

УДК 539.3

М.А. Чугай

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков

АНАЛИЗ СПЕКТРА СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ГТД С МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ НЕОХЛАЖДАЕМЫМИ ЛОПАТКАМИ

В работе проведен анализ влияния ориентации кристаллографических осей и типа бандажных связей на спектр собственных частот, форм и распределение относительных напряжений. Разработана трехмерная конечноэлементная модель рабочего колеса, учитывающая геометрическую форму объекта, вид бандажных связей и ориентацию кристаллографических осей. Проведен численный анализ влияния поликристаллического и монокристаллического материала лопаток с ориентацией кристаллографических осей $[001]$ и $[111]$ на собственные частоты, формы колебаний и распределение относительных напряжений рабочего колеса со сплошной и разрезной бандажными связями.

Ключевые слова: рабочие лопатки, монокристаллический материал, кристаллографическая ориентация, метод конечных элементов, формы колебаний, локализация напряжений, спектр частот.

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 – 7]. НДС таких лопаток как при статических нагрузках, так и, особенно, при колебаниях существенно зависит от кристаллографической ориентации материала. Выбор кристаллографической ориентации материала связан с учетом ряда факторов, зависящих от геометрии лопатки, температурных полей, влияния центробежных сил и форм колебаний лопаток [3 – 7].

Целью работы является разработка методики и анализ влияния ориентации кристаллографических осей и типа бандажных связей на спектр собственных частот, форм и распределение относительных напряжений в бандажированном рабочем колесе газовой турбины с неохлаждаемыми монокристаллическими лопатками с двумя вариантами КГО вдоль оси z $[001]$ и $[111]$.

Постановка задачи. Рассматривается неохлаждаемая лопатка ГТД из монокристаллического никелевого жаропрочного сплава. Проведен численный анализ влияния поликристаллического и монокристаллического материала лопаток с КГО $[001]$ и $[111]$ на собственные частоты, формы колебаний и распределение относительных напряжений. Эти два направления ориентации кристаллографических осей являются наиболее предпочтительными для лопаток из монокристаллического материала, в том числе и неохлаждаемых. Структура монокристаллического сплава рассматриваемой лопатки представляет собой гранцентрированную кубическую решетку [2]. Схематически ее структура с обозначением основных направлений КГО представлена на рис. 1.

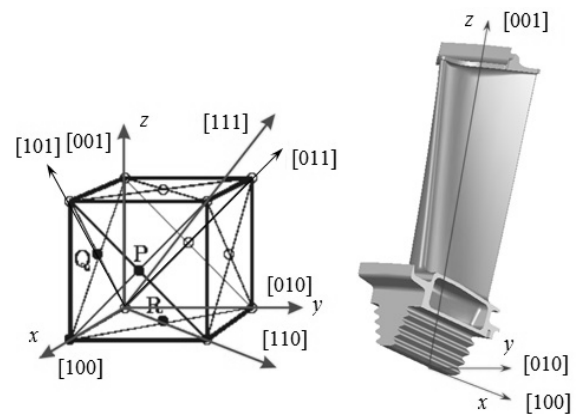


Рис. 1. Структура монокристалла, геометрия лопатки и схема расположения осей КГО $[100]$, $[010]$, $[001]$ при совпадении с осями x , y , z

Основной раздел

Лопатка рассматривается в прямоугольной системе координат x , y , z . Ось z направлена по радиусу от оси вращения колеса. При совпадении оси КГО $[111]$ с осью z , оси x и y не совпадают с кристаллографическими осями.

Геометрическая форма лопатки и расположение кристаллографических осей $[100]$, $[010]$, $[001]$ при их совпадении с осями x , y , z также представлено на рис. 1, 2.

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. Для построения конечноэлементных (КЭ) моделей лопаток в работе использовался изопараметрический 20-узловой конечный элемент в криволинейной системе координат, учитывающий неоднородность монокристаллического материала.

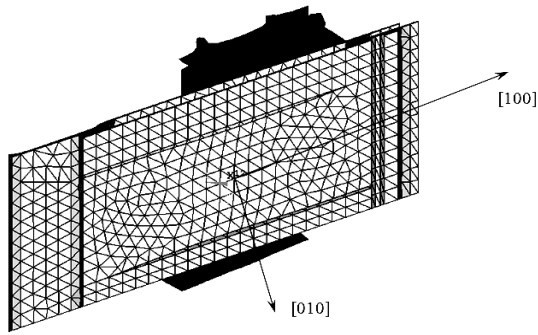


Рис. 2. Вид расположения осей КГО [100], [010] со стороны полки в корневом сечении при совпадении с осями x, y

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.

