

УДК 539.4 : 621.165

Ю.С. ВОРОБЬЕВ, М.А. СТОРОЖЕНКО*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины*

АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

В работе проведен анализ колебаний турбинных лопаток с повреждениями. Моделирование объектов проводилось на основании трехмерного подхода метода конечных элементов. Проанализировано влияние различной глубины и места расположения трещины на собственные частоты, формы перемещений и интенсивности напряжений. Достоверность полученных результатов обеспечивалась сравнением с экспериментальными данными, полученными для камертонного образца с повреждениями. Проведены исследования реальных лопаток.

пакет лопаток, повреждения, вибрационные характеристики, формы колебаний, локализация напряжений, метод конечных элементов

Введение

Проблема продления надежности и ресурса лопаточного аппарата турбомашин, который является наиболее нагруженным и ответственным элементом турбоагрегатов, актуальна для современного машиностроения. Наибольшее число отказов турбин в течение всего срока эксплуатации связано с возникновением усталостных трещин в рабочих лопатках, поэтому они и были выбраны в качестве объекта исследования.

Для лопаток сложной геометрической формы, имеющих малое удлинение, сложную конфигурацию хвостовой части с ножкой, полки на периферии и в хвостовой части наиболее полной моделью является трехмерная модель, в которой также могут быть учтены неоднородность свойств материала, наличие повреждений и другие факторы [1 – 4]. Трехмерный подход в сочетании с методом конечных элементов позволяет получить полную картину распределения напряжений и выявить зоны локализации опасных напряжений.

1. Постановка задачи

В работе рассматриваются колебания пакетов лопаток с повреждениями различной глубины и место-

положения, а также повреждение различных лопаток пакета. Особое внимание уделяется областям, где вследствие конструктивных особенностей возникают максимальные напряжения, и возрастает вероятность возникновения трещин. Сложность задачи требует экспериментальной проверки численных результатов.

Для оценки достоверности исследований проведено сравнение расчетных результатов с экспериментальными, полученными в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины на специальных образцах камертонного типа [5]. В этих экспериментальных исследованиях рассмотрено влияние глубины и места расположения трещины на формы колебаний и распределения вибрационных напряжений камертонного образца. Для этих же образцов были проведены численные исследования и сравнение напряженно-деформированного состояния камертонного образца без трещины, а также с различной глубиной и местами расположения поперечной трещины.

2. Численный анализ

Экспериментальные исследования колебаний камертонного образца проводились для случая первой изгибной формы колебаний стержней в плоскости их

максимальной жесткости. При наличии повреждения одного из стержней нарушается регулярность системы, вследствие чего возбуждаются синфазная и антифазная формы колебаний стержней. Полученные при этом частотные характеристики рассматриваемой колебательной системы соответствуют третьей и четвертой расчетным частотам ее конечно-элементной модели.

На рис. 1 приведено сопоставление относительных деформаций, полученных расчетным и экспериментальными методами для синфазных форм колебаний камертонного образца в зависимости от глубины выреза. Аналогичные результаты имеются для других расположения выреза.

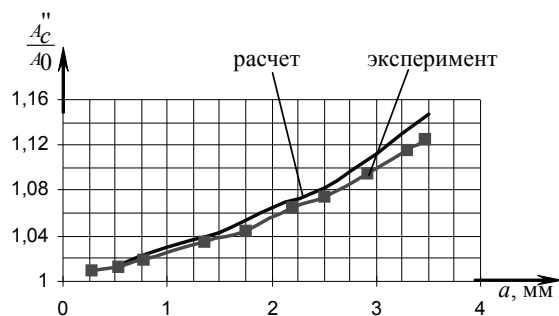


Рис. 1. Сопоставление относительных деформаций, полученных расчетным и экспериментальными методами для синфазных форм колебаний: a — глубина выреза; A_0 — амплитуда деформаций при синфазных колебаниях системы без повреждений в корневом сечении; A_c'' — амплитуда деформаций поврежденно-го стержня при синфазных колебаниях

Из рис. 1 видно приемлемое соответствие расчетных и экспериментальных данных. Это дает основание ожидать, что при расчете реальных систем будут получены достаточно достоверные результаты.

На примере колебаний пакета парных лопаток газовой турбины турбокомпрессора изучалось влияние места расположения повреждения на собственные частоты, формы перемещений и поля интенсивностей напряжений.

Был проведен анализ свободных колебаний пакета парных лопаток газовой турбины турбокомпрессора. Парные лопатки соединены в сектор, имеющий

общий замок и бандажную полку. Каждый пакет представляет собой единую систему, состоящую из двух закрученных лопаток несимметричного сечения, основания с елочным замком и полки с элементами лабиринтного уплотнения.

Собственные частоты и формы напряжений пакета лопаток без повреждения и с различным расположением повреждений представлены на рис. 2. Проведенные исследования показали, что, несмотря на наблюдаемую сходную картину для обеих лопаток на ряде форм перемещений, возникающие в них напряжения различаются. Видно отличие форм напряжений соседних лопаток, что объясняется их закруткой и несимметричностью. Из-за наличия полки максимальные напряжения даже для низших форм колебаний перемещаются от корневой зоны в среднюю и периферийную части лопаток.

