

Таблица 1

Основные характеристики СГК

Параметр	Стартерный режим	Генераторный режим
Напряжение промышленной питающей сети, В	380 ±38	–
Напряжение сети питания потребителей собственных нужд ГПА, В	380 ±38	380 ±10
Частота промышленной питающей сети, Гц	50 ±0,4	–
Частота сети питания потребителей собственных нужд ГПА, Гц	50 ±0,4	50 ±0,4
Мощность потребителей собственных нужд ГПА, кВА	–	200
Частота вращения ротора стартер-генератора, об/мин	0...600	1000...2000

Завершить работы по созданию опытного образца СГК и приступить к его испытаниям в составе ГТД планируется в конце 2011 – начале 2012 г.

Литература

1. Обзор инноваций и научно-технических разработок // НП «Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт». – 2009. – № 11 – С. 5.

УДК 539.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю. С. Воробьев

Доктор технических наук, профессор, заведующий
отделом*

Контактный тел.: (0572) 94-15-24, 349-47-73

E-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua

М. А. Чугай

Кандидат технических наук, научный сотрудник*

Контактный тел.: (0572) 94-15-24, 349-47-73

E-mail: chugay@ipmach.kharkov.ua

*Отдел нестационарных механических процессов
Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины
ул. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046

У роботі проведено аналіз впливу орієнтації кристалографічних осей і типа бандажних зв'язків на спектр власних частот, форм і розподіл відносних напружень на коливання робочого колеса ГТД з монокристалічними неохолоджуваними лопатками
Ключові слова: *робоче колесо, бандаж, спектр частот*

В работе проведен анализ влияния ориентации кристаллографических осей и типа бандажных связей на спектр собственных частот, форм и распределение относительных напряжений на колебания рабочего колеса ГТД с монокристаллическими неохлаждаемыми лопатками
Ключевые слова: *рабочее колесо, бандаж, спектр частот*

The work presents an analysis of influence of orientation of crystallography axes and type of shroud is conducted on the spectrum of natural frequencies, forms and distributing of stress intensity on the vibrations of gas-turbine wheel with the single-crystal uncooled blades
Key words: *blading wheel, bandage, spectrum of frequencies*

1. Введение

Современные конструкции ГТД работают в условиях интенсивных вибрационных и нестационарных нагружений, высоких температурных полей и других

экстремальных условий. Динамическая прочность элементов машин и их систем может быть обеспечена только комплексным использованием новых конструктивных решений и новейших материалов [1 - 4].

Современные газотурбинные двигатели (ГТД) характеризуются ростом максимальной температуры газа и интенсивности нагрузок. Одними из наиболее ответственных деталей ГТД являются рабочие лопатки. Именно они определяют максимальную температуру газа, надежность и ресурс работы двигателя, удельную мощность и экономичность двигателя. Высокий уровень напряжений, температур, нестабильность режимов нагрева и нагружения, возможность возникновения резонансных колебаний делает рабочие лопатки одним из наиболее сложных элементов современной техники. Основным направлением повышения долговечности лопаток является использование, как для первой ступени газовой турбины, так и для последующих ступеней, монокристаллических жаропрочных сплавов, обладающих высокими жаропрочными свойствами [1 - 4].

Однако такие материалы обладают анизотропией прочностных и термомеханических свойств. НДС таких лопаток как при статических нагрузках, так и, особенно, при колебаниях существенно зависит от кристаллографической ориентации материала (КГО). Выбор кристаллографической ориентации материала связан с учетом ряда факторов, зависящих от геометрии лопатки, температурных полей, влияния центробежных сил и форм колебаний лопаток.

2. Постановка задачи и результаты исследования

В данной работе рассмотрены колебания монокристаллических неохлаждаемых лопаток рабочей ступени ГТД и исследовано влияние геометрической формы лопатки, кристаллографической ориентации материала, температурных полей, взаимного перемещения полков на собственные частоты и формы колебаний, распределения и локализацию относительных напряжений при колебаниях монокристаллических лопаток.