Трехмерная КЭ модель рабочего колеса была построена на основе моделей лопаток и диска. Она учитывает особенности геометрической формы всех элементов объекта, свойства материала лопаток и диска, влияние вращения и температурных полей, а также особенности контакта полочных связей при колебаниях. 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 полок (рис. 3 – 5).

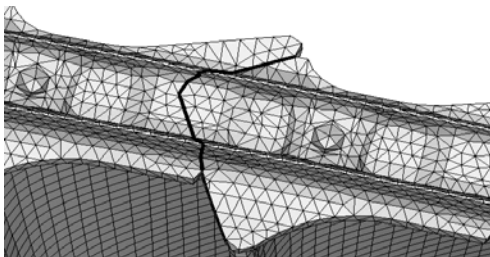


Рис. 3. Область стыковки двух бандажных полок

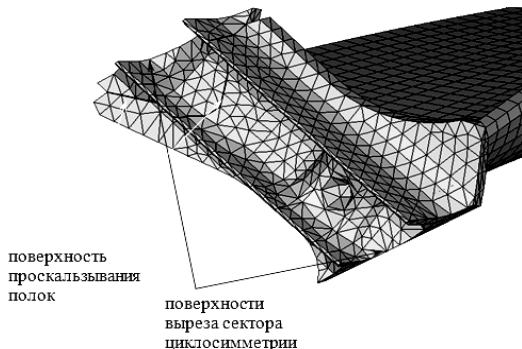


Рис. 4. Вид сектора со стороны бандажной полки – обеспечение условий циклосимметрии при проскальзывании

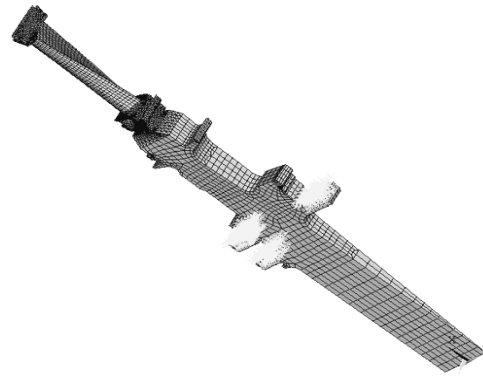


Рис. 5. КЭ модель сектора рабочего колеса

При этом контактные поверхности будут лежать внутри сектора и могут быть заданы условия проскальзывания полок, причем они могут варьироваться независимо от условий циклосимметрии.

Анализ колебаний единичных лопаток

Перед анализом колебаний рабочего колеса был проведен анализ влияния типа материала и КГО для единичных лопаток. Он позволил выявить влияние объединения лопаток в систему.

Результаты расчетов, показывающих влияние материала лопаток на спектр собственных частот, представлены в табл. 1. Видно, что использование монокристаллического материала с КГО [001] вместо поликристаллического материала вызывает наиболее сильное повышение собственных частот. В табл. 1 представлена сравнительная характеристика собственных частот для поликристаллической и монокристаллических лопаток с аксиальной ориентацией КГО [001] и [111] с трещиной и без трещины.

Таблица 1

Сравнительная характеристика частот для поликристаллической и монокристаллических лопаток с различной КГО

№ п/п	Поликристалл	Монокристаллический материал с КГО	
		[001]	[111]
1	2	3	4
1	848	896,66	1027
2	1519	1858,5	1946
3	2452	3108	3249,5
4	3223	3634,8	4088,8
5	4697	6018	6130,9
6	5997	7439,5	7823,5
7	8284	9814,4	10775
8	8447	10418	11130
9	9553	11596	12353
10	10642	11816	13490

В качестве примера проведенных расчетов на рис. 6, 7 приведены поля относительных интенсивностей напряжений на 2-й и 3-й форме колебаний лопаток.

