

УДК 539.3:621

**Ю.С. ВОРОБЬЕВ¹, М.А. ЧУГАЙ¹, В.Н. РОМАНЕНКО¹, С.Б. КУЛИШОВ²,
А.Н. СКРИЦКИЙ²**¹*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков*
²*ГП НПКГ "Зоря" – "Машипроект", Николаев, Украина*

АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОЧНОГО АППАРАТА ГТД С МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ЛОПАТКАМИ

Работа посвящена численному анализу колебаний монокристаллических лопаток, используемых в современных газотурбинных двигателях. Рассматриваются особенности локализации вибрационных напряжений в монокристаллических охлаждаемых и неохлаждаемых лопатках газотурбинных двигателей. Анализируется влияние ориентации кристаллографических осей материала и типа бандажных связей на спектр собственных частот, формы и распределение интенсивностей напряжений при колебаниях рабочих колес газовой турбины с монокристаллическими лопатками. Обобщаются результаты предыдущих исследований.

Ключевые слова: монокристаллический материал, кристаллографические оси, интенсивность напряжений, бандаж, лопатки, рабочие колеса.

Введение

Монокристаллические жаропрочные сплавы широко используются в современных газовых турбинах. Если для первой ступени обычно используются охлаждаемые лопатки с аксиальной кристаллографической ориентацией осей (КГО) [001], то для последующих ступеней выбор КГО зависит от ряда факторов: геометрии лопаток, температурных полей, условий контакта в межлопаточных связях, влияния центробежных сил и др. [1 – 3]. Предварительные исследования показывают, что наиболее приемлемыми аксиальными КГО для неохлаждаемых лопаток являются [001] и [111]. Поэтому производился комплекс численных исследований колебаний охлаждаемых лопаток с аксиальной КГО [001] и рабочих колес с неохлаждаемыми лопатками, имеющими аксиальные КГО [001] и [111]. В процессе исследований колебаний рабочих колес анализировалось также влияние натяга в контактирующих поверхностях полочных связей на спектр частот, формы колебаний и распределение относительных интенсивностей напряжений.

1. Анализ колебаний охлаждаемых лопаток

Численный анализ влияния ориентации кристаллографических осей и их отклонения от радиального направления и от направлений главных осей инерции лопатки на ее собственные частоты позволяет дать рекомендации по ограничению технологи-

ческого разброса КГО материала лопаток [2, 3].

Большое значение для охлаждаемых лопаток со сложной системой внутренних каналов имеет локализация вибрационных напряжений. Результаты исследований показывают, что наибольший уровень локализации вибрационных напряжений следует ожидать на поверхности охлаждаемых каналов, что имеет большое значение [1]. На рис.1 приведены поля интенсивностей напряжений при колебаниях монокристаллической лопатки с системой каналов в виде вихревой матрицы, что подтверждает указанное явление. Видна локализация напряжений на поверхности охлаждаемых каналов.

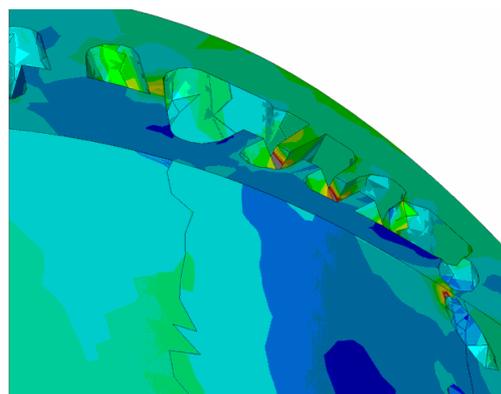


Рис. 1. Концентрация напряжений в охлаждающих каналах на пятой форме колебаний лопатки

2. Анализ колебаний рабочих колес

При колебаниях рабочего колеса с разрезной полочной связью происходит взаимное перемещение

контактирующих поверхностей полков. Условия контакта полков включают ограничения на взаимное проникновение контактирующих поверхностей. Кроме того следует учесть, что существует натяг полков, как за счет монтажного натяга, так и за счет раскрутки лопаток под действием центробежных сил.

Поэтому вначале проводится расчет статической деформации лопатки под действием центробежных сил и под действием сил на контактных поверхностях полков. Этот расчет позволяет найти силу прижатия полков (натяг) во вращающемся колесе.

