

тановить наличие и месторасположение дефектов, которые визуально не наблюдаются (например, разрушение сотового заполнителя).

В ы в о д ы:

1. Моделирование дефектных состояний сложных механических конструкций с применением идентификации и метода конечных элементов позволяет определить и проанализировать диагностические признаки технического состояния конструкций, установить их взаимосвязь с местом расположения дефекта.

2. Предложен алгоритм локализации дефекта, позволяющий автоматизировать процесс поиска дефекта в сложных конструкциях.

3. Применение данного метода для диагностики дефектов сотовых пластин показало совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными по частотам и координатам дефекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер И. А. Техническая диагностика. — М.: Машиностроение, 1978.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975.
3. Киреев В. А., Толстобров Е. П. Анализ напряженно-деформированного состояния трехслойных сотовых панелей из композиционных материалов при поперечном изгибе. — Труды ЦАГИ, 1977, вып. 1972.
4. Дейл О., Коуин Р. Многопараметрическая идентификация линейных непрерывных колебательных систем. — Тр. амер. об-ва инж.-мех. Динамические системы и управление, 1971, № 1.

УДК 629.13.03:539.43

Д. С. Еленевский

ПОУЗЛОВАЯ ОТРАБОТКА ВИБРОПРОЧНОСТИ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГТД

Обеспечение требуемой вибропрочности рабочих лопаток турбины является одной из серьезных проблем при создании современных ГТД. Эффективным средством решения этой задачи является комплексный метод поузловой отработки вибропрочности лопаток турбины на стендах и установках.

Вибрационные исследования лопаток ведутся на базе голографических методов [1]. Для этой цели создана универсальная голографическая установка (рис. 1). Собственные частоты

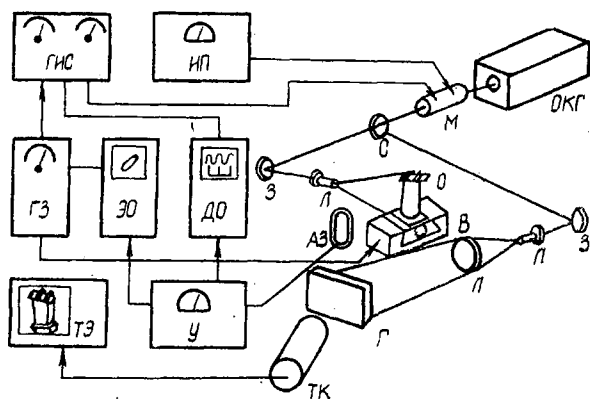


Рис. 1. Схема универсальной голографической установки: ГИС — генератор сдвинутых импульсов; ИП — источник питания; ГЗ — генератор звуковой; ЭО — осциллограф; ДО — осциллограф двухлучевой; ТЭ — телевизионный экран; У — усилитель; ОКГ — оптический квантовый генератор; М — электрооптический модулятор; С — светоделитель; З — зеркало; Л — линза; О — исследуемый объект; В — волновой возбудитель; АЗ — акустический зонд; Г — голограмма; ТК — телевизионная камера

ты и формы колебаний лопаток различного конструктивного выполнения определяются методом усреднения во времени. На каждой резонансной частоте записывается голограмма. Ее восстановление в лучах лазера дает изображение лопатки с системой интерференционных полос, представляющее картину поля амплитуд вибросмещений поверхности. При выявлении собственных частот применяется бесконтактный метод возбуждения лопатки волновой деформацией (рис. 2). При этом методе возбудитель не влияет на собственные частоты и не искажает форму колебаний лопатки. Исключается пропуск отдельных форм, который возможен при контактном возбуждении. Для расчета относительной динамической напряженности лопаток при высших формах колебаний необходимы точные количественные данные об амплитудах вибросмещений на этих формах. Такие данные получаются методом стробоголографии. Его сущность заключается в том, что пос-

де получения голограммы неподвижной лопатки по методу реального времени опорный и объектный лучи стробируются в определенный момент времени. Контраст интерференцион-