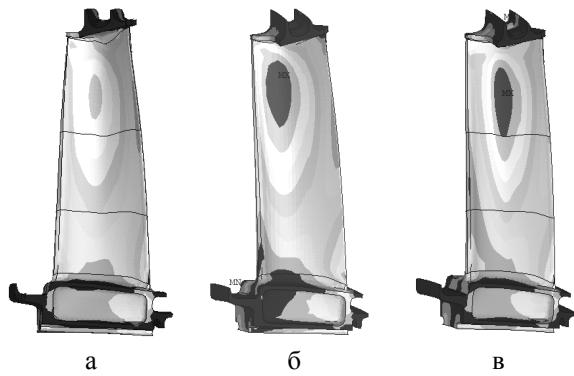


Рис. 6. Поля относительных интенсивностей напряжений на 2-й форме колебаний лопаток: поликристаллической (а), монокристаллической с КГО [001] (б) и монокристаллической с КГО [111] (в)

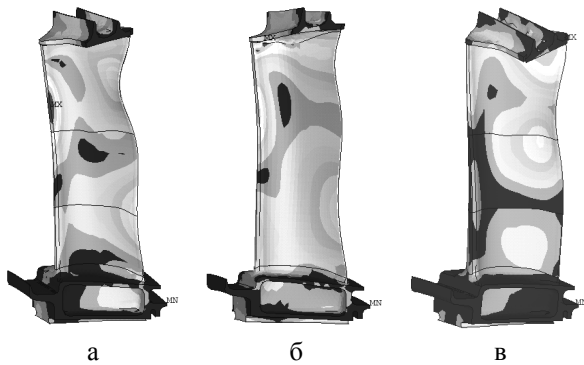


Рис. 7. Поля относительных интенсивностей напряжений на 7-й форме колебаний лопаток: поликристаллической (а), монокристаллической с КГО [001] (б) и монокристаллической с КГО [111] (в)

Использование вместо поликристаллического материала монокристаллического с КГО [111] приводит к еще большему влиянию на собственные частоты. Формы перемещений лопаток за счет материала изменяются слабо. У формы относительных интенсивностей напряжений наибольшие относительные напряжения наблюдаются на более тонкой выходной кромке. С возрастанием номера частоты наибольшие относительные напряжения перемещаются от корневой зоны к периферии.

При переходе от поликристаллического материала к монокристаллическому с КГО [001] наблюдается некоторое повышение относительных интенсивностей напряжений в центральной части лопаток (на спинке и корытце), в связи с большой жесткостью на кручение. Для лопаток из монокристаллического материала с КГО [111] имеется большая тенденция к перемещению наибольших относительных напряжений к периферии и появлению их на входной кромке.

Особенности расчета колебаний рабочего колеса с разрезной связью

В табл. 2 представлены результаты анализа влияния взаимного перемещения полок без сопротивления на собственные частоты рабочего колеса. По сравнению с собственными частотами рабочего

колеса со сплошной бандажной связью собственные частоты с разрезной связью существенно снижаются.

Таблица 2

Влияние взаимного перемещения полок и материала лопатки на вибрационные характеристики систем

№ п/п	Поликристаллические лопатки		Монокристаллические лопатки с различной ориентацией КГО				Кол-во узловых диаметров
	Сплошная связь	Проскальзывание	[001]		[111]		
			Сплошная связь	Проскальзывание	Сплошная связь	Проскальзывание	
1	954,9	853,9	987,1	872,1	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	915,5	1277,8	1089,8	3
5	1312,1	906,5	1386,9	943,1	1505,4	1152,7	4
6	1464,7	923,2	1570,3	966,8	1768,7	1193,8	5
7	1595	937,03	1730,2	988,3	2008,6	1220,2	6
8	1707	950,3	1871,2	1010	2213,5	1241,3	7
9	1813,8	964,5	2008,1	1034	2398,3	1261,7	8
10	1925,6	980,5	2152,7	1060	2579,3	1283,5	9

На основании результатов расчетов построены графики, показывающие изменение спектра частот рабочих колес с лопатками из разных материалов. На рис. 8 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. 9 – 11 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 близкими формы колебаний рабочих колес с лопатками из разных материалов. Поэтому на рисунках приведены не все формы колебаний и распределения относительных интенсивностей напряжений.

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.

