УДК 620.19

А. М. Кокуров, И. Н. Одинцев

Исследование вибрационного состояния конструкции со структурным дефектом на этапах развития прогрессирующего повреждения

Изложена усовершенствованная методика экспериментально-расчетного исследования вибрационного состояния композитных конструкций со структурными дефектами типа локальных расслоений. С помощью предложенного подхода можно определить влияние размера дефекта на собственные формы и частоты колебаний конструкции. Продемонстрировано практическое применение методики на примере исследования вибрационных характеристик лопасти флюгерно-реверсивного воздушного винта-вентилятора с дефектом структуры материала.

Ключевые слова: дефект, повреждение, вибрационное поведение, метод конечных элементов.

В процессе эксплуатации значительное количество металлических и композитных конструкций, а также их элементов активно подвергается вибрационному воздействию различного происхождения и уровня [1]. В частности, в авиации актуально исследование поведения элементов конструкций при акустическом и вибрационном воздействиях. Силовая установка, элементы механизации, агрегаты самолетных систем являются мощными источниками как акустического, так и вибрационного воздействий на планер самолета и его конструктивные элементы. Стоит также отметить, что вибрационное воздействие может привести к более раннему возникновению трещин и ускоренному развитию уже имеющихся повреждений и дефектов [2, 3]. С уверенностью можно сказать, что данное воздействие оказывает существенное, а в ряде случаев определяющее, влияние на прочность и ресурс конструкций, недооценка которого может привести к преждевременному выходу из строя и разрушению агрегата [4].

Адекватно оценить напряженно-деформированное состояние и вибрационное поведение объектов и конструкций можно при проведении комплексных экспериментальных и расчетных исследований [5]. Современные высокоэффективные расчетные методы позволяют довольно точно воспроизвести динамическое поведение исследуемого объекта при условии обеспечения достоверности расчетной модели, что, в свою очередь, достигается сопоставлением результатов испытаний со значениями численного расчета объекта исследования.

© Кокуров А. М., Одинцев И. Н., 2016

Целью проводимого исследования являлось определение влияния структурного дефекта на собственные формы и соответствующие им частоты колебаний. В качестве примера определены виброхарактеристики лопасти флюгерно-реверсивного воздушного винта-вентилятора с дефектом структуры материала.

Анализ напряженно-деформированного и вибрационного состояний объектов и конструкций можно условно разделить на 3 основных этапа:

1) определение экспериментальными и расчетными методами вибрационных характеристик исходной, неповрежденной конструкции;

2) интегрирование в конструкцию элемента со структурным дефектом, проведение соответствующих расчетов;

3) моделирование процесса развития прогрессирующего повреждения.

Рассмотрим каждый из этапов более подробно.

