

МЕТОДИКА СТАТИЧЕСКОГО ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЯ ДИСКОВ ГТД НА РАЗГОННЫХ СТЕНДАХ С УЧЕТОМ НЕРАВНОМЕРНОГО НАГРЕВА

А.Р. Лепешкин, канд. техн. наук,

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва, Россия

Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами. Для экспериментального определения прочности деталей ГТД и других машин наиболее широко применяется тензометрический метод исследования, основанный на использовании устанавливаемых на поверхности детали тензорезисторов. Тензометрирование необходимо для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей при эксплуатационных или специальных режимах работы. Определение НДС является важнейшим этапом решения проблем обеспечения прочности и ресурса деталей двигателей. Указанные проблемы эффективно решаются при испытаниях вращающихся деталей газотурбинных двигателей (ГТД) и других турбомашин на разгонных стендах.

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем. Современные стендовые прочностные испытания вращающихся деталей двигателей [1 - 3], как правило, требуют одновременной регистрации деформаций, температуры, оборотов и других величин с использованием автоматизированных компьютерных систем (АКС), контактных и бесконтактных токосъемников.

На экспериментальной установке [4] была исследована погрешность, вносимая ртутными токосъемниками, при измерениях температур вращающихся дисков.

В настоящее время ртутные токосъемники являются наиболее универсальными и точными средствами передачи информации в пределах своего ресурса.

В работе [5] при тензометрировании вращающихся роторов не учитывались некоторые погрешности тензорезисторов, погрешности, вносимые в измерения токосъемником и другими элементами схемы измерения, и не оценивалась суммарная случайная погрешность измерения деформации. В работе [6]

максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных НДС дисков составило не более 20%.

Современные задачи тензометрии повышают требования к обеспечению достоверности определения погрешности измерения деформаций в деталях машин. Неполные данные о точности тензоизмерений искажают и обесценивают информацию о реальном НДС ответственных деталей. Поэтому в данной работе уделено особое внимание этой актуальной проблеме.

Основными документами, являющимися основой для определения характеристик тензорезисторов и погрешности измерения деформации, являются [7, 8].

В США одним из таких документов является стандарт NAS-942, принятый Американской ассоциацией авиационно-космической промышленности. Для обоснованного определения погрешности измерения деформации необходимо проведение исследований составляющих погрешности. В частности, в лаборатории авиационно-космических исследований Токийского университета [9] показано на основе проведенных исследований, что паспортные данные коэффициентов тензочувствительности, задаваемые изготовителем, должны быть скорректированы в соответствии со свойствами материала (модуль Юнга и др.), толщиной образца, типом датчика, клеем, качеством наклеивания, а также с условиями нагружения. Погрешности тензорезисторов [9] возрастают при уменьшении толщины образца, по мере смягчения материала образцов в зависимости от различия в способах нагружения, наклеивания тензорезисторов разными лицами.

Оценка погрешности измерения деформаций проволочными и фольговыми тензорезисторами

представлена в работе [8]. Методические указания [8] стандартизируют расчетный способ определения погрешности измерения статических деформаций проволочными и фольговыми тензорезисторами, размещенными на поверхности исследуемой конструкции. Однако, методические указания [8], не учитывают специфики работы тензоизмерительных систем на разгонных стендах.

Цель исследований. Целью данных исследований являлась разработка методики статического тензометрирования дисков ГТД на разгонных стендах с учетом неравномерного нагрева для повышения достоверности экспериментального определения НДС деталей двигателей.

Новым в указанной расчетно-экспериментальной методике статического тензометрирования и оценки погрешности измерения деформации вращающихся дисков на переходных режимах является учет трения вращающихся дисков о воздух в условиях вакуумирования, его влияния на нагрев дисков и тензорезисторов, расчет суммарной погрешности измерения деформации для конечного цикла нагружения, специфики стендового тензоизмерительного тракта, погрешностей токосъемника в стендовых условиях и других при автоматизации специального процесса статического тензометрирования с применением АКС. Кроме того, на последнем этапе статического тензометрирования определяются кривые деформирования дисков в зависимости от оборотов до предела текучести материала.

Выполнены конструкторские разработки, повысившие надежность соединения проводов от тензодатчиков с токосъемником.

Методика и результаты исследований.

