

УДК 539.3

Ю.С. Воробьев¹, М.А. Чугай¹, С.Б. Кулишов², А.Н. Скрицкий²¹Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины²ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Украина

ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ НА КОЛЕБАНИЯ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ГТД С МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ НЕОХЛАЖДАЕМЫМИ ЛОПАТКАМИ

Разработана методика и 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. Приведены результаты численного анализа колебаний рабочего колеса со сплошной и разрезной бандажной связью с учетом влияния ориентации кристаллографических осей [001] и [111] на собственные частоты, формы колебаний и распределение относительных напряжений. Проведено сопоставление спектра собственных колебаний, форм и распределение напряжений в рабочих колесах для поликристаллических и монокристаллических лопаток с кристаллографической ориентацией [001] и [111].

Рабочее колесо, монокристаллический материал, кристаллографическая ориентация, бандаж, спектр частот, формы перемещений и напряжений

Введение

Повышение эффективности ГТД связано с ростом максимальной температуры газа. Поэтому, как для первой ступени газовой турбины, так и для последующих, используются монокристаллические жаропрочные сплавы, обладающие высокими жаропрочными свойствами [1-5]. НДС таких лопаток как при статических нагрузках, так и, особенно, при колебаниях существенно зависит от кристаллографической ориентации (КГО) материала. Выбор КГО материала связан с учетом ряда факторов, зависящих от геометрии лопатки, температурных полей, влияния центробежных сил и форм колебаний лопаток [2, 3], что приводит к актуальности исследований в этой области.

1. Постановка задачи

Объектом исследования является бандажированное рабочее колесо газовой турбины, имеющее 80 монокристаллических неохлаждаемых лопаток. Венец лопаток имеет разрезную бандажную связь из цельнофрезерованных полок, которые имеют предварительный натяг и могут совершать взаимные перемещения при колебаниях.

Важной особенностью построения данной циклосимметричной модели является разбиение на сектора с помощью криволинейных поверхностей, учитывающих угол установки лопатки и заводки ее замка в паз, а также условия взаимного перемещения полок (рис. 1).

При этом контактные поверхности будут лежать внутри сектора и могут быть заданы условия про-

скальзывания полок, причем они могут варьироваться независимо от условий циклосимметрии.

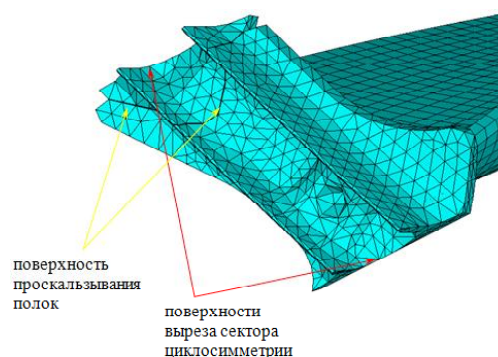


Рис. 1. Вид сектора со стороны бандажной полки — обеспечение условий циклосимметрии при проскальзывании

2. Численный анализ

Были проведены детальные исследования собственных частот, форм колебаний и распределения относительных напряжений для рабочего колеса с лопатками из поликристаллического и монокристаллического материала с азимутальными КГО [001] и [111]. Рассмотрены варианты для сплошной бандажной связи и при взаимном перемещении контактных поверхностей полок, как с сопротивлением, так и без сопротивления.

При колебаниях рабочего колеса с разрезной полочной связью происходит взаимное перемещение контактирующих поверхностей полок. Поэтому вначале проводится расчет статической де-

формации лопатки под действием центробежных сил и под действием сил на контактных поверхностях полков. Этот расчет позволяет найти силу прижатия полков (натяг) во вращающемся колесе [5].

Анализ влияния взаимного перемещения полков 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.

Собственные частоты рабочего колеса с поликристаллическими лопатками для зонтичных форм колебаний снижаются на 8-10%, так как при таких формах колебаний связь деформируется относительно слабо. Для форм с узловыми диаметрами собственные частоты снижаются от 15% (для формы с 1 узловым диаметром) до 50% для формы с 10 узловыми диаметрами. Далее снижение частот происходит до 60% для форм с 20 узловыми диаметрами.

Для рабочих колес с монокристаллическими лопатками с КГО [001] падение частот за счет разрезной связи без сопротивления составляет для зонтичных форм колебаний 11-12%, а для форм с узловыми диаметрами 15-63%.

Для рабочих колес с монокристаллическими лопатками с КГО [111] снижение частот за счет разрезной связи составляет 5-12% для зонтичных форм колебаний и 7,5-60%, для форм с узловыми диаметрами.