Определение динамических характеристик исходной конструкции

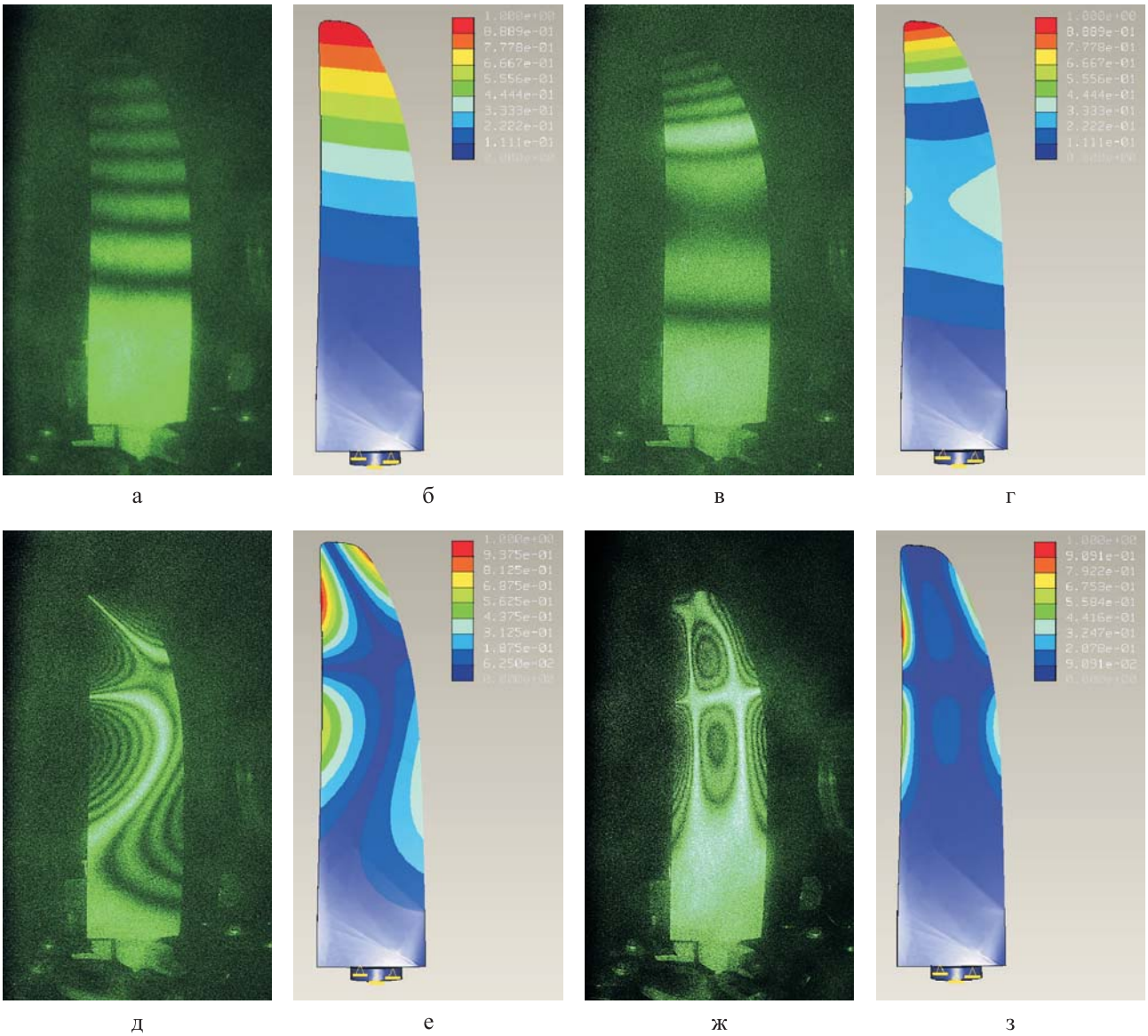
Экспериментальное определение виброхарактеристик лопасти винта выполнялось с помощью голографической интерферометрии в реальном масштабе времени в диапазоне частот возбуждения 0…32 000 Гц. Одновременно проводилась идентификация соответствующих собственных форм колебаний по положениям узловых линий на поверхности объекта, вдоль которых амплитуды колебаний равны нулю. При испытаниях лопасть была жестко закреплена в токарном патроне, зафиксированном болтовым соединением на силовой плите. Голографический интерферометр был собран по

схеме Э. Лейта и Ю. Упатниекса с делением пучков по фронту.

Численные расчеты собственных частот и форм колебаний производились методом конечных элементов (МКЭ) с использованием верифицируемой математической модели. Конструктивно подобная модель лопасти винта обладает сложной геометрической формой: по мере движения от основания к законцовке изменяются толщина и угол крутки. Размер конечно-элементной модели (КЭМ) ≈ 36 000 элементов. Смоделированные граничные условия (ГУ) соответствовали закреплению образца при проведении эксперимента: вертикальная плоскость концевой секции комлевой части модели лопасти имела жесткое защемление. Задание ГУ существенно влияет на формы и частоты колебаний исследуемых объектов, что важно при сравнении данных эксперимента и численного расчета. Поэтому необходимо воспроизвести именно те ГУ, которые возникли при закреплении образца в процессе эксперимента. В свою очередь, закрепление образца при испытаниях аналогично закреплению лопасти винта в двигателе.

Для задания механических свойств стали 40ХГНМА использовалась модель материала со следующими механическими характеристиками: $E = 2{,}1 \cdot 10^{11}$ Па; $\mu = 0{,}3$; $\rho = 7820$ кг/м^3.

На рис. 1 представлены голографические интерферограммы усреднения по времени для



а б в г

д е ж з

Рис. 1. Определенные формы и частоты колебаний лопасти винта:
а – $F_{эксп}$ = 77 Гц; б – $F_{числ}$ = 77 Гц; в – $F_{эксп}$ = 234 Гц; г – $F_{числ}$ = 259 Гц; д – $F_{эксп}$ = 1170 Гц;
е – $F_{числ}$ = 1177 Гц; ж – $F_{эксп}$ = 4430 Гц; з – $F_{числ}$ = 4289 Гц

собственных (резонансных) форм колебаний лопасти совместно с полями амплитуд вибраций, полученными с помощью МКЭ. Здесь же указаны экспериментальные и вычисленные значения собственных частот колебаний. Всего было найдено 25 форм и соответствующих им частот колебаний (рис. 2). Напомним, что в используемой методике узловым линиям отве-

