КТУ}/A_{отв}$ .

\* Одновременно сигнал с тензорезистора записывается магнитографом и передается на регистрирующее устройство - шлейфовый осциллограф, анализатор и т.д. Сигнал регистрируется в виде некоторой величины  $A_{РЕГ}$ . Между  $A_{РЕГ}$  и  $A_{КТУ}$  можно установить связь:

$$A_{РЕГ} = K_A A_{КТУ} .$$

Коэффициент  $K_A$  зависит от степени усиления, аппаратуры, силы тока, питающего тензорезистор, и его чувствительности.

\* Если уравнение упругой линии камертона  $y=y(x)$ , то размах полосы на экране микроскопа  $A_{КТУ}$  можно связать с реальным перемещением камертона:

$$A_{КТУ}=mA_{ОТВ}=2\mu y(l_Э).$$

Амплитуда напряжений в месте наклейки тензорезистора  $\sigma_K$  будет пропорциональна

$$\sigma_K = Ks A_{КТУ},$$

где  $Ks$  - градуировочный коэффициент.

Расчетное значение  $\sigma_K$

$$\sigma_K = 0.5E_K h y''(l_T),$$

где  $E_K$  - модуль упругости материала камертона;  $h$  - толщина балки камертона;  $l_T, l_Э$  - расстояние от основания камертона до оси тензорезистора и оси отверстия в экране.

\* Значение градуировочного коэффициента для расчета напряжений

$$Ks = \frac{\sigma_K}{A_{КТУ}} = \frac{0.5E_K h y''(l_T)}{2\mu y(l_Э)}.$$

В этом выражении значения  $y(l_Э)$  и  $y''(l_T)$  могут быть точно рассчитаны по аналитическим зависимостям прогиба консольной балки с помощью функций Крылова.

\* Расчет амплитуды напряжений по показаниям тензорезистора, наклеенного на деталь, можно провести по формуле

$$\sigma_{дет} = \frac{E_{дет}}{E_K} \frac{K_{\sigma}}{K_A} A_{РЕГ},$$

где  $E_{дет}$  - модуль упругости материала детали.

#### 4. ЗАДАНИЕ НА ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ “ГРАДУИРОВКА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ”

При проведении лабораторной работы следует:

Изучить методические указания.

Провести статическую градуировку тензометрической аппаратуры в соответствии с методикой.

3. Оформить отчет по лабораторной работе.

Отчет должен содержать:

- \* теоретические основы работы тензорезисторов;
  - \* перечень технических средств для тензометрических измерений и обработки сигналов;
  - \* принципиальную схему градуировочного стенда;
  - \* методику проведения градуировки;
  - \* таблицу с результатами замеров;
  - \* график с нанесенными экспериментальными точками и аппроксимирующей прямой;
  - \* значение градуировочного коэффициента и его полученную погрешность.
4. Сдать работу преподавателю

### ЛИТЕРАТУРА

1. Тензометрия в машиностроении: Справочное пособие /Под ред. Р.А. Макарова. - М.:Машиностроение, 1975. - 288 с.
2. *И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иоселевич М.* Расчет на прочность деталей машин. Справочник. - М.:Машиностроение, 1993. - 640 с.
3. Динамика авиационных газотурбинных двигателей /Под ред. И.А. Биргера, Б.Ф. Шорра. – М.: Машиностроение, 1981. - 232 с.
4. *Леонтьев М.К., Берне А.Л.* Обеспечение динамической прочности лопаток авиационных ГТД: принципы и практика. - Вестник МАИ, Т.5. 1998. №2.. с.-26-32.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЕ ПРИ ОДНООСНОМ И ПЛОСКОНАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИЯХ

Тензометрирование применяется для исследования одноосного напряженно-деформированного состояния, либо плосконапряженного [1].

Одноосное напряженно-деформированное состояние обычно возникает в деталях двигателя простой формы - валах, рессорах, нагруженных направленными по оси силами, например, при растяжении, сжатии, изгибе.

Плосконапряженное состояние возникает на поверхности деталей сложной формы или под действием сил различного направления.

