

Из симметричности коэффициентов системы уравнений (6) вытекает, что при равенстве интенсивностей разделяемых гармоник V_1 и V_2 результаты обоих замеров равны.

На рис. 2 приведены зависимости A_1 и A_2 от V_1 для двух значений V_2 , равных 0,25 и 0,5 при $P_{\Phi}/8 z f_p = 1$ и тех же значениях k , σ_1 , σ_2 , r и σ_p .

При $V_1 = V_2$ и $A_1 = A_2$ для отдельных оценок интенсивностей достаточно одного уравнения, решение которого имеет вид

$$V_1 = V_2 = \frac{A_1}{k(a+b)} = \frac{A_2}{k(a+b)}. \quad (9)$$

Полученные результаты применимы для трехвалвных ГТД. В этом случае для получения дифференциальных оценок трех гармоник различных роторов с перекрывающимися спектрами необходимо провести три замера, поочередно подключая канал управления следящего анализатора к датчикам оборотов каждого из роторов.

Таким образом, при правильном выборе полосы прозрачности фильтра следящий анализ позволяет получить дифференциальную оценку интенсивностей гармоник каждого из роторов при перекрытии их спектров, т. е. разделить суммарную вибрацию по источникам (по роторам). Необходимое для этого число замеров равно числу роторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авраменко А. А., Власов П. П. Влияние флуктуаций оборотов на результаты спектрального анализа. В сб.: «Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов», вып. 4. КуАИ, 1977.

2. Виницкий А. С. Модулированные фильтры и следящий прием 4М сигналов. М., «Сов. радио», 1969.

УДК 534:62—413/415

В. Н. Вякин, Н. Д. Степаненко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПЛОСКОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ НА КРУГЛЫХ ОБРАЗЦАХ

Высокочастотные усталостные испытания материалов в условиях плоского напряженного состояния применительно к пластинам и оболочкам обычно проводят при попе-

речном изгибе образцов, которые выполняются в виде круглых пластин, закрепленных в точке [1], или кольцевых пластин, закрепленных по внутреннему контуру [2].

Изучение прочности композиционных материалов с помощью указанных методов затруднено вследствие того, что в первом случае сложно, а во втором практически невозможно обеспечить необходимый диапазон соотношения главных нормальных напряжений. Все это обуславливает необходимость развития существующих методов и разработки новых методов усталостных испытаний и, что особенно важно, — применительно к композиционным материалам, обладающим спецификой строения и деформирования при нагружении.

Рассмотрим метод усталостных испытаний композиционных материалов, выполненных в виде круглых пластин постоянной толщины, шарнирно опертых по наружному контуру, в которых с помощью воздушных вибростендов возбуждают изгибные колебания низких осесимметричных и веерных форм.

Различные формы колебаний позволяют проводить испытания в широком диапазоне соотношений нормальных напряжений. Схема крепления образца показана на рис. 1.

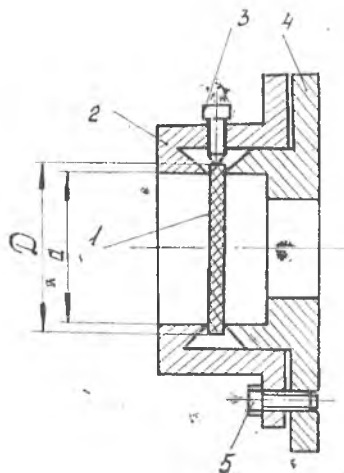


Рис. 1. Схема крепления образца: 1 — образец; 2 — подвижная опора; 3 — установочные винты; 4 — неподвижная опора; 5 — крепежные винты

Возможность применения этого метода установлена при изучении прочности образцов из стеклопластика ЭДТ-10. Наполнителем испытуемого материала являлась кордно-жгутотканая ткань КЖТ-ВМ, связующим — эпоксидная смола ЭДТ-10. Пластина состояла из 13 слоев стеклоткани. Укладка слоев ткани в образцах проводилась таким образом, что угол между направлением основы двух соседних слоев составлял 15° , т. е. слои ткани ориентировались относительно внешнего слоя под углами 15° , 30° , 45° и т. д. до 180° . При такой схеме армирования направление главной оси упругости материала совпадало с направлением армирования наружного слоя об-

разцов. Материал пластины—ортотропный. Размеры образцов: расчетный диаметр образца — 90 мм (диаметр опорного контура d на рис. 1); наружный диаметр D — 100 мм. Как показал эксперимент, модуль упругости E при изгибе материала в направлении главной оси упругости составляет $3,89 \cdot 10^5$ кг/см², а в трансверсальном направлении E — $1,61 \cdot 10^5$ кг/см², соответствующие коэффициенты Пуассона μ равны 0,255 и 0,115. Опыты по определению упругих постоянных проводились на образцах в виде стержней $120 \times 25 \times 3$ мм, вырезанных из тех же плит, что и испытываемые круглые пластины. Упругие постоянные материалы определялись по методике, приведенной в [3].