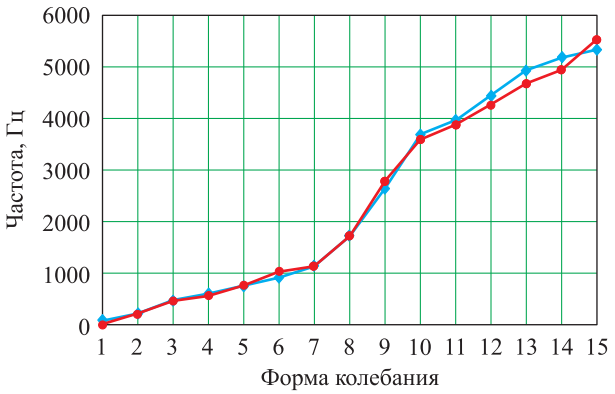


Рис. 2. Сопоставление собственных частот и форм колебаний модели лопасти:
– экспериментальные данные; – расчетные данные

чают области, где при резонансных колебаниях сохраняются интерференционные полосы наведенного растра. Как известно, стандартные формы колебаний прямоугольной пластины могут идентифицироваться по количеству узловых линий, параллельных двум ее смежным сторонам. Иными словами, каждой такой форме ставится в соответствие пара чисел (m, n), равных количеству указанных узловых линий. В рассмотренном объекте одна из этих линий априори совпадает с границей жесткого закрепления – заделки. Полагая, что узловым линиям, параллельным заделке, отвечает первый индекс m, имеем $m \geq 1$. Таким образом, первая изгибная форма колебаний пластины будет обозначаться (1, 0), первая крутильная форма – (1, 1) и т. д.

Для более уверенной идентификации форм колебаний выполнялась регистрация интерферограмм колебаний лопасти при полученных собственных частотах с помощью метода усреднения по времени. При восстановлении получаемых интерферограмм узловым линиям в данном случае будут соответствовать наиболее яркие полосы, а значения амплитуд колебаний в произвольных точках вычисляются исходя из порядков проходящих через них интерференционных полос в соответствии с формулой

$$I = J_0^2\left(\frac{4\pi Z}{\lambda}\right),$$

где J_0 – функция Бесселя 1-го рода нулевого порядка;

Z – амплитуда колебаний;

λ – длина волны лазерного излучения.

Это обстоятельство позволяет, в частности, оценивать относительную разность амплитуд колебаний в местах пространственно разнесенных пучностей, что имеет немаловажное значение при сопоставлении деформированного состояния, регистрируемого экспериментальным и расчетным путями.

Сопоставление полученных экспериментальных и расчетных результатов обнаруживает их весьма хорошее взаимное соответствие как по характеру полей амплитудных перемещений для исследованных собственных форм, так и по значениям собственных частот. Значения первых 15 частот колебаний представлены в табл. 1.

Степень корреляции полученных результатов показана на рис. 2. Здесь по оси абсцисс отложены номера форм колебаний, а по оси ординат – соответствующие им частоты колебаний. Видно, что полученные результаты практически идентичны (см. рис. 2). В сред-

Таблица 1

Значения экспериментальных и расчетных частот колебаний модели лопасти винта

№ собственной частоты	$F_{эксп}$, Гц	$F_{числ}$, Гц
1	77	77
2	234	259
3	500	500
4	611	602
5	790	806
6	980	1050
7	1170	1177
8	1760	1748
9	2700	2823
10	3660	3620
11	3950	3905
12	4430	4289
13	4950	4715
14	5180	4968
15	5370	5530

нем расхождение значений частот не превышает 4 %. При этом в показанном распределении не наблюдается какого-либо заметного тренда, а разброс точек на графиках на рис. 2 носит несистематический характер, т. е. может объясняться исключительно неизбежными случайными погрешностями.

Таким образом, проведенные исследования механической и математической моделей лопасти винта показали высокую степень взаимной адекватности экспериментальных и расчетных данных. В таком аспекте полученные результаты убедительно свидетельствуют, с одной стороны, о правильности экспериментального моделирования образца (соблюдении требуемой геометрии, обеспечении ГУ и условий возбуждения), с другой – о точности и достоверности данных о виброповедении элементов конструкций, получаемых методами голографической интерферометрии.

