

УДК 539.3

АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ГТД С МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ НЕОХЛАЖДАЕМЫМИ ЛОПАТКАМИ

Ю.С. Воробьев

Доктор технических наук, профессор, заведующий отделом*
 Контактный тел.: (0572) 94-15-24, 95-95-95
 E-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua

М.А. Чугай

Кандидат технических наук, младший научный сотрудник*
 Контактный тел.: (0572) 94-15-24
 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

С.Б. Кулишов

Начальник отдела**

А.Н. Скрицкий

Ведущий инженер-конструктор**
 **ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект»
 пр. Октябрьский, 42а, г. Николаев, Украина
 Контактный тел.: (0512) 49-742-1
 E-mail: spe@machproekt.nikolaev.ua

Наведено результати чисельного аналізу коливань робочого колеса з розрізним бандажним зв'язком з урахуванням орієнтації кристаллографічних осей [001] і [111] на власні частоти, форми коливань та розподіл відносних напружень

Ключові слова: робоче колесо, монокристаллический матеріал, кристаллографічна орієнтація, бандаж

Приведены результаты численного анализа колебаний рабочего колеса с разрезной бандажной связью с учетом влияния ориентации кристаллографических осей [001] и [111] на собственные частоты, формы колебаний и распределение относительных напряжений

Ключевые слова: рабочее колесо, монокристаллический материал, кристаллографическая ориентация, бандаж

Vibration of shroud wheel with single crystal structured blades without cooling is investigated. Influence of crystallography orientation on vibrations characteristics of the system is estimated

Key words: blading wheel, single crystal material, crystallography orientation, bandage

1. Введение

Повышение эффективности современных 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.

2. Постановка задачи и результаты исследования

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 цикло-симметричной 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 - 2). При этом контактные поверхности будут лежать внутри сектора и могут быть заданы условия про-

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

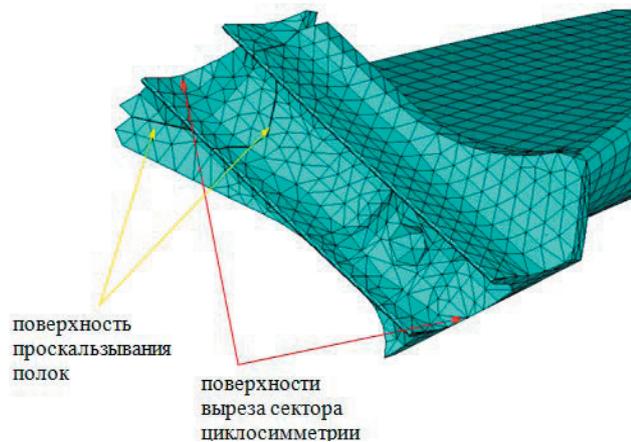


Рис. 1. Вид сектора со стороны бандажной полки - обеспечение условий циклосимметрии при проскальзывании

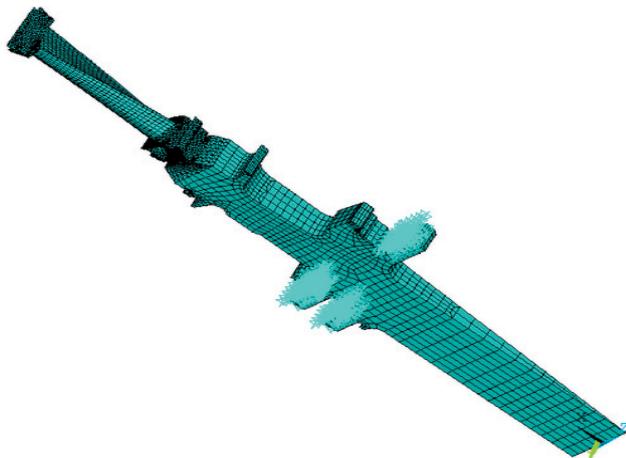


Рис. 2. Конечноэлементная модель сектора рабочего колеса

Были проведены детальные исследования собственных частот, форм колебаний и распределения относительных напряжений для рабочего колеса с лопатками из поликристаллического материала 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 деформации лопатки под действием центробежных сил и под действием сил на контактных поверхностях полок. Этот расчет позволяет найти силу прижатия полок (натяг) во вращающемся колесе [5].