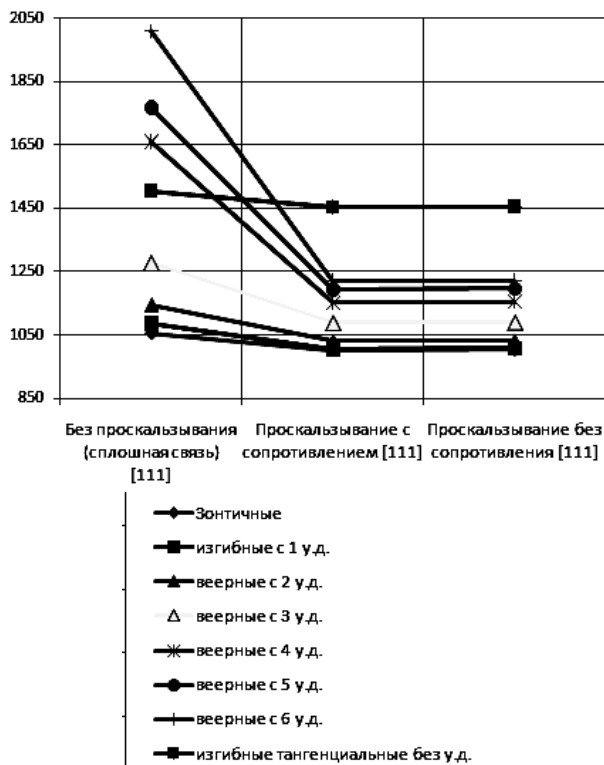


Рис. 8. Сравнение частот нижней части спектра колебаний рабочего колеса при идентичных формах, монокристаллическая ориентация лопаток [111] в зависимости от типа связи

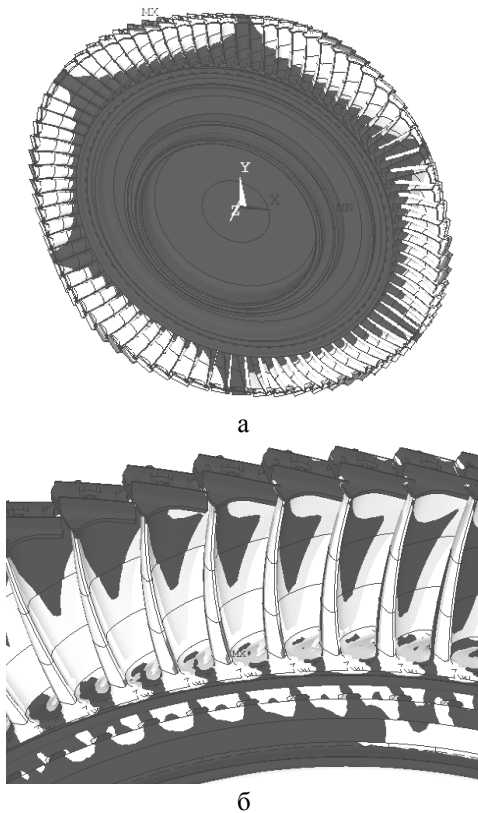


Рис. 9. Форма перемещений (а) и поля интенсивностей напряжений (б) рабочего колеса при колебаниях 3-мя узловыми диаметрами, 886 Гц (поликристаллическая лопатка, проскальзывание без сопротивления)

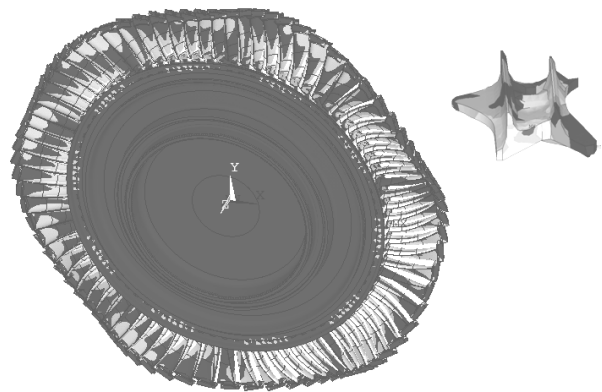


Рис. 10. Поля интенсивностей напряжений при колебаниях с 5-ю узловыми диаметрами, 926,9 Гц, (поликристаллическая лопатка, проскальзывание с сопротивлением)

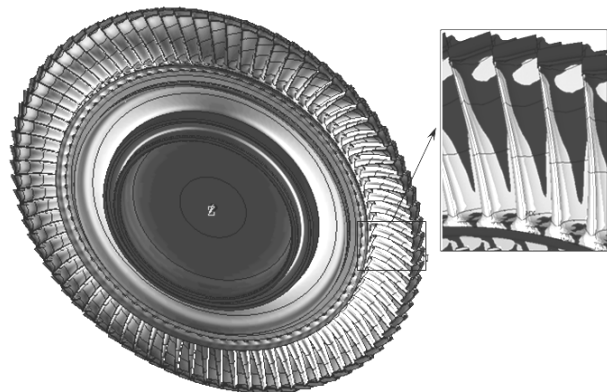


Рис. 11. Поля интенсивностей напряжений при колебаниях с 1-м узловым диаметром, 878,4 Гц, (монокристаллическая лопатка с КГО [001], проскальзывание с сопротивлением)

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

Выводы

Использование монокристаллического материала заметно повышает собственные частоты лопаток. Причем для материала с КГО [111] это повышение заметно больше, чем для материала с КГО [001]. Но значения частот меняются существенно меньше, чем соотношение значений модулей упругости E_z для этих материалов, так как частоты колебаний зависят от соотношения всех упругих податливостей материала.