Так как при вращении диска в разгонной камере возникает трение его поверхности об остаточный воздух, то в начальных циклах нагружения диск нагревается неравномерно по толщине и по радиусу.

Поэтому для стабилизации результатов статического тензометрирования диска проводится несколько циклов нагружения с анализом соотношения

$$\Delta \varepsilon_N(n) = \varepsilon(n)_{N-1} - \varepsilon(n)_N \rightarrow \min, \quad (1),$$

где $\varepsilon(n)$ - зависимость деформации от частоты вращения,

$\Delta \varepsilon_N(n)$ - разность деформаций циклов N и $N-1$,

$$N = 1, 2, \dots L.$$

При $\Delta \varepsilon_K(n) = \Delta \varepsilon_{\min}$ диск останавливается, $\Delta \varepsilon_{\min}$ - заданная минимальная величина. Для конечного цикла нагружения $N=L$ получаем $t_L(n)$, $\varepsilon_L(n)$ - зависимости температуры в месте наклейки тензорезистора и измеренной деформации.

Зависимость деформации от частоты вращения корректируется с учетом систематических погрешностей

$$\varepsilon(n) = \varepsilon_L(n) - \Delta \varepsilon_{\text{ТХС}}(n) - \Delta \varepsilon_{\text{ТС}}(n), \quad (2),$$

где $\Delta \varepsilon_{\text{ТХС}}(n)$ - систематическая составляющая погрешности, обусловленная температурной характеристикой тензорезистора,

$\Delta \varepsilon_{\text{ТС}}(n)$ - систематическая составляющая погрешности, обусловленная нагревом токосъемника.

Оценка суммарной случайной погрешности измерения деформации вращающегося диска вычисляется по следующей обобщенной формуле:

$$\Delta \varepsilon(n) = \pm k \cdot \sqrt{(\sum (s_{\text{ТР}}(n))^2 + (s_{\text{ТС}}(n))^2 + (s_{\text{С}}(n))^2)}, \quad (3)$$

где k - коэффициент, зависящий от заданной вероятности p и вида закона распределения погрешности (для $p = 0,95$ принимается $k = 2$),

$s_{\text{ТР}}(n)$ - среднеквадратические отклонения (СКО) составляющих погрешностей тензорезистора определяются с использованием рекомендаций [7, 8],

$s_{\text{ТС}}(n)$ - СКО составляющей погрешности токосъемника с учетом линий связи от токосъемника до тензорезистора,

$s_{\text{ТС}}(n)$ - СКО составляющей погрешности АКС с учетом линий связи от АКС до токосъемника.

Перед проведением испытаний составляющие погрешности элементов тензоизмерительного тракта

определяются в результате специальных экспериментов.

Расчет погрешности измерения деформации дисков по экспериментальным или расчетным данным реализован в виде разработанной компьютерной программы.

Результаты статического тензометрирования $\varepsilon(n) \pm \Delta\varepsilon(n)$ сравниваются с результатами расчета НДС.

Для сокращения количества измерительных каналов по температуре расчет теплового состояния диска с учетом специфики его нагрева при трении о воздух проводился с применением численных алгоритмов, приведенных в [2].

Оценка погрешности измерения деформации вращающихся дисков ГТД проводилась при испытаниях реальных и модельных дисков на разгонных стендах с использованием разработанной методики, представленной в настоящей работе, и с учетом [8] и специфики стендового тензоизмерительного тракта.

Схема тензоизмерительного тракта состоит из следующих элементов: тензорезистора (ТР), линий связи (ЛС-2) от тензорезистора до токосъемника, токосъемника (ТС), кабельных линий связи (ЛС-1) от токосъемника до АКС, автоматизированная компьютерная система (АКС).

В данной работе при испытаниях на разгонных стендах использовались АКС (Pentium-4) и ртутный токосъемник с числом контактных пар - 32.

На исследуемом диске были установлены проводочные тензорезисторы. Ниже приводятся характеристики и исследования погрешностей измерительного тракта.

Проводилось несколько испытаний для выполнения программы статического тензометрирования.

Для оценки погрешностей ртутного токосъемника дополнительно проводились их исследования на разгонном стенде в условиях циклограмм рабочих частот вращения диска и стендовых вибрациях.