Моделирование элемента конструкции со структурным дефектом

Моделирование элемента конструкции со структурным дефектом производилось по методу подконструкций. В соответствии с ним рассмотрим лопасть винта в качестве основной конструкции, а участок со структурным дефектом – в виде элемента подконструкции. Подконструкция в данном случае представляет собой элемент поверхности лопасти в форме прямоугольной пластины с дефектом квадратной формы. Геометрические характеристики исследуемого объекта приведены на рис. 3, а.

Для проведения численного расчета была разработана локальная КЭМ исследуемого участка конструкции, состоящая из плоских конечных элементов. Процесс развития повреждения представлялся в виде набора КЭМ, описывающих деформационное состояние объекта в характерные временные промежутки. На рис. 3, б, в представлена выборка расчетных моделей: слева – КЭМ исходной (неповрежденной) конструкции, справа – модель, содержащая структурный дефект (показан в рамке).

В процессе численных исследований определялись значения собственных частот в диапазоне 0…26 000 Гц с одновременной идентификацией соответствующих собственных форм колебаний по положениям узловых линий на поверхности объекта, вдоль которых амплитуды колебаний равны нулю.

Проанализировав изменения частот колебаний, можно сделать вывод о том, что наличие дефекта не оказывает существенного влияния на собственные частоты колебаний исследуемых объектов. Поэтому при дальнейшем рассмотрении полученных результатов основное внимание уделялось именно формам колебаний и оценке деформационного состояния объекта исследования. В рассмотренном случае, ввиду достаточной простоты образца в плане создания его математической расчетной модели, вычисленные значения собственных частот допустимо рассматривать в качестве истинных.

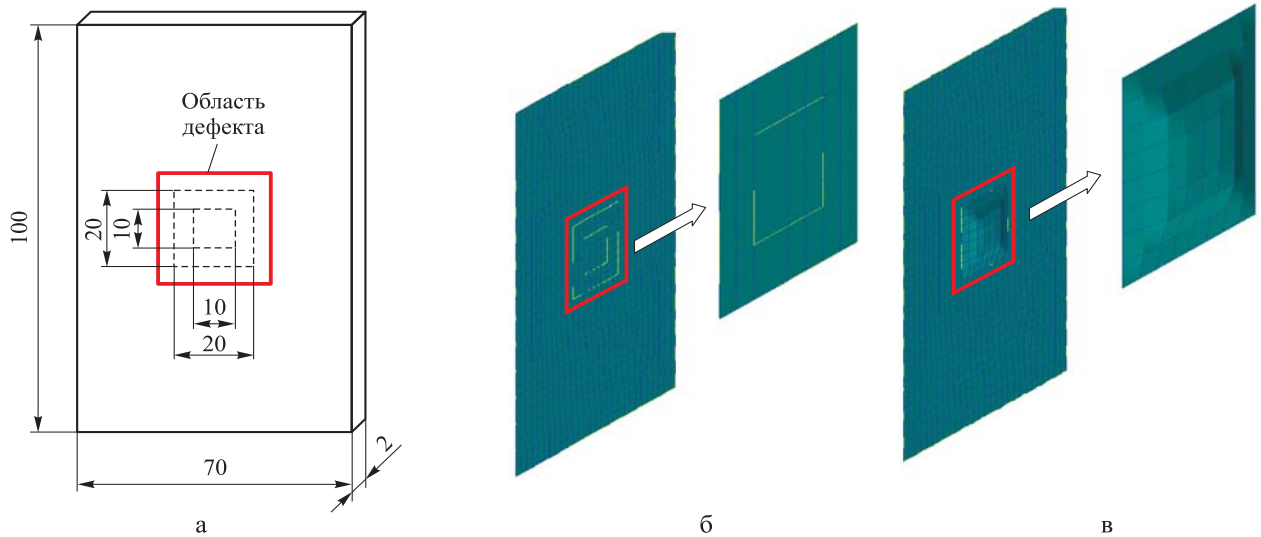


Рис. 3. Геометрические размеры и локальные КЭМ конструкции

Всего было найдено 25 форм резонансных колебаний исследуемого объекта.

Результаты расчетов исходной конструкции и с дефектом структуры попарно представлены на рис. 4 в виде изолиний амплитуд колебаний. Обратим внимание, что в соответствии со сказанным выше картины полос, зарегистрированные, например, при частотах возбуждения до 11 500 Гц, отвечают стандартным формам колебаний. Вместе с тем картины полос при частотах более 11 500 Гц визуализируют собственные формы, для которых стандартная идентификация неприменима.