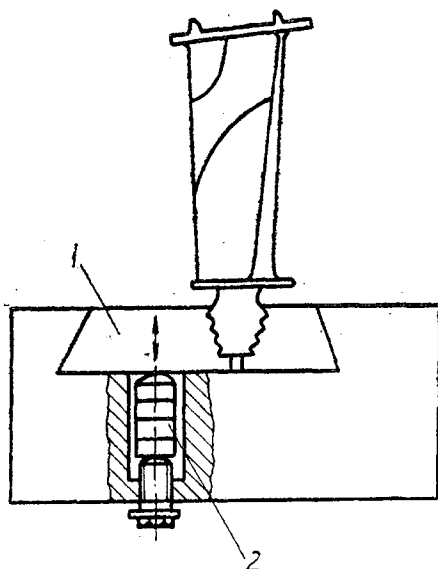


Рис. 2. Схема возбуждения лопатки волновой деформацией: 1 — зажимные элементы; 2 — пьезоэлектрический возбуждатель

ных полос в этом случае не меняется от значений амплитуд вибросмещения, что обеспечивает высокую точность их счета. Стробирование осуществляется с помощью вводимого в голографическую установку электрооптического модулятора. Обработка стробоголограмм позволяет получить количественные значения амплитуд вибросмещений. Эти данные, а также геометрические характеристики лопатки вводятся в ЭВМ, где по соответствующим программам ведется расчет относительных динамических напряжений на интересующих участках пера. На рис. 3 показано распределение относительных напряжений по выходной кромке лопатки на одной из высших форм колебаний, полученное методом стробоголографии. Как видно, эти данные хорошо согласуются с результатами тензо-

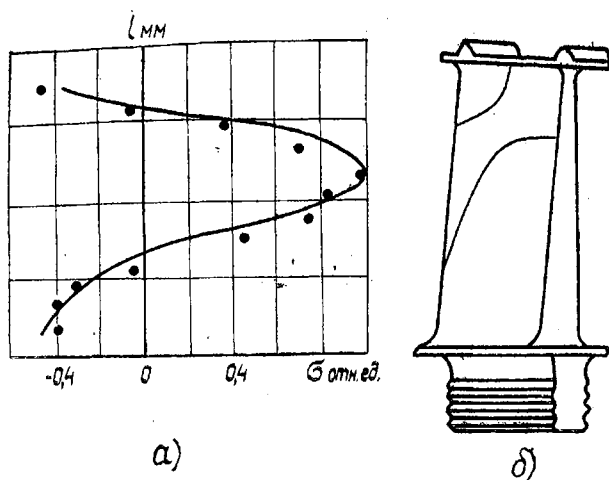


Рис. 3. Распределение относительных напряжений (σ) вдоль выходной кромки (l) сплошной лопатки (а) для данной формы колебаний (б): — расчет по стробоголограмме; ● — значения, полученные тензометрированием

измерений. Указанный метод достаточно эффективен для сплошных лопаток.

Для исследования напряженно-деформированного состояния охлаждаемых лопаток, имеющих сложную конструкцию пера, более точным и надежным является метод спекл-голографии. Основой этого метода является спекл-эффект, т. е. эффект зернистости лазерного излучения. При освещении диффузной поверхности когерентным лазерным светом она кажется покрытой системой бликов. Зарегистрированная спекл-картина от лопатки в исходном и вибродеформированном состоянии содержит информацию о перемещениях точек поверхности в ее плоскости. Путем преобразования этой информации получается поле деформаций и напряжений. На рис. 4 показана схема регистрации спекл-голограмм и их анализа методами Фурье—фильтрации и сканирования. Эти методы позволяют получать общее поле относительных деформаций поверхности лопатки, определять максимально напряженные места, а также тонкую структуру распределения напряжений в любом выделенном направлении. Спекл—голография дает возможность исследовать самые острые концентраторы в лопат-