Погрешности ртутных токосъемников, вносимые в измерения, зависят от качества их сборки, нагрева

секций токосъемника в результате трения и от состояния ртути в процессе испытаний.

Линии связи ЛС-2 подпаиваются к высокооборотной головке РТО-32. Тензорезисторы подключаются через ЛС-2, ТС и ЛС-1 к АКС по 3-х проводной схеме. Данная схема соединений элементов измерительного тракта снижает погрешности, вносимые изменением сопротивления ЛС-1, ЛС-2 и колец ТС.

Кроме того, необходимо учитывать, что с увеличением частоты вращения нагрев токосъемника увеличивается и соответственно увеличивается сопротивление колец ТС.

Предварительные исследования токосъемника проводились с подключением его по 2-х проводной схеме. В процессе подготовки к испытаниям выбирались секции ТС по результатам предварительных исследований, имеющие близкие характеристики, для работы в каждом измерительном канале.

Исследования погрешностей токосъемника проводились по схеме с 3-х проводным подключением к АКС на рабочих частотах вращения. На рис. 1. показаны зависимости изменения сопротивления колец ТС в зависимости от частоты вращения в одном из изме-

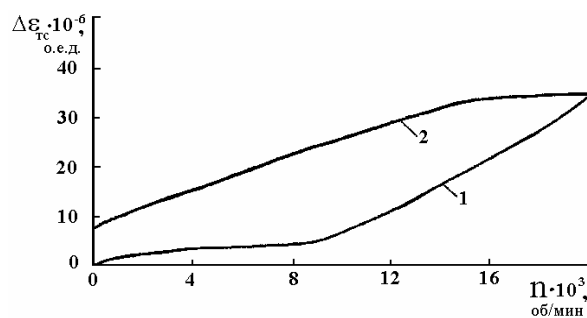


Рис. 1. Характеристики (изменения сопротивления) колец ртутного токосъемника при 3-х проводном его подключении:

- 1 - прямая характеристика при разгоне,
- 2 - обратная характеристика при торможении

рительных каналов.

Результаты исследований погрешностей накапливались на АКС. В частности, по накопленной экспериментальной статистике исследуемого токосъемника были построены функции плотности веро-

ятностей случайных изменений сопротивления колец ТС для разных диапазонов частот вращения.

Из анализа полученной статистики следует, что диапазон изменения случайных погрешностей секций ТС увеличивается с увеличением оборотов, но форма гистограммы, близкая к нормальному закону, почти не меняется. Среднее квадратическое отклонение изменения сопротивления токосъемника не превышало $(15 \div 20) \cdot 10^{-6}$ о.е.д.

Экспериментальные исследования проволочных тензорезисторов из той партии, которые были наклеены на диск, проводились в соответствии с [7].

В соответствии с разработанной методикой проводилось циклическое нагружение исследуемого диска ГТД. Для стабилизации показаний статического тензометрирования диска потребовалось сделать 3 цикла нагружения и соответственно обеспечить условие (1). В качестве иллюстрации указанного процесса кривые изменения деформации (в точке измерения), температуры поверхности ободной части диска и частоты вращения показаны на рис. 2.

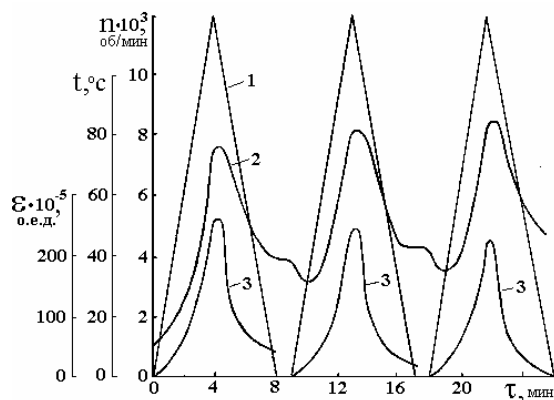


Рис. 2. Циклограммы изменения частоты вращения (1) диска, температуры (2) и окружной деформации (3) в ободной части диска при статическом тензометрировании

Из рис. 2 видно, что изменение температуры (разность между температурой в конце и начале цикла) диска в 3-ем цикле нагружения также стабилизировалось, т.е. произошло выравнивание температуры по толщине диска.