При сравнении полученных результатов было обнаружено, что наличие дефекта в структуре материала вызывает искажение форм колебаний исследуемого объекта. Характер влияния дефекта на формы колебаний таков, что на частотах 0…5200 Гц происходит только искажение узловых линий (рис. 4, а, б), на более высоких частотах наблюдается возникновение собственных резонансных форм колебаний участка с дефектом структуры (рис. 4, в, г).

Таким образом, проведенные исследования элемента конструкции с дефектом структуры показали возможность идентификации повреждения по изменению собственных форм колебаний исследуемого объекта.

Моделирование процесса развития повреждения

Напомним, что в рамках проводимого исследования динамический процесс развития повреждения структуры материала представляется в виде трех характерных этапов:

1) исходное неповрежденное состояние объекта;

2) возникновение дефекта малого размера – задание области повреждения и геометрических характеристик дефекта;

3) прогрессирующий рост дефекта – последовательное увеличение размеров повреждения.

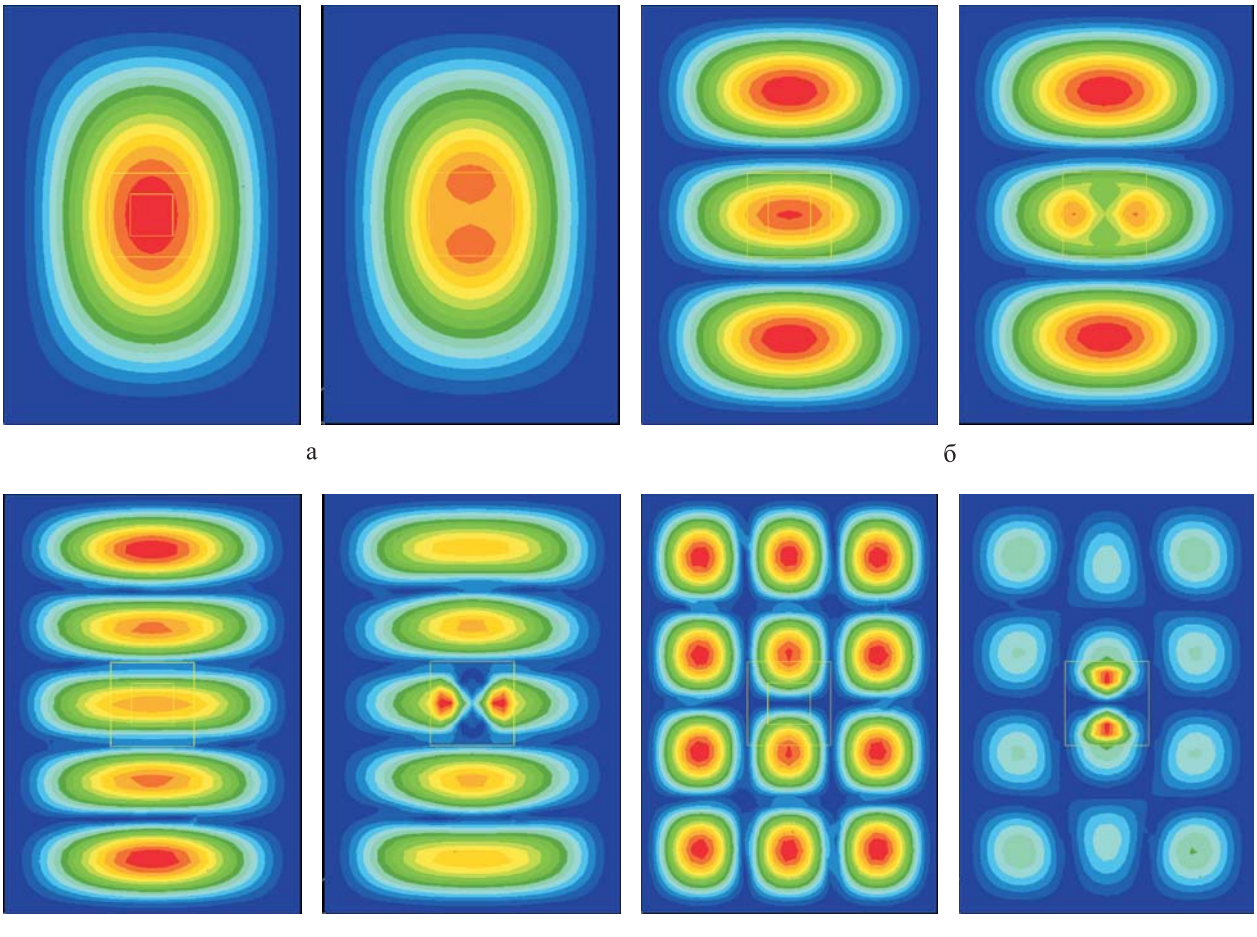


Рис. 4. Характер влияния дефекта на формы колебаний элемента конструкции:
а – форма 1; б – форма 2; в – форма 11; г – форма 14