Собственные частоты исследуемых круглых пластин в диапазоне до 10000 Гц определялись при возбуждении колебаний с помощью малогабаритного электродинамика по методике, описанной в работе [5]. В диапазоне этих частот испытанные пластины имели две осесимметричные изгибные формы (частоты 1900 Гц — основная форма и 8750 Гц — форма с одной узловой окружностью) и две формы вверных колебаний (частоты 3800 и 4500 Гц) с узловым диаметром вдоль главной оси упругости и в трансверсальном направлении соответственно.

Характер распределения напряжений (деформаций) при возбуждении в пластинах с различными формами колебаний изучался путем замера деформаций с помощью тензодатчиков. Схема замера деформаций показана в работе [4]. Наклейка тензодатчиков на объект испытаний проводилась в направлении главной оси упругой симметрии, в трансверсальном направлении и под углом 45° к этим направлениям. При этом обеспечивалась возможность замера как радиальных, так и тангенциальных деформаций. В качестве примера на рис. 2 и 3 показано распределение относительных деформаций в радиальном ($\epsilon_r / \epsilon_{\max}$) и тангенциальном ($\epsilon_t / \epsilon_{\max}$) направлениях при колебаниях образцов по форме с одной узловой линией, расположенной вдоль главной оси упругости материала X .

Величины нормальных напряжений σ_x и σ_y , действующих вдоль главных осей упругой симметрии материала образцов, рассчитываются по закону Гука:

$$\sigma_x = \frac{E_1 \epsilon_x + \mu_1 E_2 \epsilon_y}{1 - \mu_1 \mu_2};$$

$$\sigma_y = \frac{E_2 \varepsilon_y + \mu_2 E_1 \varepsilon_x}{1 - \mu_1 \mu_2},$$

где $E_1 = E_x$ и $E_2 = E_y$, ε_x и ε_y — модули упругости и деформации соответственно вдоль главных направлений армирования;

μ_1 и μ_2 — соответствующие коэффициенты Пуассона.

Изучение напряженно-деформированного состояния и усталостных разрушений пластин по двум формам колебаний показал, что места усталостных разрушений расположены вдали от места закрепления: или в центре пластины (форма с частотой 1900 Гц), или на некотором расстоянии от центра (форма с частотой 3800 Гц), т. е. в местах пучностей. Отсутствие деформации, а следовательно и напряжения по контуру образцов, исключает возможность влияния опорных закреплений на результаты испытаний образцов по низшим формам колебаний.

Данным методом можно получить надежные результаты по прочности материалов, которая изучается в широком диапазоне соотношений нормальных напряжений σ_x / σ_y . Так, для

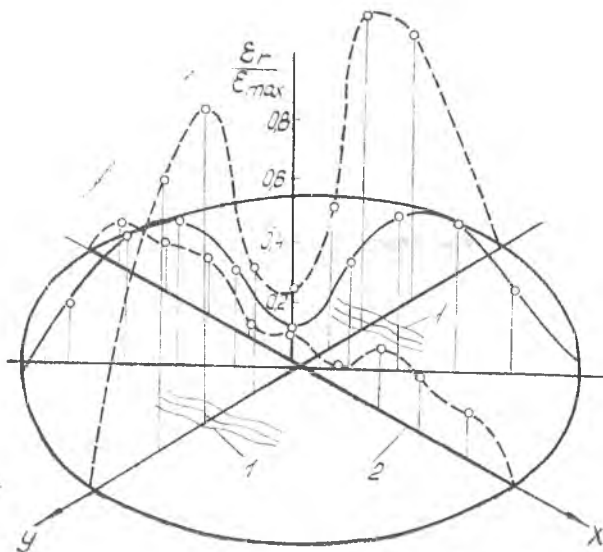


Рис. 2. Распределение радиальных деформаций: 1 — место разрушения; 2 — узловая линия и главная ось упругости материала

пластин из материала ЭДТ-10 (для описанной структуры армирования) при колебаниях по первой осесимметричной форме (1900 Гц) и по вверной форме (3800 Гц) $\sigma_{\text{стmax}} / \sigma_{\text{стmin}}$ равны 1,83 и 2,10 соответственно.