Моделирование сил сопротивления за счет трения при проскальзывании полков производилось посредством введения линейных связей, действующих в плоскости скольжения полков и связывающих противоположные полки.

Жесткость этих связей была получена из соотношения равенства работы сил трения и работы деформации введенных упругих связей на взаимных перемещениях полков.

При анализе спектра частот рабочего колеса с бандажными связями в заданном диапазоне частот следует учесть, что на его формирование оказывают влияние лишь несколько первых частот единичной лопатки. Влияние материала лопаток на собственные частоты системы зависит от вида бандажной связи. Для рабочего колеса со сплошной связью переход от поликристаллического материала к монокристаллическому приводит к повышению собственных частот: для КГО [001] на 3-6% для зонтичных колебаний и на 2,5-21% для колебаний с узловыми диаметрами; для КГО [111] на 10-25% для зонтичных колебаний и на 8-38% для колебаний с узловыми диаметрами [4, 5].

На рис. 2, 3 для примера приведены формы перемещений и интенсивностей напряжения при колебаниях с пятью узловыми диаметрами рабочего колеса с лопатками из разных материалов с разными типами бандажной связи.

Анализируя результаты исследований можно отметить, что по сравнению с собственными частотами рабочего колеса со сплошной бандажной связью собственные частоты с разрезной связью существенно снижаются, но как отмечалось, повышаются при переходе к монокристаллическому материалу. Для конкретного рабочего колеса с разрезной связью соответствующие повышения частот при переходе от поликристаллического материала лопаток к монокристаллическому будут иметь значения:

- для КГО [001] на 2-2,2% для зонтичных колебаний и на 2,2-11,5% для колебаний с узловыми диаметрами;

- для КГО [111] на 16-17% для зонтичных колебаний и на 17-33% для колебаний с узловыми диаметрами.

При натяге влияние сопротивления взаимному перемещению полков на собственные частоты оказывается достаточно малым, но сказывается на распределении интенсивностей напряжений.

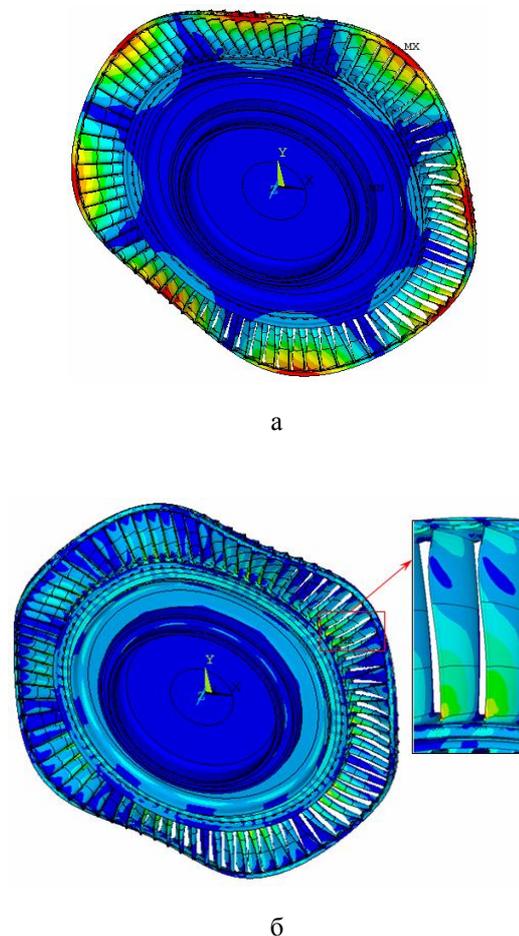


Рис. 2. Формы перемещений (а) и интенсивностей напряжений (б) при колебаниях колеса с поликристаллическими лопатками со сплошной бандажной связью с 5-ю узловыми диаметрами (1465 Гц)

Анализ форм колебаний и распределения относительных интенсивностей напряжений показывает, что наибольшие изменения возникают при сопоставлении форм колебаний рабочих колес со сплошной бандажной связью (рис. 2, 3, а, б) и разрезной бандажной связью (рис. 3, в, г) за счет взаимного перемещения полков.

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.

Заключение

Можно отметить, что изменение материала лопаток оказывает наибольшее влияние на собственные частоты колебаний с формами, при которых происходят наибольшие относительные деформации лопаток. При зонтичных колебаниях лопатки совершают преимущественно синфазные изгибные колебания. При колебаниях с узловыми диаметрами лопатки вблизи узловых линий совершают изгибно-крутильные и крутильные колебания, и доля этих лопаток растет с увеличением числа узловых диаметров. Относительные деформации лопаток и связей при этом растут, что ведет к соответствующим изменениям собственных частот колебаний системы.