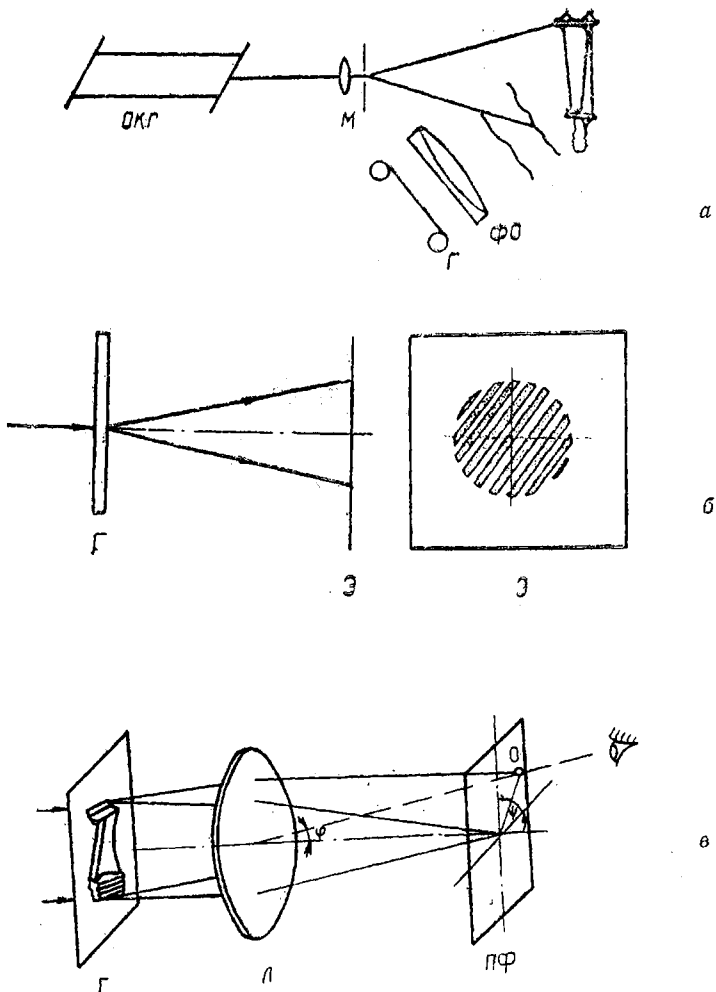


Рис. 4. Схемы получения (а) и анализа спекл-голограмм (б — сканирование; в — Фурье-фильтрация): ОКГ — оптический квантовый генератор; М — микрообъектив; ФО — фотообъектив; Г — спекл-голограмма; Э — экран; φ, ψ — углы дифракции; Л — высокоапертурная линза; ПФ — Фурье — плоскость линзы Л; О — фильтрующая диафрагма

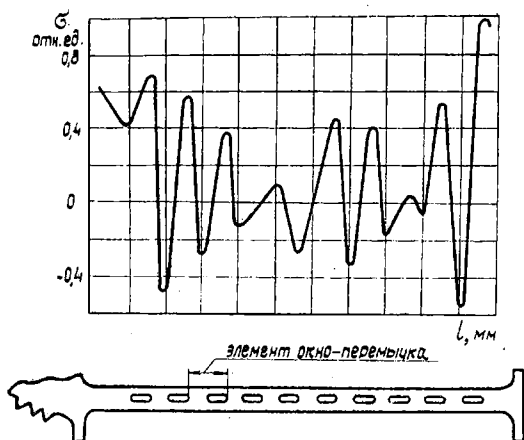


Рис. 5. Распределение относительных локальных напряжений (σ) вдоль выходной кромки (l) охлаждаемой лопатки (расчет по спекл-интерферограмме)

ке, поскольку база, на которой определяется напряжение составляет 0,2—0,5 мм, а шаг квантования может быть менее 0,1 мм. На рис. 5 приведено распределение напряжений вдоль выходной кромки вибрирующей по крутильной форме охлаждаемой лопатки, имеющей окна для выхода воздуха. Хорошо видна локализация максимальных напряжений у краев окон. Такой детальный анализ напряженного состояния позволяет оптимизировать конструкцию выходной кромки, а также других элементов лопатки с точки зрения минимальной вибронапряженности.