В большинстве случаев для определения величины и направления главных деформаций достаточно осуществить тензометрирование в трех направлениях.

Если известны направления главных деформаций, то для определения максимальных и минимальных деформаций достаточно измерить деформации в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Величина главной деформации определяется из уравнения

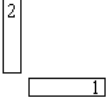
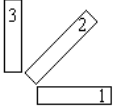
$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\varphi + \frac{\tau_{xy}}{2} \sin 2\varphi,$$

где  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\tau_{xy}$  - продольная, поперечная и сдвиговая деформации, соответственно;  $\varphi$  - углы между осями тензорезисторов.

Если измерения деформаций выполнять в направлениях под определенными углами друг к другу (например, 0-45-90°), то решение уравнения упрощается.

В табл. 1 приведены зависимости между деформациями, измеренными многоэлементными тензорезисторами (розетками) различных форм для определения максимальных, минимальных деформаций, а также деформаций сдвига и углов между направлениями измерений и направлением максимальных деформаций.

Таблица 1

<p>Определяемые величины</p>	<p>Двух элементная розетка</p> 	<p>Трехэлементная розетка</p> 
<p>Максимальные нормальные деформации <math>\varepsilon_{max}</math></p>	$\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2$	$\frac{1}{2} \left\{ (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) + \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]^2} \right\}$
<p>Минимальные нормальные деформации <math>\varepsilon_{min}</math></p>	$\varepsilon_1 - \mu\varepsilon_2$	$\frac{1}{2} \left\{ (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) - \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]^2} \right\}$
<p>Максимальные деформации сдвига <math>\tau_{max}</math></p>	$\varepsilon_1 - \varepsilon_2$	$\frac{1}{2} \left\{ \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + [2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)]^2} \right\}$
<p>Угол <math>\varphi</math> между осью тензорезистора (1) и направлением главных деформаций</p>	<p>0</p>	$\frac{1}{2} \arctan \frac{2\varepsilon_2 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}$

Пересчет измеренных деформаций в эквивалентные значения механических напряжений производится на основании соотношений закона Гука для плосконапряженного деформированного состояния:

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

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

$$\sigma_{max \tau} = \frac{E}{2(1 + \mu)} \tau_{max} \quad .$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ГТД

### 1. Общие положения

Основная цель экспериментальных работ по динамической прочности деталей и узлов обеспечение усталостной прочности деталей в эксплуатации. Этот вид работ является одним из наиболее сложных, длительных и дорогостоящих аспектов доводки любого двигателя. Усталостная прочность детали (узла) определяется *запасом усталостной прочности*  $k_v$ :

$$k_v = \frac{\sigma_a}{\sigma_v^*}.$$

Здесь  $\sigma_v^*$  - максимальные действующие динамические напряжения;  $\sigma_a$  - предел усталостной прочности.

Величины  $\sigma_v^*$  и  $\sigma_a$  являются расчетно-экспериментальными оценками, отражающими минимально возможную при заданном уровне вероятности усталостную прочность. Эти величины должны учитывать влияние всего многообразия конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов.

Основным видом экспериментального определения действующих напряжений является тензометрирование. Тензорезистор крепится на поверхность детали, и мгновенные значения его сопротивления регистрируются записывающей аппаратурой (магнитографы, устройства записи на МД и т.п.). Тензометрирование проводится на работающем двигателе в стендовых условиях или на борту ЛА. Условия испытаний должны учитывать основные факторы, влияющие на вибронпряженность деталей.

Допустимые значения запасов усталостной прочности  $[k_v]$  задаются для каждого вида деталей и режимов работы нормами прочности. Эти нормы отражают накопленный опыт и периодически уточняются и дополняются. Среди основных деталей авиационных ГТД, подлежащих обязательному тензометрированию: корпуса, лопатки компрессоров и турбин, диски компрессоров и турбин, трубки топливных и масляных магистралей.