За счет взаимного перемещения полочных связей собственные частоты системы снижаются, а спектр частот сгущается. Влияние сопротивления взаимному перемещению полок при заданном натяге оказывает слабое влияние на спектр собственных частот системы [1, 4]. Для рассматриваемого колеса с поликристаллическими лопатками за счет проскальзывания связей происходит снижение собственных частот зонтичных колебаний на 8-10%, а для колебаний с узловыми диаметрами на 15-60%. Для колеса с монокристаллическими лопатками с КГО [001] соответствующее снижение частот составляет 11-12% для зонтичных колебаний и на 15-63% для форм с узловыми диаметрами.

Для колеса с монокристаллическими лопатками с ориентацией КГО [111] соответствующее снижение частот составляет 5-12% для зонтичных колебаний и на 7,5-60% для форм с узловыми диаметрами.

Сгущение спектра собственных частот для систем с разрезной связью может быть использовано для отстройки системы от резонансных режимов [1].

Формы перемещений мало зависят от материала лопаток и существенно от вида бандажной связи (сплошная или разрезная). Вид связи меньше влияет на формы зонтичных колебаний и больше на формы с узловыми диаметрами, это влияние увеличивается с ростом числа узловых диаметров. Распределение относительных интенсивностей напряжений заметно меняется при переходе от сплошной связи к разрезной. При этом снижаются относительные напряжения в связях и периферийной части лопаток и увеличиваются вблизи корневых сечений.

Литература

1. Воробьев Ю.С. Анализ локализации напряжений при колебаниях лопаточного аппарата турбомашин / Ю.С. Воробьев, К.Ю. Дьяконенко, В.Н. Романенко, М.А. Чугай // Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования: Сбор-

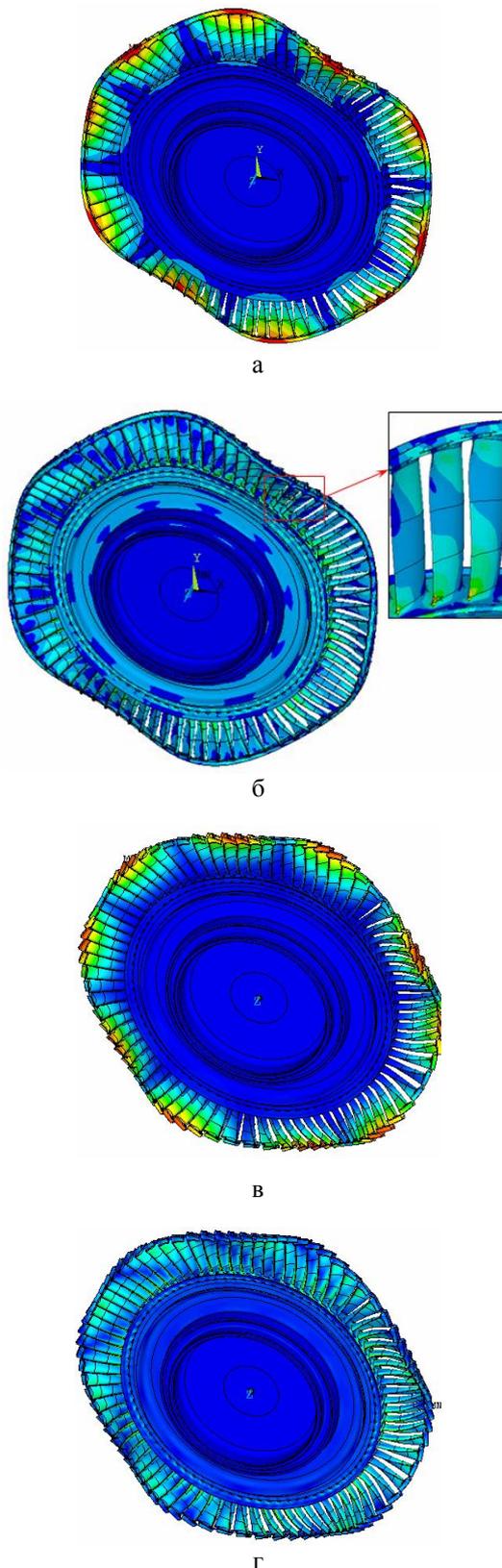


Рис. 3. Формы перемещений (а, в) и интенсивностей напряжений (б, г) при колебаниях колеса с монокристаллическими лопатками с КГО [001] с 5-ю узловыми диаметрами с частотой 1570 Гц при сплошной (а, б) и 970 Гц при разрезной (в, г) бандажной связи (проскальзывание с сопротивлением)