Необходимым этапом поузловой доводки является обработка выносливости лопаток при рабочих температурах. Высокая температура при испытаниях в сочетании с конструктивными, металлургическими и технологическими факторами является обязательным условием для определения реального сопротивления усталости лопаток. На рис. 6 изображена схема установки для натуральных испытаний лопаток на выносливость при температурах до 1000°C. Посредством многосекционной печи создается нужное температурное поле по длине лопатки. Для контроля режима виброиспытаний лопаток, особенно коротких и жестких, амплитуда которых менее 0,5 мм, используется луч лазера [2]. Этот луч, пропускаемый через

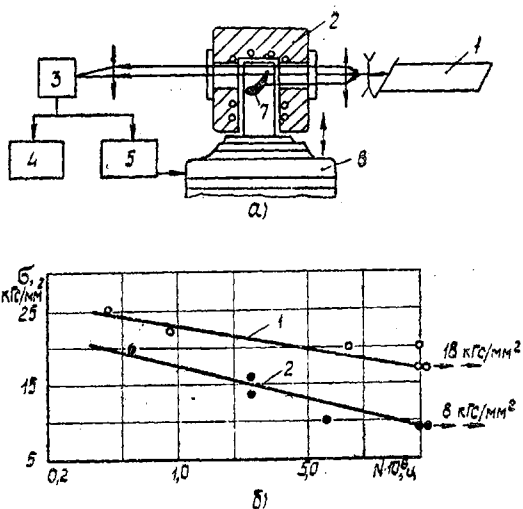


Рис. 6. Испытания на усталость при высокой температуре: а — блок-схема высокотемпературных испытаний: 1 — оптический квантовый генератор; 2 — печь сопротивления; 3 — фотоприемник; 4 — система измерений; 5 — система управления; 6 — вибровозбудитель; 7 — испытуемая лопатка; 8 — кривые выносливости для лопаток с жаростойким покрытием: 1 — температура испытаний 900°C; 2 — температура испытаний 20°C

печь, модулируется краем вибрирующей лопатки и после модуляции попадает на фотоприемники, преобразующий переменный световой поток в электрический сигнал, идущий на измерительный регистратор и систему автоматического управления испытаниями. Большое значение такие испытания имеют для лопаток с жаростойкими покрытиями, склонными к образованию фрагментации. На рис. 6 приведены кривые усталости при нормальной и высокой температурах для лопаток из материала ЖС6Ф с жаростойким покрытием, нанесенным с помощью электронно-вакуумного испарения. Хотя в обоих случаях при испытаниях имеет место фрагментация, предел усталости лопаток при высокой температуре существенно выше, что объясняется протеканием при этой температуре физико-химических процессов в устье трещины, препятствующих ее распространению. Как видно, в данном случае испытания при

нормальной температуре дают существенно искаженный результат.

В турбинных современных ГТД широкое применение находят рабочие лопатки с бандажной полкой. Нередко в работе большому износу подвергаются контактные поверхности полок, что ведет к раззориванию лопаток и повышению переменных напряжений. Поэтому одним из этапов поузловой доводки является отработка износостойкости бандажных полок [3]. На рис. 7 показана схема испытаний на износ. Установка, смонтированная на столе вибратора, включает в себя