## 2. Тензометрирование лопаток

Большое количество дефектов лопаток в эксплуатации связано с действием переменных напряжений, возникающих при вибрациях лопаток. С помощью расчетных методов или статистических данных по выполненным ранее конструкциям оценить уровень напряжений в лопатках и выделить места максимальных можно лишь приближенно. Поэтому в процессе доводки для обеспечения надежной работы лопаток необходимо экспериментально определить переменные напряжения.

Тензометрирование является основным методом и широко применяется для экспериментального определения переменных напряжений в лопатках рабочих колес компрессоров и турбин на работающих двигателях в условиях, близких к эксплуатационным [2,3].

При тензометрировании лопаток весьма важным является правильно выбрать места наклейки тензометров и их ориентацию. Поэтому перед началом тензометрирования следует построить расчетную резонансную диаграмму, на которой показаны линии частот собственных колебаний и их изменение с условиями работы.

При первых испытаниях проволочные тензодатчики наклеивают на спинку лопатки вблизи корневого сечения. По ним можно установить резонансные частоты и напряжения у корня. Далее для каждого резонанса, находящегося в рабочей зоне, необходимо определить место расположения максимальных динамических напряжений. Это может быть проведено разными методами - расчетными с помощью метода конечных элементов или методами голографической интерферометрии.

Дальнейшее тензометрирование ведут по датчику, наклеенному непосредственно в зоне максимальных напряжений, или же с использованием коэффициентов пересчета напряжений:

$$k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{изм}}},$$

где  $\sigma_{\max}$  - максимальное напряжение;  $\sigma_{\text{изм}}$  - напряжение в месте измерения.

Из-за разброса напряжений на отдельных лопатках тензометрировать необходимо по несколько лопаток на каждой ступени (обычно по шесть). Предварительное тензометрирование на рабочих режимах ведут при медленном изменении частоты вращения.

При обнаружении повышенных напряжений проводят настройку на резонанс каждой из исследуемых лопаток. Полученную информацию записывают на магнитограф и передают на анализатор. При обработке



записей определяют значения максимальных напряжений, частоты колебаний и резонансные частоты вращения. По этим данным строят диаграммы переменных напряжений, которые удобно совмещать с частотными диаграммами.

Если анализ резонансной диаграммы показывает на возможность попадания на основные рабочие режимы высокочастотных резонансов от сильных возбудителей (например, от сопловых лопаток), то целесообразно провести тензометрирование с наклейкой датчиков на кромке в верхней части пера лопатки.

Следует иметь в виду, что тензометрирование лопаток на рабочих режимах приводит к необходимости использовать специальные устройства, которые называются *токошьемники*, для передачи сигналов от вращающихся частей конструкции к преобразующей и регистрирующей аппаратуре.

## 2.1. Неохлаждаемые лопатки турбины

Как правило, вибронпряженность лопаток определяется резонансным возбуждением от неравномерного газового потока и срывным обтеканием на нерасчетных режимах работы турбины.

Неравномерность газового потока может возникать как от расположенных выше по потоку форсунок и головок камеры сгорания и лопаток соплового аппарата, так и от расположенных ниже по потоку лопаток, стоек и т.п.

Резонансные колебания лопаток возникают при совпадении собственных частот лопатки с частотой возбуждения:

$$f_{0i} = f_p S ,$$

где  $f_{0i}$  - собственная частота исследуемой лопатки по  $i$  - й форме колебаний;  $f_p$  - частота вращения ротора;  $S$  - номер возбуждающей гармоники (при равномерном расположении по окружности  $S$  совпадает с числом возбудителей).

Наглядное представление о резонансном возбуждении даёт диаграмма Кемпбела. На рис. 1 показан пример такой диаграммы для лопатки турбины некоторого гипотетического ТРД (рис. 3).