ник научных трудов; под ред. д.ф.-м.н., проф. Ю.К. Петерни, д.т.н. Л.Б. Гецова. – СПб, 2009. – Вып. 296. – С. 282-306.

2. Придорожный Р.П. Особенности влияния кристаллографической ориентации на усталостную прочность монокристаллических рабочих лопаток турбин / Р.П. Придорожный, А.В. Шереметьев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 10(26). – С. 55-59.

3. Мельникова Г.В. Влияние кристаллографической ориентации монокристалла и ее технологического разброса на частотный спектр турбинных лопаток / Г.В. Мельникова, Б.Ф. Шорр // *Авиационно-*

но-космическая техника и технология. – 2001. – № 26. – С. 140-144.

4. Воробьев Ю.С. Математическое моделирование колебаний рабочего колеса ГТД с использованием новых материалов / Ю.С. Воробьев, М.А. Чугай // *Восточно-европейский журнал передовых технологий. Пробл. прочности*. – 2011. – №3/10(51). – С. 49-52.

5. Анализ колебаний лопаток турбомашин с учетом неоднородности материала / Ю.С. Воробьев, К.Ю. Дьяконенко, С.Б. Кулишов, А.Н. Скрицкий // *Надежность и долговечность машин и сооружений*. – 2008. – №30. – С. 41-47.

Поступила в редакцию 30.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., ведущий научный сотрудник Б.Ф. Зайцев, Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков.

АНАЛІЗ КОЛИВАНЬ ЛОПАТКОВОГО АППАРАТУ ГТД З МОНОКРИСТАЛІЧНИМИ ЛОПАТКАМИ

Ю.С. Воробйов, М.О. Чугай, В.М. Романенко, С.Б. Кулішов, О.М. Скрицький

Робота присвячена чисельному аналізу коливань монокристалічних лопаток, які використовуються в сучасних газотурбінних двигунах. Розглянуто особливості локалізації вібраційних напружень в монокристалічних охолоджуваних та неохолоджуваних лопатках газотурбінних двигунів. Аналізується вплив орієнтації кристаллографічних осей матеріалу та типу бандажних зв'язків на спектр власних частот, форм та розподіл інтенсивностей напружень при коливаннях робочих коліс газової турбіни з монокристалічними лопатками. Узагальнюються результати попередніх досліджень.

Ключові слова: монокристалічний матеріал, кристаллографічні осі, інтенсивність напружень, бандаж, лопатки, робочі колеса.

ANALYSIS OF VIBRATIONS OF GAS-TURBINE BLADING WITH ONE SINGLE-CRYSTAL BLADES

Yu.S. Vorobyov, M.A. Chugay, V.N. Romanenko, S.B. Kulishov, A.N. Skritskij

The paper is devoted to numerical analysis of vibrations of single-crystal blades, used in modern turbo-engine. Peculiarity of vibrations stress localization of one single-crystal cooled and un-cooled gas-turbine blades are considered. Influence crystallography axes orientation of material and type of should on the spectrum of natural frequencies, forms and distribution of stress intensities for vibrations of gas turbine wheels with single-crystal blades is analyzed. The results of the previous investigations are summarized.

Key words: single-crystal material, crystallography axes orientation, stress intensity, shroud, blade, wheels.

Воробьев Юрий Сергеевич – д-р техн. наук, проф., зав. отделом нестационарных механических процессов Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua.

Чугай Марина Александровна – канд. техн. наук, научный сотрудник отдела нестационарных механических процессов Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua.

Романенко Валентина Николаевна – ведущий инженер отдела нестационарных механических процессов Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua.

Кулишов Сергей Борисович – начальник отдела, ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина, e-mail: spe@machproekt.nikolaev.ua.

Скрицкий Александр Николаевич – ведущий инженер-конструктор, ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина, e-mail: spe@machproekt.nikolaev.ua.