Для проведения численных расчетов были выбраны три характерных размера дефекта (параметр *Ld* – раскрытие в центре дефекта), представленные на различных этапах развития повреждения (рис. 5). Здесь по оси абсцисс отложены длина и ширина области повреждения,

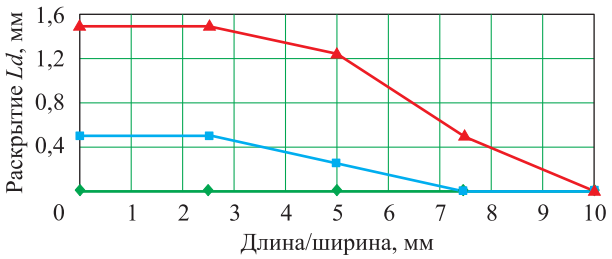


Рис. 5. Геометрические характеристики дефекта на различных этапах развития повреждения:
– *Ld* = 0; – *Ld* = 0,5; – *Ld* = 1,5

а по оси ординат – раскрытие. Так как в данной работе модель дефекта представляла собой квадрат, то в этом случае значения, отложенные по оси ординат для длины и ширины, совпадали. В более общей постановке задачи по предложенной методике возможно произвести расчет дефекта произвольной формы, в этом случае, соответственно, требуется задать как минимум два графика, позволяющих однозначно определить геометрию области повреждения.

Для оценки напряженно-деформированного состояния объектов и конструкций в условиях вибрационного нагружения проведена серия численных расчетов поэтапного развития прогрессирующего повреждения.

Для удобства анализа полученных результатов (табл. 2 и рис. 6) представлена выборка в виде трех характерных деформационных состояний элементов конструкции: исходное состояние, повреждение малых размеров, прогрессирование повреждения – поэтапное увеличение размера дефекта (показан один из этапов).

Оценивая изменение деформационного поведения исследуемого объекта в процессе роста повреждения, можно заметить, что на низких частотах и соответствующих им формах колебаний влияние размера дефекта несущественно и сводится к искажению линий исходной картины полей перемещений. Данное явление можно объяснить тем, что локальное изменение жесткостных характеристик кон-

Таблица 2

Значения частот (Гц) колебаний исследуемого элемента конструкции на различных этапах развития повреждения

№ собственной частоты	Расчетная модель		
	Ld = 0	*Ld* = 0,5	*Ld* = 1,5
1	1455	1436	1440
2	2918	2913	2913
3	4425	4410	4411
4	5273	5222	5248
5	5809	5809	5841
6	8173	8150	8156
7	8623	8572	8577
8	9244	9175	9240
9	10 680	10 668	10 678
10	11 425	11 414	11 466
11	12 830	12 692	12 787
12	12 938	12 932	12 961
13	15 616	15 527	15 535
14	15 907	15 798	15 831
15	16 066	15 986	15 995
16	17 401	17 383	17 414
17	17 924	17 760	17 786
18	19 456	19 315	19 310
19	20 119	19 952	20 111
20	20 710	20 663	20 715
21	22 528	21 598	22 519
22	24 013	22 458	23 299
23	24 472	23 988	23 349
24	25 005	24 193	23 566
25	25 901	24 456	23 589

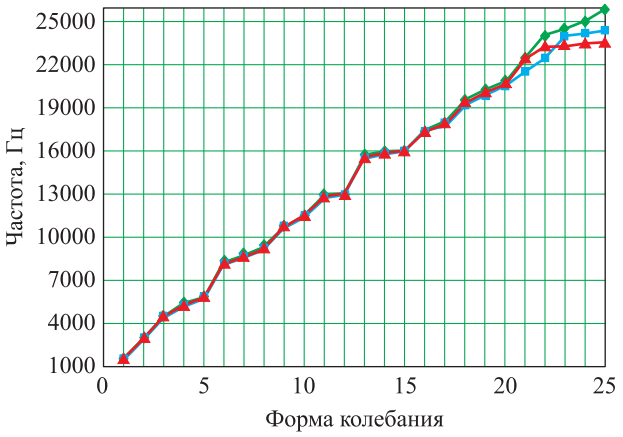


Рис. 6. Сопоставление частот колебаний элемента конструкции на различных этапах развития повреждения:
– *Ld* = 0; – *Ld* = 0,5; – *Ld* = 1,5

струкции в зоне повреждения оказывается незначительным по сравнению с общей жесткостью исследуемого объекта.