Рассмотренный способ испытаний является высокочастотным и, следовательно, высокопроизводительным. Он позволяет также оценивать влияние частоты на сопротивление материала усталости. Другой, не менее важной, его особенностью является то, что результаты испытаний можно использовать для оценки вибрационной надежности тонкостенных конструкций типа дисков турбомашин, пластин и на их основе разрабатывать рекомендации по рациональному армированию таких конструкций при изготовлении их из композиционных материалов.

Этим способом получены усталостные разрушения пластины при колебаниях по первой осесимметричной форме и по форме с одним узловым диаметром (вдоль главной оси упругости материала). Испытания проводились в режиме постоянных деформаций $\epsilon = \text{const}$. Замер относительных деформаций осуществляли с помощью фольговых тензодатчиков типа ФПК-50-ГВ базой 5 мм.

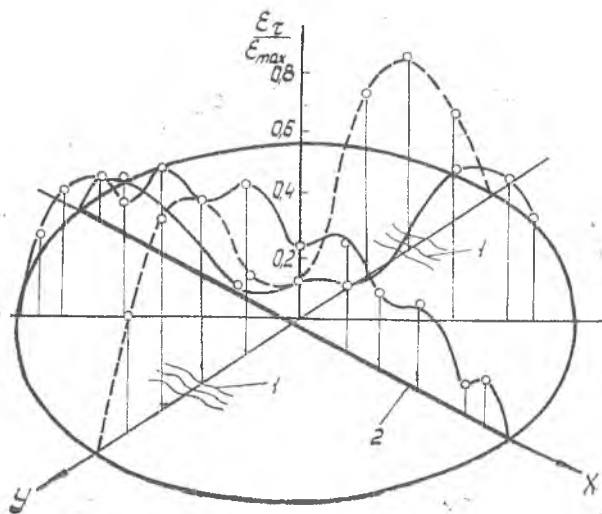


Рис. 3. Распределение тангенциальных деформаций: 1 — место разрушения; 2 — узловая линия и главная ось упругости материала

При основной форме колебаний замер уровня максимальных относительных деформаций осуществляли по датчику, наклеенному вдоль главной оси упругости (ϵ_x). В трансверсальном направлении замерялась деформация ϵ_y с помощью датчика, наклеенного на противоположной стороне образца. При $\epsilon_{y\max} = 60,8 \cdot 10^{-5}$ соотношение деформаций $\epsilon_{y\max} / \epsilon_{x\max} = 1,221$, чему соответствует соотношение напряжений $\sigma_{x\max} / \sigma_{y\max} = 1,83$, рассчитанное с помощью приведенных формул. При более высоких уровнях нагружения проводился замер только деформаций ϵ_x .

При форме колебаний образца с одним узловым диаметром место максимальных относительных деформаций ϵ_y находится на расстоянии $0,366 r$ от центра пластины. В этом случае $\epsilon_{y\max} / \epsilon_{x\max} = 1,025$ при $\epsilon_{y\max} = 50 \cdot 10^{-5}$, а соотношение напряжений $\sigma_{x\max} / \sigma_{y\max} = 2,1$.

При испытаниях стеклопластиков отмечается уменьшение резонансной частоты с ростом циклов нагружения. Резонансная частота может монотонно падать в течение всего времени испытаний. В этом случае в качестве критерия усталостного разрушения принято такое нарушение сплошности материала, которое приводит к снижению частоты колебаний образца на 3—5%. Нарушение сплошности проявляется в виде сетки трещин, расположенных в местах максимальных напряжений. В другом случае резонансная частота в некоторый момент времени начинает резко падать, что и служит критерием усталостного разрушения.

Наличие усталостных повреждений можно контролировать в процессе испытаний, оценивая демпфирующую способность материала по ширине резонансной кривой. В данном случае критерием разрушения служило резкое падение резонансной частоты. Кроме того, контролировался и декремент колебаний.

Причиной изменения резонансной частоты может быть виброразогрев материала, приводящий к уменьшению его модуля упругости. При испытаниях в режиме $\epsilon = \text{const}$ виброразогрев вызывает значительное снижение усталостной прочности стеклопластиков. При этом возможно тепловое разрушение образцов, что влияет на точность результатов.

Чтобы исключить влияние виброразогрева, испытания образцов проводятся с применением дополнительного охлаждения. Однако в данном случае охлаждение было недостаточно интенсивным, это привело к монотонному падению частоты

колебаний даже при малых уровнях максимальных относительных деформаций ($\epsilon_{y \max} = 25 \cdot 10^{-5}$).