Появление трещины по-разному влияет на формы напряжений в зависимости от их расположения на входной или выходной кромке. Наибольшее влияние наблюдается при наличии повреждения на входной кромке. Наибольшее влияние оказывает трещина на преимущественно крутильные формы колебаний (9 и 10 формы).

Заключение

Разработана методика оценки влияния повреждений в системе лопаток на собственные частоты, формы перемещений и локализацию вибрационных напряжений. Достоверность результатов расчетов подтверждается их сопоставлением с данными специально поставленного эксперимента.

При появлении трещины наблюдается существенная локализация напряжений вблизи устья трещины. Частоты колебаний изменяются, но незначительно. Меняется картина распределения перемещений и особенно интенсивностей напряжений. Показано влияние расположения повреждения на вибрационные характеристики и локализацию напряжений вблизи трещины.

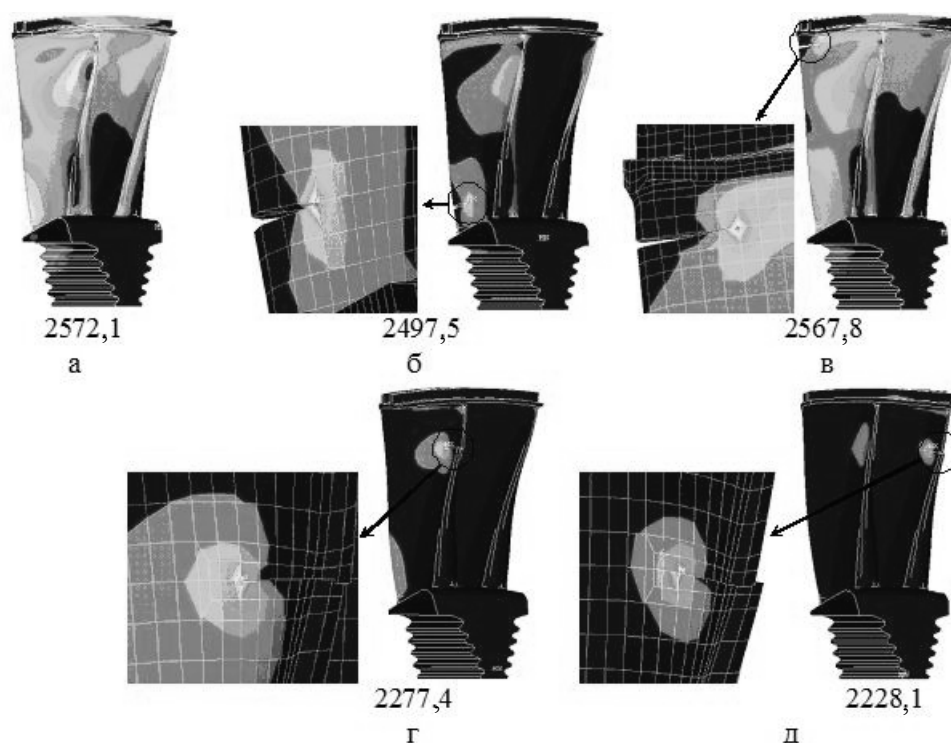


Рис. 2. Поля интенсивностей напряжений и частоты (в Гц) при колебаниях пакета лопаток по 2-й форме без повреждений (а) и с различным расположением трещины на левой (б, в, г) и правой (д) лопатках

Знание картины распределения вибрационных напряжений и их локализации может оказаться полезным при выборе вариантов как отдельных лопаток, так и их систем.

Литература

1. Колебания турбинных лопаток с повреждениями / Ю.С. Воробьев, В.Н. Романенко, Е.В. Тишковец, М.А. Стороженко // Вибрации в технике и технологиях. – 2004. – № 5 (37). – С. 47-51.
2. Локализация вибрационных напряжений в лопатках ГТД с повреждениями / Ю.С. Воробьев, Е.В. Тишковец, М.А. Стороженко, В.Н. Романенко // Авиационно-космическая техника и технология: Научн.-техн. журн. – 2004. – № 8 (16). – С. 80-82.
3. Воробьев Ю.С., Романенко В.Н., Стороженко М.А. Колебания пакета лопаток с повреждениями // Вестник двигателестроения: Научн.-техн. журн. – 2005. – № 2. – С. 118-120.

4. Проблемы численного анализа лопаточного аппарата турбомашин / Ю. Воробьев, В. Романенко, М. Стороженко, Е. Тишковец // IX Konferencja Naukowo-Techniczna “Programy MES w komputerowym wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania” (Gizycko, 19-22 pazdziernika 2005), 2005. – P. 121-128.

5. Зиньковский А.П., Токарь И.Г., Побережников А.В. Некоторые особенности влияния эксплуатационных факторов на колебания лопаточного аппарата турбомашин // 3 Konferencja naukowo-praktyczne “Energia w nauce i technice”: Streszczenia referatow. – Suwalki, 2004. – P. 33-34.

Поступила в редакцию 4.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.