Здесь также сказывается повышение крутильной жесткости монокристаллических лопаток с КГО [001] и снижение крутильной жесткости лопаток с ориентацией [111], хотя проявляются эти различия на снижении частот за счет разрезных связей довольно слабо.

На основании результатов расчетов построены графики (рис. 2), показывающие изменение спектра частот рабочих колес с лопатками из

разных материалов. На рис. 2 в качестве примера показано изменение спектра частот колеса с монокристаллическими лопатками с КГО [111]. Графики показывают не только снижение собственных частот, но и сгущение спектра частот. Этот факт оказывается весьма важным при отстройке от опасных резонансных режимов.

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.

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 полков.

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 полков несколько иначе, чем для системы со сплошной бандажной связью.

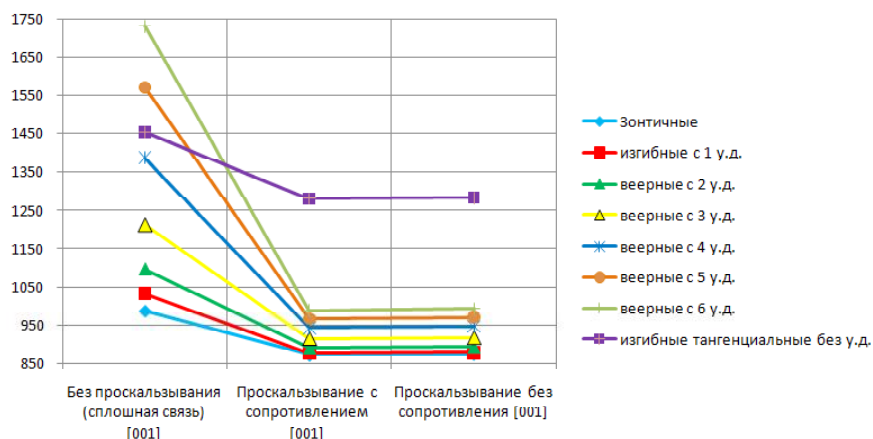


Рис. 2. Сравнение частот нижней части спектра колебаний рабочего колеса при идентичных формах, монокристаллическая ориентация лопаток [001] в зависимости от типа связи

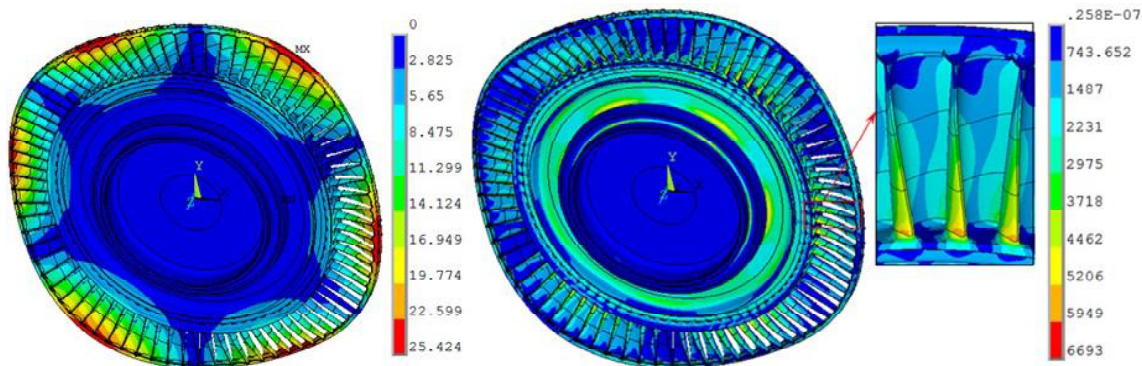


Рис. 3. Форма перемещений (а) и поля интенсивностей напряжений (б) при колебаниях с 3-мя узловыми диаметрами, 1166 Гц