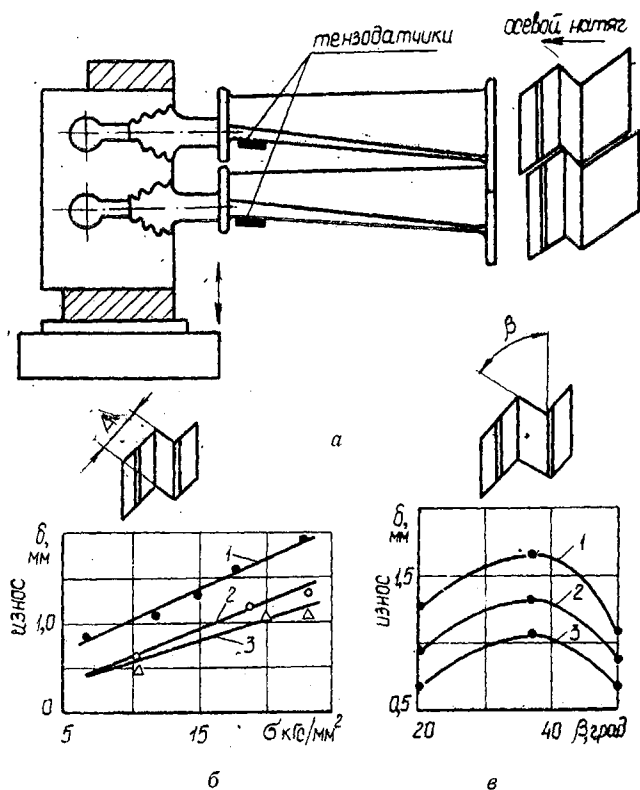


Рис. 7. Испытания на износ бандажных полок: а—схема установки; б—результаты исследования влияния на износ величины натяга (напряжения по тензодатчикам σ): 1— $\beta = 35^\circ$; 2— $\beta = 20^\circ$; 3— $\beta = 50^\circ$; в—результаты исследования влияния на износ угла наклона контактной грани (β): 1— $\sigma = 20$ кгс/мм²; 2— $\sigma = 15$ кгс/мм²; 3— $\sigma = 10$ кгс/мм²

элемент натурального диска, в пазах которого закрепляются две испытываемые лопатки. Нормальное давление по контактным поверхностям создается смещением испытываемых лопаток относительно друг друга в направлении оси замка. Лопатки вводятся в совместные резонансные колебания. При этом возникают взаимные виброперемещения контактных поверхностей, что вызывает их износ. Испытания могут проводиться и при нагреве полок токами высокой частоты. На рис. 7 представлены полученные зависимости износа полок от осевого натяга и угла наклона контактной грани. Как видно, этот метод испытаний выявляет четкие закономерности износа, что позволяет вести отработку конструкции полок, уровня натяга в бандаже, а также технологических мероприятий по изготовлению и сборке бандажированных колес.

Одним из наиболее нагруженных элементов лопатки является ее хвостовик, в котором наряду с переменными действуют высокие статические напряжения. Для исследования его выносливости применяется метод испытания при асимметричном цикле изгиба. Схема такой установки показана на рис. 8.

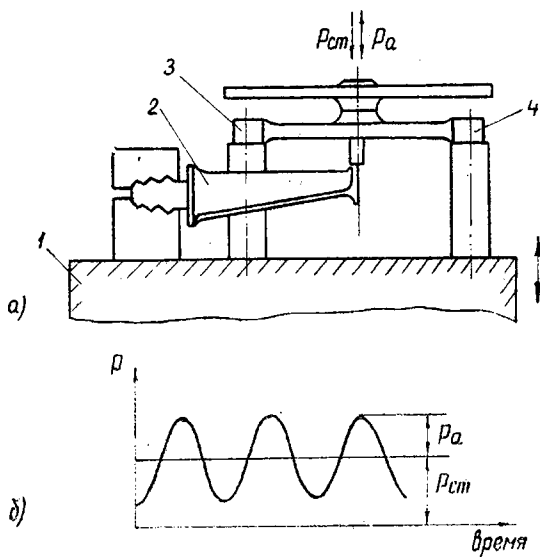


Рис. 8. Испытания при асимметричном изгибе: а — схема испытательной установки: 1 — стол вибро-возбудителя; 2 — испытываемая лопатка; 3 — балка статического нагружения; 4 — динамический нагруз- жатель; б — цикл нагружения

Установка монтируется на столе вибровозбудителя. Через упор в бандажную полку с помощью балки (3) создается статический изгиб. С помощью вибратора вводится в резонансный режим двухплечий динамический нагрузчитель (4), передающий на лопатку переменную изгибающую силу. На лопатке осуществляются вынужденные нерезонансные изгибные колебания. Такой метод, создавая условия нагружения хвостовика близкие к эксплуатационным, обеспечивает получение усталостных разрушений по хвостовику и позволяет вести отработку его выносливости.