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 сравнению с ориентацией КГО [001]. Выбор основной КГО материала лопаток следует производить с учетом всех факторов для разрабатываемой конструкции [6, 7].

Список литературы

1. Ножницкий Ю.А. Монокристаллические рабочие лопатки высокотемпературных турбин перспективных ГТД / Ю.А. Ножницкий, Е.Р. Голубовский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 9 (35). – С. 117-123.
2. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов и др. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
3. Ножницкий Ю.А. О прочностной надежности монокристаллических рабочих лопаток высокотемпературных турбин перспективных ГТД / Ю.А. Ножницкий, Е.Р. Голубовский; под ред. д.ф.м.н., проф. Ю.К. Петерни, д.т.н. Л.Б. Гецова // *Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования*. – СПб, 2009. – Вып. 296. – С. 74-82.
4. Придорожный Р.П. Особенности влияния кристаллографической ориентации на статическую прочность монокристаллических рабочих лопаток турбин / Р.П. Придорожный, А.В. Шереметьев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 10(26). – С. 55-59.
5. Мельникова Г.В. Влияние кристаллографической ориентации монокристалла и ее технологического разброса на частотный спектр турбинных лопаток / Г.В. Мельникова, Б.Ф. Шор, Л.А. Маггеранова, Д.А. Протопопова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2001. – № 26. – С. 140-144.
6. Воробьев Ю.С. 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.
7. Особенности колебаний монокристаллических лопаток современных ГТД / Ю.С. Воробьев, М.А. Чугай, С.Б. Кулишов, А.Н. Скрицкий, К.Ю. Дьяконенко // *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць*. – Дніпропетровськ: Ліра, 2012. – Вып. 19. – С. 48-53.

Поступила в редколлегию 12.02.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Т.Е. Романова, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков

АНАЛІЗ СПЕКТРУ ВЛАСНИХ ЧАСТОТ І РОЗПОДІЛ ВІДНОСНИХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ КОЛИВАННЯХ РОБОЧОГО КОЛЕСА ГТД З МОНОКРИСТАЛІЧНИМИ НЕОХОЛОДЖУВАНИМИ ЛОПАТКАМИ

М.О. Чугай

В роботі проведено аналіз впливу орієнтації кри-сталографічних осей і типу бандажних зв'язків на спектр власних частот, форм і розподіл відносних напружень. Розроблена тривимірна скінченно-елементна модель робочого колеса, яка враховує геометричну форму об'єкту, вигляд бандажних зв'язків і орієнтацію кристалографічних осей. Проведено чисельний аналіз впливу полікристалічного і монокристалічного матеріалу лопаток з орієнтацією кристалографічних осей [001] та [111] на власні частоти, форми коливань і розподіл відносних напружень робочого колеса з суцільною і розрізною бандажними зв'язками.

Ключові слова: робочі лопатки, монокристалічний матеріал, кристалографічна орієнтація, метод кінцевих елементів, форми коливань, локалізація напруги, спектр частот.

ANALYSIS OF THE SPECTRUM OF THE NATURAL FREQUENCIES AND THE RELATIVE DISTRIBUTION OF STRESSES IN THE VIBRATIONS OF THE SINGLE-CRYSTAL TURBINE BLADES UNCOOLED

M.A. Chugay

The analysis of influence of orientation of crystallography axes and type of bracer connections is in-process conducted on the spectrum of natural frequencies, forms and distributing of relative tensions. The three-dimensional eventual-element model of driving wheel, taking into account the geometrical form of object, type of bracer connections and orientation of crystallography axes, is developed. The numerical analysis of influence of polycrystal and single-crystal material of shoulder-blades is conducted with the orientation of crystallography axes [001] and [111] on natural frequencies, forms of vibrations and distributing of relative stresses of driving wheel with continuous and cut bracer connections.

Keywords: workings shoulder-blades, monocrystalline material, crystallography orientation, method of eventual elements, forms of vibrations, localization of tensions, spectrum of frequencies.