В табл. 1 представлены результаты анализа влияния взаимного перемещения полок без сопротивления и материала лопаток на собственные частоты рабочего колеса. По сравнению с собственными частотами рабочего колеса со сплошной бандажной связью соб-

ственные частоты с разрезной связью существенно снижаются.

Таблица 1

Влияние взаимного перемещения полок и материала лопатки на вибрационные характеристики систем

№ пп	Поликристаллические лопатки		Монокристаллические лопатки с различной ориентацией КГО				Кол-во узловых диаметров
	Сплошная связь	Проскальзывание	[001]		[111]		
			Сплошная связь	Проскальзывание	Сплошная связь	Проскальзывание	
1	954,96	853,96	987,13	872,14	1054,9	1002,8	0
2	1005,7	856,85	1032	876,2	1086,8	1005,7	1
3	1067,0	866,6	1097	890	1143,8	1031,8	2
4	1165,6	885,6	1213	915,45	1277,8	1089,8	3
5	1312,1	906,46	1386,9	943,11	1505,4	1152,7	4
6	1464,7	923,2	1570,3	966,76	1768,7	1193,8	5
7	1595	937,03	1730,2	988,27	2008,6	1220,2	6
8	1707	950,3	1871,2	1010	2213,5	1241,3	7
9	1813,8	964,52	2008,1	1034	2398,3	1261,7	8
10	1925,6	980,47	2152,7	1060	2579,3	1283,5	9

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. 3), показывающие изменение спектра частот рабочих колес с лопатками из разных материалов. На рис. 3 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. 4 - 5 представлены формы колебаний рабочего колеса с разрезной связью. 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.

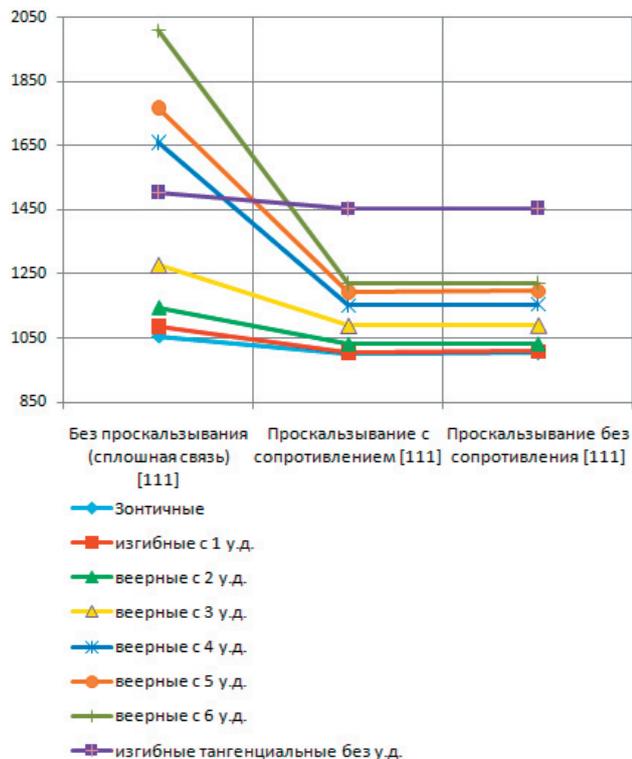


Рис. 3. Сравнение частот нижней части спектра колебаний рабочего колеса при идентичных формах, монокристаллическая ориентация лопаток [111] в зависимости от типа связи