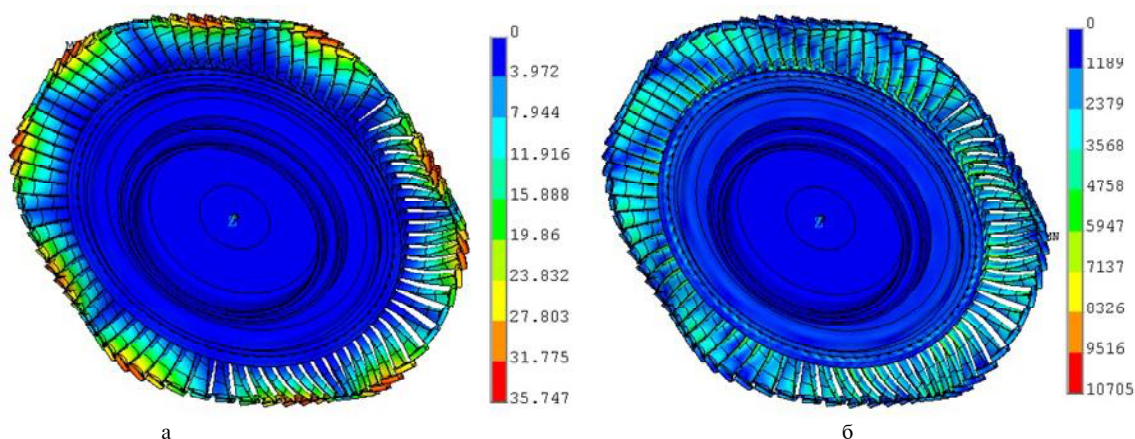


Рис. 4. Форма перемещений (а) и поля интенсивностей напряжений (б) при колебаниях с 5-ю узловыми диаметрами, 970,5 Гц (монокристаллическая лопатка с КГО [001], проскальзывание с сопротивлением)

При переходе от поликристаллического материала лопаток к монокристаллическому с ориентацией [001] для зонтичных колебаний собственные частоты возрастают на 2-2,2%, а при колебаниях с узловыми диаметрами на 2,2-11,5%. Это влияние заметно ниже, чем для системы со сплошной бандажной связью.

3. Выводы

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. Переход от поликристаллического материала к монокристаллическому для рабочего колеса со сплошной связью приводит к повышению собственных частот.

Сгущение спектра собственных частот для системы с разрезной связью может быть использовано при отстройке системы от резонансных режимов.

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.

Натяг полок слабо влияет на формы перемещений и напряжений. 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.

Для данного рабочего колеса наибольшие относительные напряжения наблюдаются в большинстве случаев на входной кромке лопаток вблизи корневого сечения для низших форм и периферийной части лопаток для высших форм. При ориентации КГО лопаток [001] формы колебаний лопаток становятся преимущественно крутильными, а наибольшие относительные напряжения наблюдаются как на входной, так и выходной кромках лопаток. При ориентации [111] формы колебаний лопаток ближе к изгибным.

КГО лопаток [111] обеспечивает более высокие собственные частоты рабочего колеса по срав-

нению с ориентацией КГО [001]. Выбор основной КГО материала лопаток следует производить с учетом всех факторов для разрабатываемой конструкции.

Перечень ссылок

1. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. и др. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
2. Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования. Сб. научных трудов. Под ред. д.ф.-м.н., проф. Петерни Ю.К., д.т.н. Гецова Л.Б. 3. СПб, 2009. – Вып. 296. – С. 74-82, 282-306.
4. Придорожный Р.П., Шереметьев А.В. Особенности влияния кристаллографической ориентации на усталостную прочность монокристал-

лических рабочих лопаток турбин // Авиационно-космическая техника и технология, 2005, №10(26). – С.55-59.

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

6. Воробьев Ю.С., Дьяконенко К.Ю., Кулишов С.Б., Скрицкий А.Н. Анализ локализации напряжений при колебаниях рабочих колес и охлаждаемых лопаток ГТД. // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – №35 – С. 29-43.

Поступила в редакцию 30.05.2010 г.

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

INFLUENCE OF CRYSTALLOGRAPHY ORIENTATION ON VIBRATIONS OF GAS-TURBINE WHEEL WITH THE SINGLE-CRYSTAL UNCOOLED BLADES

Розроблена методика і проведений аналіз впливу орієнтації кристаллографічних осей і типу бандажних зв'язків на спектр власних частот, форм і розподіл відносної напруги на коливання робочого колеса ГТД з монокристалічними неохолоджуваними лопатками. Наведено результати чисельного аналізу коливань робочого колеса з суцільним та розрізним бандажним зв'язком з урахуванням впливу орієнтації кристаллографічних осей [001] і [111] на власні частоти, форми коливань і розподіл відносних напружень. Проведено зіставлення спектру власних коливань, форм і розподілу напружень для полікристалічних і монокристалічних лопаток з кристаллографічною орієнтацією [001] і [111].

Робоче колесо, монокристалічний матеріал, кристаллографічна орієнтація, бандаж, спектр частот, форми переміщень і напружень

A method is developed and the 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. The results of numerical analysis of vibrations of gas-turbine wheel are resulted with a integral and cutting shroud taking into account influence of orientation of crystallography axes [001] and [111] on natural frequencies, forms of vibrations and distributing of stress intensity. Comparison of spectrum of natural vibrations is conducted, forms and distributing of stress intensity for polycrystal and single-crystal blades with a crystallography orientation [001] and [111].

Gas-turbine wheel, single-crystal material, crystallography orientation, shroud, spectrum of natural frequencies, mode of displacements and stress