На высоких резонансных частотах более 11 400 Гц и формах с 10-й и выше наблюдается увеличение влияния размера дефекта на картину полос (рис. 7, а). В частности, при сохранении числа узловых линий происходит смещение пиков областей с максимальными перемещениями. Причем смещение направлено в сторону области возникновения и прогрессирующего роста повреждения. Отметим, что интенсивность концентрации и значение максимальных перемещений здесь напрямую связаны с размером дефекта – с возрастанием повреждения увеличивается искажение полос, сопровождающееся изменением деформационной картины и возникновением концентрации перемещений в области повреждения (рис. 7, б).

При переходе к более высоким частотам (с 14-й формы и выше) наблюдается появление резонансных колебаний области дефекта. В процессе увеличения частоты сначала происходит наложение амплитуд колебаний объекта исследования и области повреждения (рис. 7, в). Далее колебание дефекта становится преобладающим как по величине перемещений, так и по интенсивности (рис. 7, г).

Анализируя полученные результаты, можно с уверенностью сказать, что изменение геометрических характеристик области повреждения вызывает деформационный отклик в конструкции в виде изменения картины полей перемещений. На основании этого можно решить и обратную задачу: по известному деформационному состоянию конструкции обнаружить поврежденный элемент и с допустимой точностью определить его расположение и размеры.

При оценке возможности обнаружения дефекта с помощью вибрационного возбуждения объекта важно отметить, что в областях прохождения узловых линий на всех частотах для всех форм колебаний и размеров дефекта характерно отсутствие перемещений в районе дефекта. Отсюда следует, что количество форм, имеющих практическое значение для обнаружения и идентифицирования повреждений, значительно меньше определяемых в процессе проведения исследования. Повысить информативность и точность получаемых результатов можно путем смещения области повреждения относительно центра симметрии объекта исследования.

Таким образом, с помощью предложенной методики оценки напряженно-деформированного и вибрационного состояний объектов

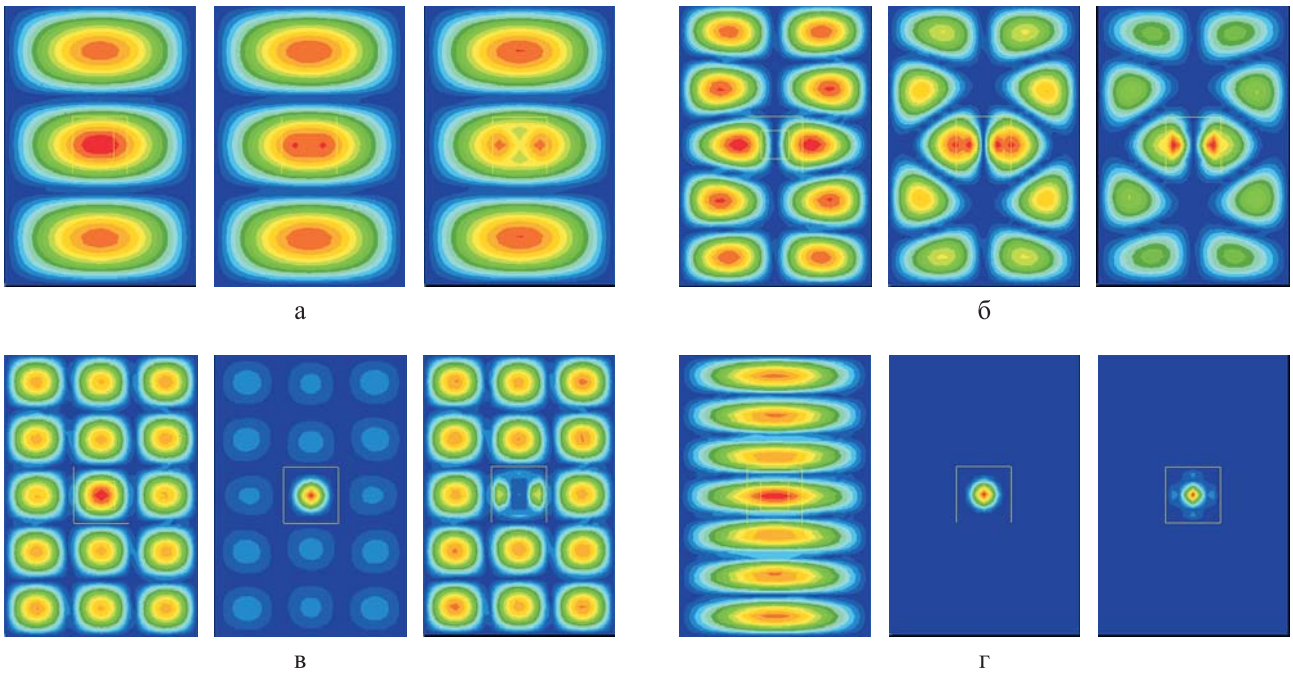


Рис. 7. Оценка влияния размера дефекта на формы колебаний:
а – форма 4; б – форма 13; в – форма 19; г – форма 22