Перейдем к расчету величин, необходимых для оценки погрешности измерения деформации для цикла нагружения $L=3$. Систематическая составляющая погрешности, обусловленная ТХС тензорезистора $\Delta \epsilon_{\text{ТХС}}(t)$, пересчитывается на условия испытаний и принимает вид $\Delta \epsilon_{\text{ТХС}}(n)$.

Скорректированное значение деформации в зависимости от частоты вращения с учетом систематических составляющих погрешности находят по формуле (2). СКО составляющих погрешностей тензорезистора определяются в соответствии с [7] по следующим формулам: СКО составляющей погрешности, обусловленное чувствительностью тензорезистора

$$s_{\text{тр}}^{\text{К}}(n) = (s_{\text{К}} / K_{\text{тр}}) \cdot \epsilon(n), \quad (4),$$

где $s_{\text{К}}$ - СКО составляющей погрешности, обусловленное чувствительностью тензорезистора,

$K_{\text{тр}}$ - коэффициент чувствительности тензорезистора, СКО - составляющей погрешности, обусловленное поперечной чувствительностью тензорезистора:

$$s_{\text{тр}}^{\text{ПК}}(n) = 0,008 \cdot K_{\text{П}} \cdot \epsilon(n), \quad (5)$$

где $K_{\text{П}}$ - коэффициент поперечной чувствительности тензорезистора,

- СКО составляющей погрешности, обусловленное ТХС тензорезистора

$$s_{\text{тр}}^{\text{ТХС}}(n) = s_{\text{тр}}^{\text{М}} \cdot [t(n_{\text{max}}) - t_{\text{нц}}] / (t_{\text{м}} - t_0) \quad (6)$$

где $s_{\text{тр}}^{\text{М}}$ - СКО ТХС тензорезистора при максимальной температуре,

$t(n_{\text{max}})$ - максимальная температура диска в цикле

L ,

$t_{\text{нц}}$ - температура диска в начале цикла L ,

$t_{\text{м}}$ - максимальная температура, при которой снижались ТХС.

t_0 - температура диска при нормальных условиях перед испытаниями.

Оценка суммарной случайной погрешности измерения деформации диска определялась на переходных

режимах для 3-го цикла нагружения по формуле (3) с использованием компьютерной программы для каждой частоты вращения. Количественные расчеты погрешности измерения деформации для условий статического тензометрирования по результатам испытаний позволили выявить, что максимальная случайная погрешность измерения деформации равна $6 \div 7\%$. На рис. 3 и рис. 4 показаны экспериментальные и расчетные данные напряженно-деформированного состояния диска.

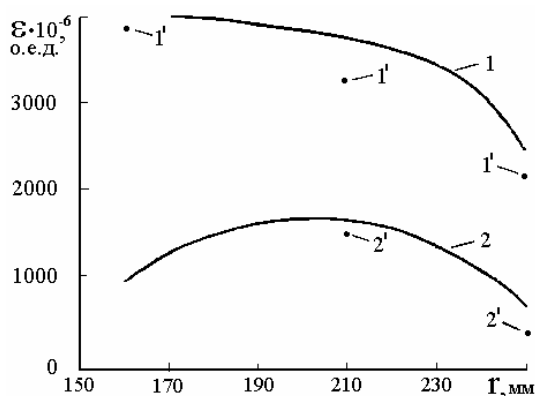


Рис. 3. Распределения деформаций в диске ГТД:

1 – расчетные окружные деформации,
2 – расчетные радиальные деформации,
1' и 2' – экспериментальные точки

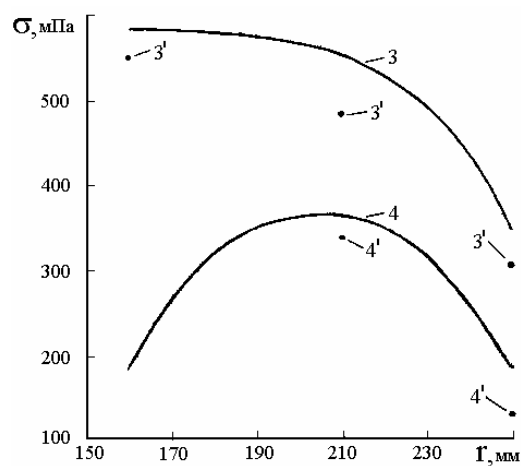


Рис. 4. Распределения напряжений в диске ГТД:

3 – расчетные окружные напряжения,
4 – расчетные радиальные напряжения,
3' и 4' – экспериментальные точки

Расчет был сделан с применением МКЭ. Максимальное расхождение между расчетными и экспериментальными данными составляет 13%.