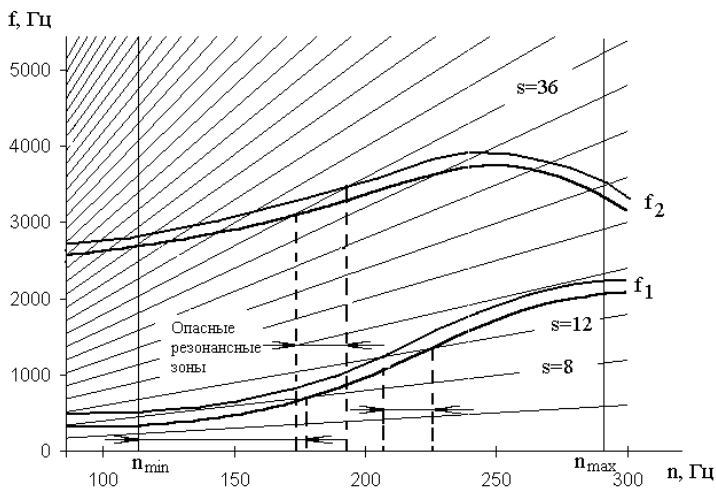


Рис. 1

Лучи  $s = 8$ ,  $s = 12$ ,  $s = 36$  соответствуют возбуждению от восьми стоек центрального тела реактивного сопла, двенадцати равнорасположенных по окружности головок КС и тридцати шести лопаток соплового аппарата турбины.

Возбуждение лопатки неравномерностью потока за сопловым аппаратом турбины показано на рис. 2.

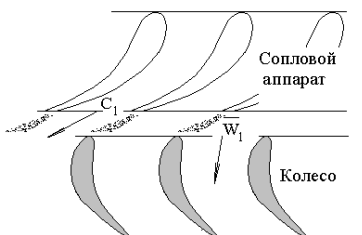


Рис. 2

Рабочая лопатка, перемещаясь в окружном направлении со скоростью  $u$ , пересекает закрученные следы с частотой  $f_p s$ . Так как каждый след это искажение поля давлений газа, в первом приближении можно представить этот процесс как возбуждение колебаний периодической силой с частотой  $f_p s$ .

На рис. 1 кривые  $f_1$  и  $f_2$  соответствуют 1-й и 2-й собственным частотам лопаток, увеличивающихся под действием центробежных сил. В

силу технологических погрешностей лопатки имеют разброс собственных частот (поэтому на рис. 1 каждой собственной частоте соответствуют две кривые). Кроме того, под действием повышенных температур газа уменьшается модуль упругости материала лопаток, что в свою очередь ведет к снижению собственных частот. Однако температура лопаток в различных условиях может существенно отличаться, например, из-за разных метеоусловий. Это приводит к расширению разброса собственных частот лопаток.

Таким образом, при тензометрировании необходимо обследовать:

- все возможные диапазоны резонансных частот вращения ротора;
- весь диапазон рабочих температур газового потока;
- весь диапазон собственных частот лопаток, обусловленный допусками на их изготовление.

Так как в настоящее время нет надежных методов расчета амплитуд колебаний лопаток, тензометрирование проводится в условиях работы турбины, соответствующих максимальному возбуждению колебаний. Как правило, это максимальное давление воздуха на входе в компрессор и максимальный перепад давлений на турбине. Иногда влияние давления и перепада можно оценить аналитически.

Обобщенная схема препарирования турбины двигателя для тензометрирования лопаток дана на рис.3.

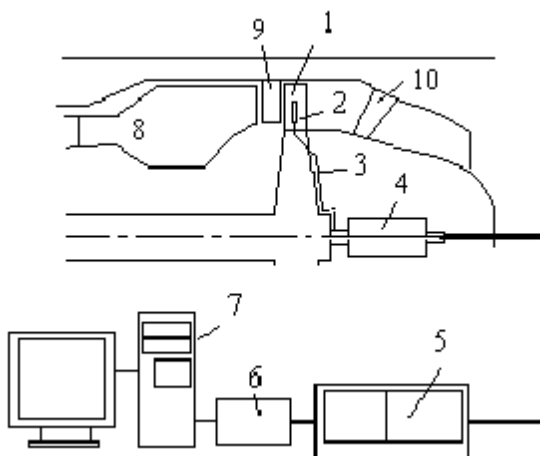


Рис. 3 Обобщенная схема препарирования турбины :