и конструкций со структурными дефектами можно провести комплексное исследование, позволяющее успешно решить задачу обнаружения повреждения конструкции, а также оценить влияние дефекта на напряженно-деформированное и вибрационное состояния конструкции.

Выводы

Подводя итоги проведенного исследования, можно сделать следующие выводы:

1) методы голографической интерферометрии хорошо подходят для определения вибрационных характеристик конструкций, обладающих сложной геометрической формой; с помощью данных методов с высокой точностью и достоверностью найдены собственные формы и частоты колебаний исследуемого объекта – конструктивно подобной лопасти воздушного винта;

2) сравнение полученных результатов показало высокую степень взаимной адекватности экспериментальных и расчетных данных, что свидетельствует о возможности применения комбинированных методов исследования для увеличения информативности проводимых испытаний;

3) формы колебаний элементов конструкций являются более восприимчивыми к наличию внутренних дефектов по сравнению с собственными (резонансными) частотами. В связи с этим при решении задач обнаружения и геометрической идентификации дефекта в структуре объекта исследования наибольшее внимание следует уделять изменению именно форм колебаний;

4) проведенное исследование напряженно-деформированного и вибрационного состояний объектов со структурными дефектами демонстрирует возможность не только успешно решать задачи обнаружения дефектов в конструкциях и их элементах, но и производить оценку влияния повреждения структуры на деформационные и вибрационные характеристики конструкции.

Список литературы

1. *Смирнов Н. Н., Чинючин Ю. М.* Современные проблемы технической эксплуатации воздушных судов. М.: МГТУ ГА, 2007. 96 с.

2. *Павлов В. И.* Композиционные материалы и неразрушающий контроль // В мире неразрушающего контроля. 2003. № 2. С. 28–31.

3. *Болотин В. В.* Дефекты типа расслоений в конструкциях из композитных материалов // Механика композитных материалов. 1984. № 2. С. 239–255.

4. *Васильев В. В.* Композиционные материалы: справочник / *В. В. Васильев* и др.; под ред. *В. В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского.* М.: Машиностроение, 1990. 510 с.

5. *Бохоева Л. А., Пнёв А. Г., Филиппова К. А.* Разрушение пластины из композиционных материалов с дефектами // Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий. Ч. 1. Улан-Удэ, 2009. С. 150–152.

Поступила 23.11.16

Кокуров Андрей Михайлович – ведущий инженер-конструктор проектно-конструкторского центра «Прочность» ПАО «Туполев», г. Москва.

Область научных интересов: остаточная прочность и живучесть конструкций, механика разрушения, композитные материалы, конечно-элементное моделирование.

Одинцев Игорь Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики разрушения и живучести ФГБУН «Институт машиноведения им. А. А. Благонравова» Российской академии наук (ИМАШ РАН), г. Москва.

Область научных интересов: экспериментальная механика деформированного твердого тела, оптические методы исследования полей деформаций, диагностика состояния элементов конструкций.

Study of vibratory condition of the construction with a structural defect in progressive damage development stages

The paper presents an improved method of experimental and computational studies of vibratory condition of the composite constructions with structural defects such as local fibrations. With the proposed approach it is possible to determine the size of the defect and its influence on the inherent forms and structure vibration frequency.

In our work we demonstrate practical application of the technique studying the vibration characteristics of the feathering propeller blades with defective structure of the material.

Keywords: defect, damage, vibration behavior, finite element method.

Kokurov Andrey Mikhaylovich – principal design engineer of Tupolev Public Joint-stock Company, Moscow.
Science research interests: residual strength and structure survivability, fracture mechanics, composite materials, finite element modeling.

Odintsev Igor Nikolaevich – Candidate of Engineering Sciences, Senior Research Officer of the Laboratory of fracture mechanics and survivability, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow.
Science research interests: experimental mechanics of deformed solid body, optical methods for studying deformation fields, diagnostics of structure element state.