Тензометрирование бандажированных лопаток турбины на двигателе показывает, что в подполочной части пера при определенных условиях действуют значительные динамические напряжения с частотами до 15 кГц, которые обусловлены резонансами высших форм с гармониками соплового аппарата. В этой же области пера имеет место максимум статических напряжений от крутящего момента, действующего на полку вследствие реакции в бандажном поясе при раскрутке лопаток в поле центробежных сил. Поэтому ведется отработка сопротивления усталости лопаток при высокочастотных колебаниях в том числе при одновременном нагружении статическим крутящим моментом [4]. Голографически определяются формы колебаний свободной и закрученной лопатки и для испытаний выбираются сопоставимые формы с частотами, близкими к полученным при тензометрировании лопаток на двигателе. Резонансные испытания ведутся при возбуждении лопатки пульсирующей струей воздуха (рис. 9). Диапазон частот от 5000 до 16000 Гц. Закрутка лопатки осуществляется механической системой с динамометром. Как видно, усталостные трещины при высокочастотных колебаниях свободной охлаждаемой лопатки располагаются, в основном, в средней по хорде части пера, что связано с мембранным характером колебаний стенок. Приложение крутящего момента при тех же формах колебаний локализует трещины на кромках под полкой, т. е. там, где при кручении возникают максимальные статические напряжения, и существенно снижает выносливость. Поэтому для бандажированных лопаток проблема выносливости при высокочастотных резонансах тесно связана с задачей уменьшения напряженности от крутящего момента.

В работе на двигателе лопатки турбины подвергаются одновременному действию теплового и механического нагружений, переменных по режимам и времени. Поэтому отработка

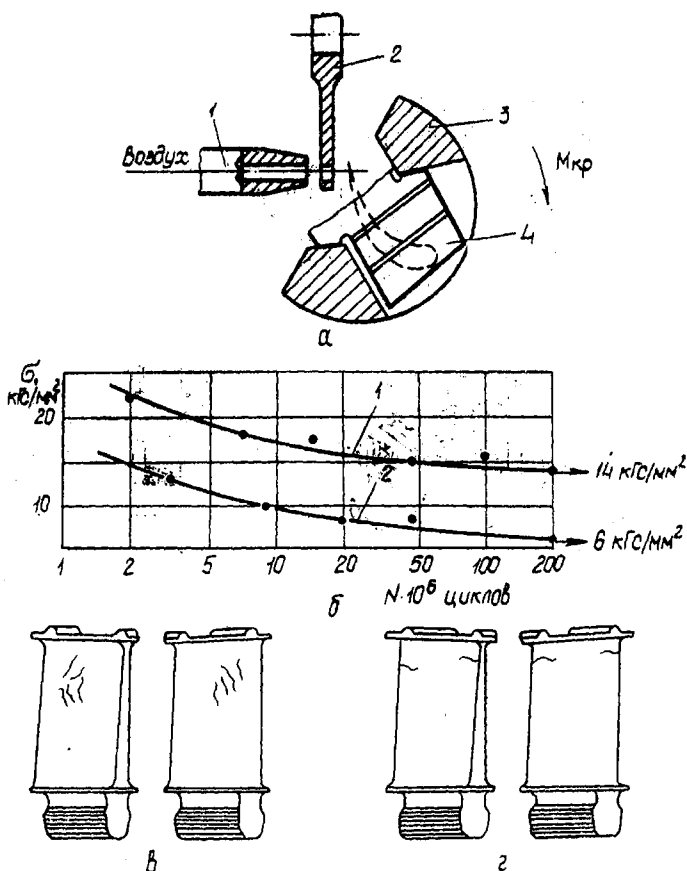


Рис. 9. Высокочастотные испытания: а — схема установки: 1 — сопло; 2 — модулирующий диск; 3 — нагрузитель скрутящим моментом; 4 — бандажная полка испытываемой лопатки; б — кры-
вые выносливости: 1 — свободная лопатка; 2 — закрученная лопатка; в — картограммы разрушений свободной лопатки;
г — картограммы разрушений закрученной лопатки

несущей способности лопаток включает в себя метод комбини-
рованных термовибрационных испытаний в условиях цикличес-
кости обоих действующих факторов (рис. 10). Лопатка нагре-
вается токами высокой частоты. Подбором конструкции ин-
дуктора обеспечивается температурное поле соответствующее
эксплуатационному. Температурное циклирование осуще-

ствляется подачей на лопатку сжатого воздуха по заданной программе. Это вызывает в лопатке температурные напряжения, меняющиеся во времени по определенному закону. Одновременно с помощью вибратора в лопатке возбуждаются колебания. Уровень виброн нагружения также циклируется. Для бандажированных лопаток к полке дополнительно может прикладываться статический крутящий момент. На рис. 10 показаны виды разрушений лопатки, получаемые при различных параметрах комбинированного термовибрационного нагружения. Подбором соответствующей программы испытаний ими-