В качестве объекта исследования выбрано рабочее колесо реальной газовой турбины с разрезным бандажом и монокристаллическими неохлаждаемыми лопатками, на примере которого можно исследовать все особенности колебаний таких систем. Венец лопаток имеет разрезную бандажную связь из цельнофрезерованных полков, которые имеют предварительный натяг и могут совершать взаимные перемещения при колебаниях.

Структура монокристаллического сплава рассматриваемой лопатки представляет собой гранецентрированную кубическую решетку. Схематически ее структура с обозначением основных направлений осей КГО представлена на рис. 1.

Главной особенностью такой структуры является то, что при повороте на 90° вокруг любой из своих осей, материал имеет те же свойства, что и до поворота, тогда как поворот на другой угол (не кратный 90°), приводит к изменению упругих свойств.

Лопатка рассматривается в прямоугольной системе координат x, y, z . Ось z направлена по радиусу от оси вращения колеса. Геометрическая форма лопатки и расположение осей КГО $[100]$, $[010]$, $[001]$ при их совпадении с осями x, y, z соответственно представлено на рис. 1.

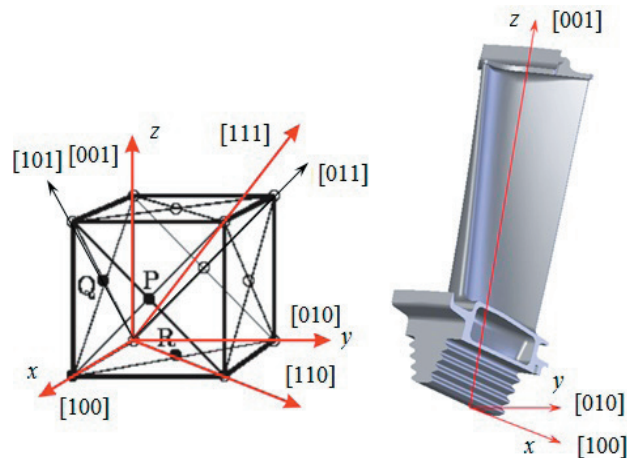


Рис. 1. Структура монокристалла, геометрия лопатки и схема расположения осей КГО $[100]$, $[010]$, $[001]$ при совпадении с осями x, y, z

Важной особенностью построения данной циклосимметричной модели, является разбиение на сектора (периоды симметрии) не с помощью радиальных плоскостей, а с помощью криволинейных поверхностей, учитывающих угол установки лопатки и заводки ее замка в паз, а также условия взаимного перемещения полков (рис. 2).

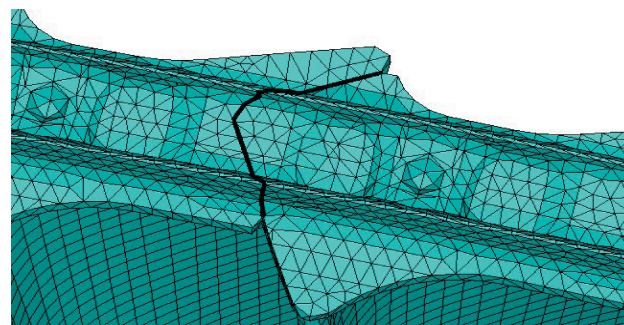


Рис. 2. Область стыковки двух бандажных полков

При выделении такого сектора желательно, чтобы условия циклосимметрии и условия проскальзывания принадлежали одной и той же площадке и соответственно, одним и тем же узлам. Сектор колеса (период симметрии) образован криволинейными поверхностями таким образом, что поверхности контакта полков оказываются внутри сектора. При этом условия циклосимметрии задаются на границе сектора, а условия контакта полков - внутри сектора. Тогда контактные поверхности будут лежать внутри сектора и условия проскальзывания могут легко быть заданы и варьироваться независимо от условий циклосимметрии.

При колебаниях рабочего колеса с разрезной полочной связью происходит взаимное перемещение контактирующих поверхностей полков. Условия контакта полков включают ограничения на взаимное проникновение контактирующих поверхностей. Взаимное перемещение полков зависит от натяга, как за счет монтажного натяга, так и за счет раскрутки лопаток под действием центробежных сил. Поэтому вначале проводится расчет статической деформации лопат-

ки под действием центробежных сил под действием сил на контактных поверхностях полок. Этот расчет позволяет найти силу прижатия полок P (натяг) во вращающемся колесе [2].