- 1 - исследуемая лопатка; 2 – тензорезистор; 3 - проводка по диску и валу; 4 – токосъемник;  
 5 - многоканальный усилитель-преобразователь; 6 – АЦП; 7 – анализатор;  
 8 – равнонастроенные по окружности головки КС; 9 - лопатки соплового аппарата турбины; 10 - стойки центрального тела реактивного сопла

Тензорезистор и элементы электропроводки работают в условиях тех же температур и инерционных нагрузок, что и элементы ротора, однако имеют существенно более низкие прочностные характеристики. В то же время требования к их состоянию весьма высоки. Кроме того, количество одновременно опрашиваемых тензорезисторов ограничено числом каналов токосъемника, записывающей аппаратуры и т.д. Поэтому одной из главных проблем тензометрирования является повышение информативности каждого испытания или, другими словами, получение надежных данных по весьма ограниченной исходной информации.

Как правило, на одной лопатке размещается 1-2 тензорезистора. Однако каждая лопатка в рабочем диапазоне оборотов может совершать колебания по нескольким формам (например, по двум формам на рис. 1), каждая из которых имеет свое распределение напряжений и, в общем случае, свое расположение места максимальных напряжений. Поэтому максимальные напряжения, действующие в лопатке с номером  $k$  при колебаниях по  $i$ -й форме  $\sigma_{\max k,i}$ , определяются через замеренные тензорезистором напряжения  $\sigma_{k,i}$ :

$$\sigma_{\max k,i} = \sigma_{k,i} k_{fi},$$

где  $k_{fi}$  - коэффициент, учитывающий распределение напряжений в лопатке при колебаниях по  $i$ -й форме.

Значения  $k_{fi}$  определяются из расчета или экспериментального исследования форм колебаний. Расположение тензорезисторов на лопатке выбирается из условия  $k_{fi} \leq 2 \forall i$ . Таким образом, на каждом из режимов работы двигателя получается выборка из  $m$  значений максимальных напряжений в протензометрированных на этом режиме лопатках.

Одно из основных допущений, принятых для анализа данных тензометрирования - нормальное распределение напряжений внутри полной совокупности напряжений в лопатках этого типа на данном режиме. Выборка из  $m$  протензометрированных лопаток считается случайной частью совокупности, подчиняющейся тому же распределению. Поскольку выборка  $m$  обычно мала, принимаются дополнительные меры к охвату всей совокупности случайных факторов: берутся данные с тензометрирования двух двигателей, включенные в выборку лопатки, которые охватывают весь диапазон технологических допусков и т.д. Тогда по  $m$  значениям напряжений  $\sigma_{\max k,i}$ ,  $k = 1...m$  можно по известным из элементарной теории вероятностей формулам оценить параметры распределения и вычислить максимально ожидаемые напряжения  $\sigma_i^*$  с заданным уровнем вероятности:

$$\sigma_i^* = 0.7 \bar{\sigma}_i \left[ 1 + 3 \left( \frac{m+1}{m-1} \right)^2 v_i \right] K_I,$$

где

$$\bar{\sigma}_i = \frac{\sum \sigma}{m} \quad \text{- среднее напряжение в выборке;}$$

$$v_i = \frac{S_i}{\sigma_i} \quad \text{- коэффициент вариации;}$$

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum (\sigma - \sigma_i)^2}{m - 1}} \quad \text{- дисперсия;}$$

$K_I$  - коэффициент пересчета от напряжений в месте расположения тензорезистора к максимальным напряжениям в лопатке.

Так как значение  $K_I$  определяется формой колебаний, для его определения требуется в каждом конкретном случае идентифицировать форму колебаний и знать распределение напряжений по этой форме с учетом действующих центробежных сил.

Идентификация формы, как правило, может быть проведена на основании замеренных частот колебаний и соотношения напряжений, замеренных тензорезисторам, установленных в разных точках и направлениях. Однако в ряде случаев, особенно в условиях "зашумленного" сигнала, эта задача весьма затруднительна.