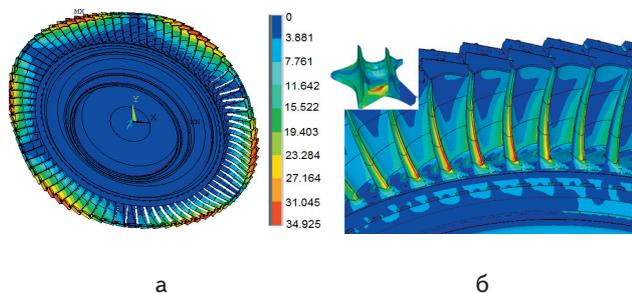


Рис. 4. Форма перемещений (а) и поля интенсивностей напряжений (б) рабочего колеса при колебаниях 3-мя узловыми диаметрами, 886 Гц (поликристаллическая лопатка, проскальзывание без сопротивления)

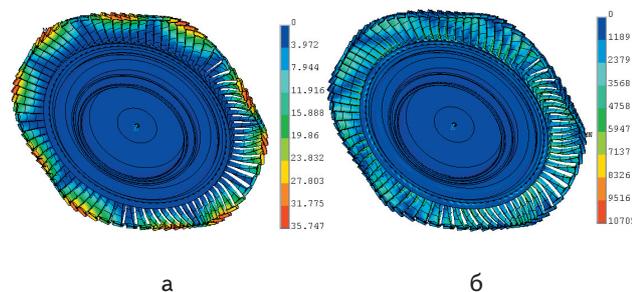


Рис. 5. Форма перемещений (а) и поля интенсивностей напряжений (б) при колебаниях с 5-ю узловыми диаметрами, 970,5 Гц, (монокристаллическая лопатка с КГО [001], проскальзывание с сопротивлением)

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. 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.

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.

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

Литература

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. – СПб, 2009. – Вып. 296. – С. 74-82, 282-306.

У статті представлені прогресивні режими круглого зовнішнього шліфування важкооброблюваних матеріалів, які розроблені з урахуванням критеріїв прояву адсорбційно-пластифікуючого ефекту. Обробка ВОМ різних груп на цих режимах забезпечує підвищення продуктивності, відсутність шліфувальних дефектів та формування зміцненого шару

Ключові слова: режими різання, кругле шліфування, важкооброблювані матеріали

В статье представлены прогрессивные режимы круглого наружного шлифования труднообрабатываемых материалов, разработанные с учетом критериев проявления адсорбционно-пластифицирующего эффекта. Обработка ТОМ различных групп на этих режимах обеспечивает повышение производительности, отсутствие шлифовочных дефектов и формирование упрочненного слоя

Ключевые слова: режимы резания, круглое шлифование, труднообрабатываемые материалы

The article presents the cutting condition of cylindrical grinding of hard-to-machining materials tailored to the criteria of manifestation of the adsorption-plasticizing effect. The processing hard-to-machining materials different groups in these cutting condition provide improved performance, guaranteed lack of grinding defects and the formation of the hardened layer

Key words: cutting condition, cylindrical grinding, hard-to-machining materials

Современное развитие энергетического машиностроения идет по пути повышения удельных параметров рабочих процессов, что неотъемлемо связано с одной стороны с усовершенствованием конструкций энергомашин, а с другой – обуславливает применение специальных высокопрочных материалов, механическая обработка которых традиционными методами

3. Придорожный Р.П., Шереметьев А.В. Особенности влияния кристалло-графической ориентации на усталостную прочность монокристаллических рабочих лопаток турбин // Авиационно-космическая техника и технология, 2005, №10(26). – С.55-59.
4. 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.
5. 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.

УДК 621.923

РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ ТРУДНО-ОБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.В. Сурду

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник*
E-mail: surdu@ipmach.kharkov.ua

А.В. Телегин

Кандидат технических наук, младший научный сотрудник*
E-mail: telegin@ipmach.kharkov.ua

*Отдел общетехнических исследований в энергетике
Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН
Украины
ул. Дм. Пожарского 2/10, г. Харьков, Украина

затруднена. Это создает необходимость применения новых технологических процессов резания и режущих инструментов. Следует также отметить, что в последние годы у машиностроительных предприятий существенно расширился доступ к широкой номенклатуре новых режущих инструментов и режущих материалов, чаще всего зарубежного производства, что способ-