Такое расхождение объясняется погрешностью расчета НДС, частично погрешностью измерения деформации, нестабильной работой токосъемника в некоторые моменты времени и влиянием качества наклеивания тензорезисторов. Если осреднить разности между экспериментальными и расчетными данными НДС (рис. 3, рис. 4), то получим величину расхождения $7 \div 8\%$.

Выводы

Разработана методика статического тензометрирования дисков ГТД на разгонных стендах с учетом неравномерного нагрева.

Получены результаты по экспериментальному и расчетному определению НДС от воздействия центробежных сил натурных и модельных дисков и рабочих колес ГТД с учетом влияния их неравномерного нагрева при трении о воздух.

Проведены экспериментальные исследования погрешностей токосъемников и других составляющих погрешности измерения деформации на разгонных стендах.

Для стабилизации показаний статического тензометрирования при испытании натурных дисков ГТД требуется не менее 3-х циклов нагружения при линейном изменении частоты вращения.

Определены кривые деформирования диска в зависимости от оборотов до предела текучести материала.

Перспективы дальнейших исследований. Разработанную методику можно также применить для статического тензометрирования дисков разных типов турбомашин.

Одним из направлений дальнейших исследований является разработка специальной экспериментальной методики определения термонапряжений вращающихся дисков ГТД при статическом тензометрировании с учетом их нагрева при трении о воздух в разгонных камерах.

Литература

1. Лепешкин А.Р., Безносенкова В.Н. Циклические испытания дисков ГТД на разгонном стенде с использованием индукционного нагрева // *Авиационно-космическая техника и технология*: Сб. науч. тр.– Харьков: ХАИ, 2000.– Вып. 19. Тепловые двигатели и энергоустановки.– С. 456-460.

2. Лепешкин А.Р., Безносенкова В.Н. Моделирование нестационарного теплового и термонапряженного состояния дисков и рабочих колес ГТД на разгонном стенде с использованием индукционного нагрева при неизотермических циклических испытаниях // *Авиационно-космическая техника и технология*: Сб. науч. тр.– Харьков: ХАИ, 2001.–Вып. 23. Двигатели и энергоустановки.– С. 144-146.

3. Лепешкин А.Р. Индукторы для нагрева дисков ГТД при испытаниях на разгонных стендах // *Авиационно-космическая техника и технология*: Сб. науч. тр.– Харьков: ХАИ, 2002.– Вып. 34. Двигатели и энергоустановки.– С. 163-165.

4. Френкель А.Г., Абросимов В.Н. Измерение температур ротора ТВД двухкаскадного газогенератора // *Экспериментальные методы термпрочности и диагностика ГТД*: Сб. науч. тр.– Харьков: ХАИ, 1986.– С. 112-115.

5. Анфилофьев А.В., Сергеев Н.К., Беляев А.Е. Исследование напряженно-деформированного состояния вращающихся дисков и клювообразных роторов способом электротензометрирования // *Пробле*

мы прочности.– 1975.– № 3.– С. 90-94.

6. Демьянушко И.В., Беляев Б.А., Шарипов Р.А. Расчет на прочность рабочих колес центробежных вентиляторов пневмомеханических систем // *Машиностроение*, 1988.– № 3.– С. 67-70.

7. ГОСТ 21616-76. Тензорезисторы. Общие технические условия.

8. Поляков А.Л., Могильный Б.В., Клокова Н.П. Новый нормативно - технический документ, регламентирующий оценку погрешности измерения деформаций проволочными и фольговыми тензорезисторами // *Измер. техника*. 1987.– № 8.– С. 36-37.

9. Итида К. К вопросу о достоверности измерений проволочными тензодатчиками // *Журнал: Нихон кону ую гаккайси*.– 1972.– Т. 20, № 1.– С. 16-21.

Поступила в редакцию 07.05.03

Рецензент: канд. техн. наук, доцент Ю.А. Гусев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.