Распределение напряжений в лопатке может быть определено расчетным и / или экспериментальным (см. ниже) путем. Для изолированной лопатки эта задача решается достаточно точно. В тех случаях, когда велика роль совместности колебаний, например, при колебаниях бандажированных лопаток на гибком диске, встречаются существенные трудности.

При тензометрировании бандажированных ступеней (рис.4) приходится учитывать ряд дополнительных особенностей.

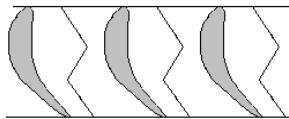


Рис.4

Уровень напряжений в бандажированных лопатках в значительной мере определяется демпфированием в стыках бандажных полок и, следовательно, имеющимся в рабочем состоянии натягом по контактным поверхностям.

Поэтому данные тензометрирования должны охватывать не только весь диапазон допусков на профильную часть лопатки, но и допуски на размеры контактных поверхностей. Поскольку при эксплуатации контактные поверхности изнашиваются, а профильная часть лопатки подвержена деформациям ползучести, натяги по полкам изменяются, и ступени с измененными натягами оказываются новым объектом испытания.

Другой важный фактор - тепловое состояние ступени и упругие деформации диска. При нагреве диска его диаметр увеличивается, и бандажные полки перемещаются на больший радиус, суммарная длина окружности, образованной полками, также увеличивается. Это приводит к уменьшению натяга по полкам. Если при этом температура самих полок понижена, натяг еще уменьшается. Физически этот случай реализуется при быстром снижении режима (тяги или мощности) прогретого двигателя. Противоположный случай реализуется при быстром выходе на режим (приемистости). Поскольку эти случаи относятся к нестационарным и плохо поддаются расчетам и моделированию, нестационарные режимы включаются в число проверяемых тензометрированием.

## 2.2. Охлаждаемые лопатки турбины

Изложенные принципы в полной мере относятся к тензометрированию охлаждаемых лопаток, однако существует ряд различий. Упомянем некоторые из них.

В отличие от неохлаждаемых лопаток температура охлаждаемых зависит не только от температуры омывающего газа, но и от температуры и расхода охлаждающего воздуха. Поэтому изменение частот лопатки вследствие нагрева (кривые  $f_1$  и  $f_2$  на рис.1) имеет более сложную природу.

Изменение расхода охлаждающего воздуха  $CA$  существенно влияет на структуру и интенсивность закрочного следа (рис.2). Как следствие, расход охладителя существенно влияет на возбуждение колебаний РК.

Поэтому диапазон проверяемых тензометрированием режимов двигателя должен охватывать не только все частоты вращения и температуры газа, но и все возможные расходы и температуры охлаждающего воздуха

### 2.3. Лопатки компрессора и вентилятора

Исследование колебаний лопаток компрессора можно условно разделить на исследование резонансных колебаний и исследование автоколебаний (флаттера).

Основные принципы исследования резонансных колебаний те же, что и для лопаток турбины. Существенным отличием является меньшее влияние температурных факторов и большее влияние состояния потока на входе в компрессор и аэродинамической нагруженности ступени.

Не рассматривая подробно механизмов возбуждения автоколебаний лопаток, отметим основные факторы, влияющие на их возбуждение: положение рабочей линии на поле характеристик компрессора, давление и температура воздуха, неравномерность поля давлений и температур, уровень конструкционного демпфирования. Так как флаттер относится к нелинейным явлениям, поэтому перечисленные факторы плохо поддаются моделированию. Испытания на флаттер лопаток проводятся или в полете на специально оборудованных самолетах (летающих лабораториях), или на стендах, позволяющих создать такой же поток на входе в двигатель, какой имеется в полете. Поэтому испытания на флаттер относятся к числу наиболее дорогих и ресурсоемких испытаний двигателя.

При прохождении через резонансную область оборотов напряжения в лопатках изменяются по закону, хорошо описываемому линейной моделью с вязким трением (нижние кривые на рис. 1). Флаттер лопаток, напротив, может проявляться в виде резких скачков напряжений, которые могут приводить к быстрому повреждению и даже разрушению лопаток. Известны случаи, когда флаттер бандажированных ступеней приводил к проскальзыванию полков и даже к полной потере контакта по полкам.