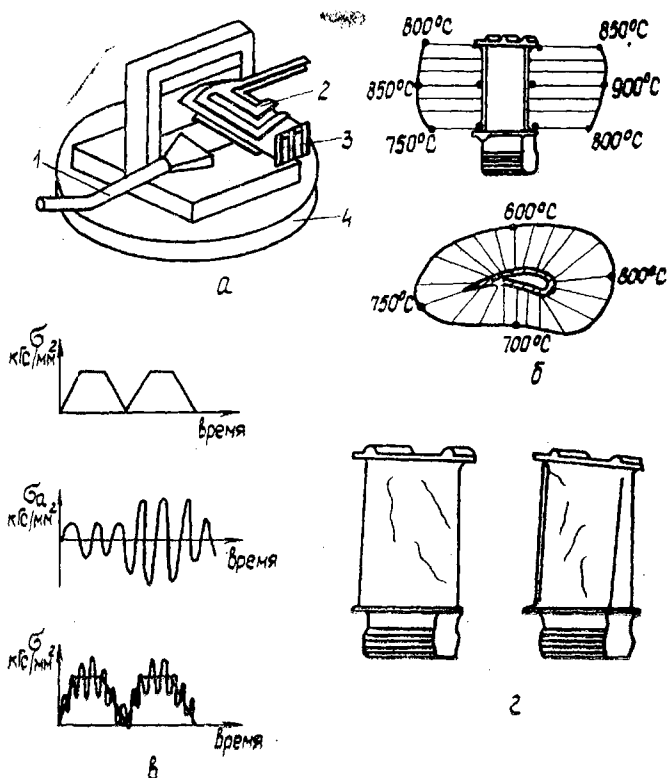


Рис. 10. Комбинированные термовибрационные испытания: а — схема установки: 1 — сопло подвода воздуха; 2 — индуктор; 3 — лопатка; 4 — вибровозбудитель; б — температурное поле лопатки; в — программы нагружения; г — карты разрушения

тируется эксплуатационный дефект, после чего отрабатываются конструктивно-технологические мероприятия по его устранению. Изучаются закономерности разрушения натуральных лопаток при многофакторном нагружении.

Комплексное применение изложенных методов поузловой отработки вибропрочности лопаток турбины повышает их надежность, сокращает сроки, а также затраты материальной части и средств при доводке опытных образцов ГТД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еленевский Д. С., Бекбулатов Р. С., Шапошников Ю. Н., Степанов С. А. Применение голографической интерферометрии в вибропрочностном эксперименте. — В сб.: Научные основы и методы повышения надежности и долговечности ГТД. — Киев: Наукова думка, 1979.

2. Еленевский Д. С., Бекбулатов Р. С., Баданин А. П., Шапошников Ю. Н., Сипухин И. Г. Система контроля режима виброиспытаний лопаток турбины и компрессора с использованием луча лазера. — Проблемы прочности, 1979, № 1.

3. Сипухин И. Г., Еленевский Д. С., Бекбулатов Р. С., Гаврилов Н. Г. Износостойкость бандажных полок лопаток турбины и компрессора. — В сб.: Научные основы и методы повышения надежности и долговечности ГТД. — Киев: Наукова думка, 1979.

4. Еленевский Д. С., Бекбулатов Р. С., Сипухин И. Г., Шапошников Ю. Н., Буренкин А. М., Пастухов Н. А., Шаврин В. И. Вибропрочностные испытания охлаждаемых лопаток турбины. — В сб.: Научные основы и методы повышения надежности и долговечности ГТД. — Киев: Наукова думка, 1979.

УДК 531:539.3

К. А. Жуков, А. С. Сердотецкий, В. А. Фролов

ПРОБЛЕМЫ ВИБРАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ЛОПАТОЧНЫХ ВЕНЦОВ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Для современного этапа развития авиадвигателестроения характерен рост силовых и тепловых нагрузок, значительное уплотнение и увеличение сил спектра вибрационного возбуждения, воздействующего на элементы двигателя при одновременном уменьшении массы и жесткости последних. Эти факторы оказывают особенно неблагоприятное воздействие на вибрационное состояние лопаточной части двигателя. Извест-