При расчете колебаний рабочего колеса без учета сопротивления взаимному перемещению полок вводится условие свободного проскальзывания контактных поверхностей полок без потери контакта. При учете натяга необходимо моделировать силы сопротивления взаимному перемещению полок. Моделирование сил сопротивления за счет трения при проскальзывании полок производилось посредством связей – линейных пружин, связывающих противоположные полки.

Как показали предварительные исследования [6, 7], сила натяга бандажных полок изменяется практически линейно от угла упругой закрутки лопаток. Влияние натяга при небольшом изменении угла закрутки слабо влияет на спектр частот.

Анализ влияния взаимного перемещения полок без сопротивления и материала лопаток на собственные частоты рабочего колеса показал, что по сравнению с собственными частотами рабочего колеса со сплошной бандажной связью собственные частоты с разрезной связью существенно снижаются.

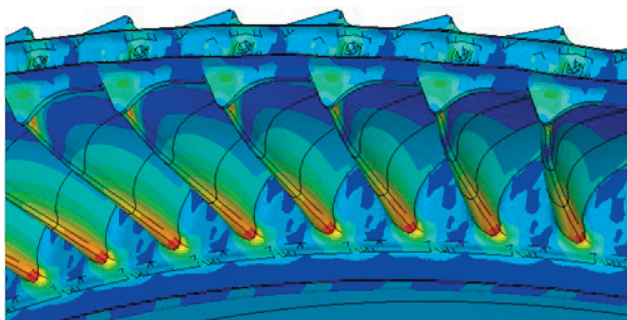


Рис. 3. Форма интенсивности напряжений при зонтичных колебаниях колеса со сплошной связью, 954,96 Гц

На рис. 3 - 4 представлены формы колебаний рабочего колеса со сплошной (рис. 3) и разрезной связью (рис. 4).

Следует отметить, что формы колебаний колеса с сопротивлением взаимному проскальзыванию и без сопротивления для выбранной величины натяга изменяются мало. Также оказываются очень близкие формы колебаний рабочих колес с лопатками из разных материалов.

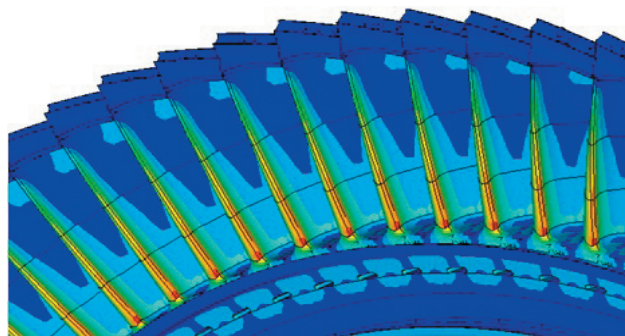


Рис. 4. Поля интенсивностей напряжений при зонтичных колебаниях колеса с проскальзыванием полок, 853,96 Гц

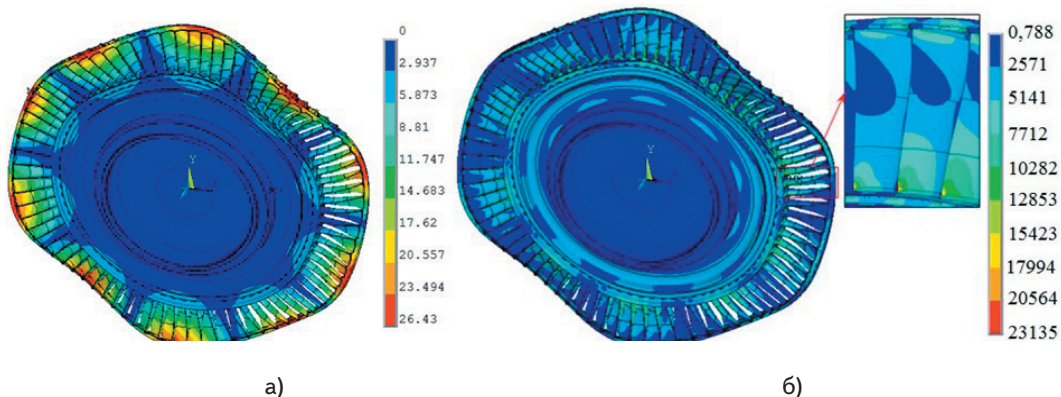


Рис. 5. Формы перемещений (а) и интенсивности напряжений (б) при колебаниях с 5-ю узловыми диаметрами, 1769 Гц, КГО [111]