Ориентировочно интенсивное разрушение образца при основной форме колебаний началось при уровне относительных деформаций $\epsilon_{y \max} = 122 \cdot 10^{-5}$, после $5,98 \cdot 10^5$ циклов парабортки при более низких уровнях деформаций. Соотношение деформаций при этой форме колебаний $\frac{\epsilon_{y \max}}{\epsilon_{x \max}} = 1,22$, а напряжения, рассчитанные по приведенным формулам, $\sigma_{x \max} = 4,52 \text{ кгс/мм}^2$ и $\sigma_{y \max} = 2,84 \text{ кгс/мм}^2 \left(\frac{\sigma_{x \max}}{\sigma_{y \max}} = 1,83 \right)$. Уровень деформации измерялся по датчику, наклеенному в месте их максимального значения. Место разрушения находилось в центре образца. Разрушение произошло путем отслоения волокон и разрыхления матрицы материала и проявилось в виде пятна светло-желтого цвета.

При второй форме колебаний (с одним узловым диаметром вдоль главной оси упругости) интенсивное разрушение началось при уровне относительных деформаций в месте разрушения $\epsilon_{y \max} = 75 \cdot 10^{-5}$ после $8,53 \cdot 10^5$ циклов парабортки при более низких уровнях деформаций. В этом случае $\frac{\epsilon_{y \max}}{\epsilon_{x \max}} = 1,025$; $\sigma_{x \max} = 3,25 \text{ кг/мм}^2$; $\sigma_{y \max} = 1,58 \text{ кг/мм}^2 \left(\frac{\sigma_{x \max}}{\sigma_{y \max}} = 2,1 \right)$.

Разрушение образца при такой форме колебаний наблюдается в двух местах, на расстоянии $0,366$ радиуса образца от его центра. Оно имеет такой же вид, как и в первом случае: сетка трещин вытянута вдоль главной оси упругости образца (см. рис. 2, 3).

Выводы

Разработанный метод исследования усталостной прочности композиционных материалов при плоском напряженном состоянии в условиях поперечного изгиба опробован экспериментально, реализуется и позволяет проводить испытания в широком диапазоне частот от 500 до 7000 Гц при различном соотношении нормальных напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Писаренко Г. С., Трапезон А. Г. Определение усталостной прочности материалов в условиях плоского напряженного состояния. «Проблемы прочности», 1975, № 4.

2. Корнилов А. А. Способ исследования усталости листовых материалов. Авторское свидетельство № 308333 по кл. G 01 N 3/32 от 17.09.71.

3. Ковешников Б. Н., Степаненко Н. Д. Влияние типа армирования и частоты нагружения на упругие свойства стеклопластиков. В сб.: «Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов», вып. 1. КуАИ, 1975.

4. Степаненко Н. Д., Ковешников Б. Н. Методика определения усталостных свойств стеклопластиковых лопаток компрессоров и стеклопластиков при высокочастотных колебаниях. В сб.: «Усталостная прочность и долговечность авиационных конструкций», вып. 1, КуАИ, 1974.

5. Степаненко Н. Д., Иванов В. П. К вопросу об определении спектров собственных форм и частот лопаток турбомашин. В сб.: «Вибрационная прочность и надежность авиационных двигателей», вып. XIX. КуАИ, 1965.

УДК 621.515:620.178.5

С. М. Дорошко, С. А. Смородин, М. Л. Тойбер

К ВЫБОРУ ПАРАМЕТРА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ШАРНИРНЫХ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА

Вопросы контроля и диагностики вибрационного состояния рабочих лопаток ГТД не могут быть решены традиционными методами. Поэтому становятся перспективными бесконтактные способы измерения параметров, характеризующих вибрационное состояние лопаток. Эти способы обладают рядом преимуществ по сравнению, например, с тензометрированием. Они не могут заменить существующие методы, но при исследовании процесса технического обслуживания в целях контроля и диагностики состояния рабочих лопаток более рациональны.

В компрессорах современных ДТРД широкое применение находят лопатки с шарнирным креплением к ободу диска. Собственные частотные характеристики этих лопаток существенно зависят от условий заделки. Вариация скорости вращения ротора значительно изменяет жесткостные характеристики лопаток и уровень сил трения в соединении лопатка — диск.

Оценивая колебания пакета лопаток на колесе, следует учитывать и возможность аэродинамического взаимовлияния лопаток друг на друга — шарнирный замок способствует повышению такого взаимодействия. Изучение поведения рабо-