## 3. Динамические испытания

Динамические испытания отдельных лопаток, дисков и ступеней проводятся для уточнения собственных частот и форм колебаний, определения статистических характеристик конкретной технологии изготовления лопаток и для определения пределов выносливости.

### 3.1. Определение собственных частот и форм колебаний

Простейшая схема эксперимента по определению собственных частот и форм колебаний дана на рис. 5.

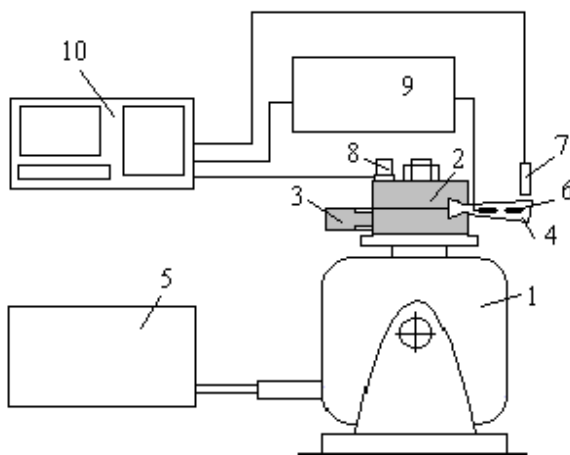


Рис.5

Лопатка компрессора 4 закреплена на электродинамическом вибростенде 1 механическим зажимом 2. Наряду с наиболее распространенными электродинамическими вибростендами применяются воздушные, пьезокерамические, магнитострикционные. Зажим вместе с лопаткой совершает гармонические колебания с частотой, задаваемой генератором 5. Амплитуда колебаний контролируется акселерометром 8, кроме того, сигнал акселерометра используется в качестве опорного при фазовом анализе колебаний. Напряжения в пере лопатки измеряются тензорезисторами 6, сигналы которых подаются в анализатор 10 через усилитель сигнала 9. Перемещения поверхности пера и положение узловых линий могут определяться различными методами: емкостными или токовихревыми датчиками 7, голографическими методами, методом песочных фигур и т.п.

Весьма важную роль в эксперименте играет выбор жесткости зажима и инерционных параметров противовеса 3. Проблема состоит в имитации условиями закрепления граничных условий, соответствующих колебаниям лопатки в диске. Строго говоря, точно решить эту задачу нельзя, так как в эксперименте имеют место совместные колебания системы "лопатка-зажим-вибростенд", существенно отличающейся от системы "лопаточный венец-диск". Однако в ряде случаев достижима практически приемлемая точность. Например, колебаниям одиночной



лопатки в массивном диске соответствует глухая заделка, как это понимается в сопротивлении материалов. Для этого случая противовес подбирается таким образом, чтобы угловые перемещения зажима отсутствовали.

Точность эксперимента может быть существенно повышена за счет снижения демпфирования в системе, в особенности в зажимном узле. При этом снижается энергопотребление, уровень шумов и сужается резонансная полоса, что в свою очередь уменьшает вредное воздействие возбуждающих суб- и супергармоник.

Собственные частоты и формы совместных колебаний систем "лопаточный венец-диск" определяются экспериментально. Таким же образом исследуются формы колебаний бандажированных ступеней. Однако эти эксперименты значительно сложнее из-за необходимости моделировать проскальзывание (или его отсутствие) по контактным поверхностям полок.

Показанный на рис. 5 эксперимент проводится при комнатной температуре, т.е. предполагается малое влияние нагрева на собственные формы колебаний. В некоторых случаях, особенно при существенно неравномерном нагреве, испытание проводится с имитацией температурного поля узла или детали.

Центробежные нагрузки весьма существенно влияют на собственные частоты и формы гибких элементов, однако в связи со сложностью прямого моделирования, их влияние оценивается расчетом. Косвенной проверкой точности при этом служат замеренные при тензометрировании собственные частоты резонансных колебаний.