На рис. 5 представлены формы перемещений и распределения относительных интенсивностей напряжений при колебаниях рабочего колеса с 5 узловыми диаметрами. При колебаниях с узловыми диаметрами происходит большая деформация связей и, соответственно, возникают большие напряжения на связях, хотя они не превышают напряжения вблизи корневых сечений.

Для колес с монокристаллическими лопатками формы перемещений практически не претерпевают изменений. Распределение интенсивностей напряжений по лопаткам изменяется. При ориентации [001] лопатки, как известно, становятся более жесткими на кручение, поэтому происходит относительное увеличение интенсивностей напряжений на полочных связях и периферийной части лопаток под полками. При ориентации [111] лопатки становятся менее жесткими на кручение. При этом относительное увеличение интенсивностей напряжений на полочных связях проявляется меньше, но в периферийной части под полками напряжения возрастает сильнее.

Выводы

Анализ форм колебаний и распределения относительных интенсивностей напряжений показывает, что наибольшие изменения возникают при сопоставлении форм колебаний рабочих колес со сплошной бандажной связью и разрезной бандажной связью за

счет взаимного перемещения полок. Наименьшие изменения претерпевают формы зонтичных колебаний, так как при этих формах колебаний связи испытывают меньшие деформации, чем при формах колебаний с узловыми диаметрами.

За счет взаимного перемещения контактирующих поверхностей полочных связей существенно уменьшаются относительные напряжения в связях и периферийных частях лопаток.

Формы колебаний лопаток становятся ближе к преимущественно крутильным. Поэтому наибольшие относительные напряжения наблюдаются как на входной, так и выходной кромках лопаток вблизи корневых сечений.

Материал лопаток влияет на характеристики системы с взаимным перемещением полок несколько иначе, чем для системы со сплошной бандажной связью. Материал с КГО [001] оказывает большее влияние на частоты преимущественно крутильных колебаний, а материал с КГО [111] – на частоты преимущественно изгибных колебаний.

В результате исследований показано, что при прокатывании полок спектр собственных частот рабочего колеса существенно изменяется. Собственные частоты снижаются и возникают зоны их сгущения. Это происходит за счет изменения форм колебаний системы, которая становится менее жесткой, приобретая новые степени свободы.

Литература

1. Воробьев Ю. С. Материалы и прочность оборудования [Текст] / В.М. Боровков, Л.Б. Гецов, Ю.С. Воробьев и др. // СПб: СПбГПУ, – 2008. – 612 с.
2. Шалин Р.Е. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов [Текст] / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов и др. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
3. Качанов, Е.Б. Состояние и перспективы развития работ по жаропрочным сплавам для лопаток турбин [Текст] / Е.Б.Качанов // Технология лёгких сплавов. – 2005. – №1-4. – С. 10-18
4. Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования [Текст]: сб. науч. тр. / под ред. Ю.К. Петерни, Л.Б.Гецова. – СПб, 2009. – Вып. 296. – С. 282-306.
5. Численный анализ локализации напряжений в облопачивании турбомашин [Текст] / Ю. С. Воробьев, С. Янецки, Е. В. Тишковец, М. А. Стороженко // Вибрации в технике и технологиях. – 2004. – №6(38) – С. 65–68.
6. Воробьев, Ю.С. Совместные колебания ротора ГТД с лопаточным аппаратом / Ю.С. Воробьев, К.Ю. Дьяконенко // Надійність і довговічність машин і споруд. – 2006. – Вип. 26. – С. 45–51.
7. Анализ колебаний рабочего колеса ГТД с монокристаллическими неохлаждаемыми лопатками / Ю.С. Воробьев, М.А. Чугай, С.Б. Кулишов, А.Н. Скрицкий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 3/2 (45). – С. 48–50.