### 3.2. Контроль собственных частот

Как уже упоминалось выше, одним из показателей серийного производства лопаток является разброс их собственных частот. Как правило, этот разброс в несколько раз меньше рассчитанного по предельным отклонениям размеров.

Собственные частоты определяют так же, как при исследовании форм, с той разницей, что лопатки не препарируются тензорезисторами. Собственная частота определяется по максимуму амплитудно-частотной характеристики или по сдвигу фаз. Амплитуда колебаний и усилие зажатия ограничиваются так, чтобы гарантировать сохранность лопаток, которые после частотного контроля используются для сборки двигателя.

Результаты частотного контроля обрабатываются по простым статистическим формулам (см. выше) и используются как один из показателей стабильности производства. На основании частотного

контроля подбираются комплекты лопаток для тензометрирования, длительных испытаний изделий и т.п.

#### **4. Тензометрирование трубок**

Тензометрирование трубок топливных и масляных магистралей авиационных двигателей является важнейшим этапом в экспериментальных исследованиях конструкций авиационных двигателей. Их работоспособность и долговечность в значительной степени зависит от уровня допустимых напряжений, превышение которых может привести к усталостным трещинам и разрушениям.

В качестве примера можно привести поломки трубок на одном из ТВД. На первых образцах газогенераторов и полноразмерных двигателей часть трубок топливной и масляной системы имели собственную частоту изгибных колебаний в районе, попадающую в рабочий диапазон ротора газогенератора. При плохой уравниваемости ротора и высоких уровнях роторной вибрации на резонансных режимах происходили усталостные поломки трубок. Поломки происходили по месту пайки ниппеля.

Уровни вибронпряжений в трубках, как показали результаты их тензометрирования, на резонансных режимах ротора подходили к уровню предела выносливости материала, из которого были изготовлены трубки.

Наклейка тензорезисторов, как правило, ведется в двух взаимно перпендикулярных плоскостях по оси трубки.

По результатам испытаний, а также величинам замеренных напряжений принимаются соответствующие конструкторские решения. Наиболее распространенным является изменение длины свободных пролетов трубок. Это достигается путем дополнительного подкрепления трубок на корпусе двигателя.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
1. Технические средства измерений и обработки .....	5
1.1. Методы и средства тензометрирования .....	5
1.2. Первичные преобразователи .....	5
1.3. Промежуточные преобразователи .....	10
1.4. Измерительные приборы .....	11
1.5. Меры .....	12
2. Физические основы работы и свойства тензорезисторов .....	12
3. Градуировка тензометрических средств .....	14
3.1. Статическая градуировка тензометрической аппаратуры .....	15
3.2. Динамическая градуировка тензометрической цепи .....	17
4. Задание на проведение лабораторной работы “Градуировка тензометрической аппаратуры” .....	19
Литература .....	20
Приложение 1 Тензометрирование при одноосном и плосконапряженном состояниях .....	21
Приложение 2. Тензометрирование деталей ГТД .....	23
1. Общие положения .....	23
2 Тензометрирование лопаток .....	24
2.1. Неохлаждаемые лопатки турбины .....	25
2.2 Охлаждаемые лопатки турбины .....	30
2.3 Лопатки компрессора и вентилятора .....	31
3. Динамические испытания .....	31
3.1 Определение собственных частот и форм колебаний .....	31
3.2 Контроль собственных частот .....	33
4. Тензометрирование трубок .....	34

Тем. план 2000, поз. 9

**Леонтьев Михаил Константинович**

**ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЕ  
В АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ**

*Редактор* Р.Н.Фурсова

---

Подписано в печать 00.00.2001. Сдано в набор 00.00.2001  
Бум.газетная. Формат 60 x 84 1/16. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 2,5. Уч.-изд. л. Тираж 200.  
Заказ 1383/ .С.

---

Типография Издательства МАИ  
<<МАИ> Волоколамское шоссе,4, Москва, А-80, ГСП-3 125993