

УДК 621.452.3.017

А.Н. ПЕТУХОВ, Е.Р. ГОЛУБОВСКИЙ, К.А. БАСОВ

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Россия

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФОРМЫ КОЛЕБАНИЙ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ И ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК ТУРБИН С РАЗЛИЧНОЙ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ¹

Разработана расчётная модель (МКЭ), с использованием которой были определены частотные характеристики образца с равноосной и монокристаллической структурой с заданными кристаллографическими ориентациями (КГО). Выполнены исследования упругих деформаций и перемещений на профилях образца и охлаждаемой монокристаллической лопатки в условиях испытаний на усталость при изгибных и крутильных формах колебаний с учётом кристаллографической анизотропии упругих свойств материала.

частотные характеристики, кристаллографическая ориентация, аксиальная ориентация, азимутальная ориентация, упругие деформации, сетка конечных элементов

Введение

Повышение надёжности литых лопаток высокотемпературных турбин ГТД и ЭУ зависит от совершенства конструкции, наличия специальных литейных жаропрочных сплавов и методов управления процессом кристаллизации отливки, формирующим в деталях оптимальную структуру и необходимые характеристики конструкционной прочности на заданный ресурс [1].

Известно, что сплавы с монокристаллической структурой обладают анизотропией свойств, что проявляется в неоднородности напряженно деформированного состояния, разбросе частотных характеристик (ЧХ), нестабильности характеристик усталости. Это нередко связывают с отклонениями аксиальной оси кристалла от заданного кристаллографического направления или влиянием нерегламентированной азимутальной ориентации. Поэтому отклонение на аксиальную ориентацию задаётся в ТУ, но азимутальная ориентация не регламентируется.

В изотропном теле частота пропорциональна абсолютному значению волнового вектора $\mathbf{k}$ и потому направление скорости $\mathbf{W} = \frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{k}}$ совпадает с направлением $\mathbf{k}$.

Для моно кристаллов такая зависимость не имеет места, а частота ω зависит от компонент волнового вектора k_1, k_2, k_3 . Сами компоненты вектора групповой скорости $\mathbf{W}$ определяются выражениями:

$$W_1 = \frac{\partial \omega}{\partial k_1}, \quad W_2 = \frac{\partial \omega}{\partial k_2}, \quad W_3 = \frac{\partial \omega}{\partial k_3}.$$

Поэтому, в общем случае, в монокристаллах векторы $\mathbf{W}$ и $\mathbf{k}$ не параллельны, и, если принять ориентацию вектора групповой скорости за направление распространения волны, то её распространение не будет совпадать с волновым вектором.

В работе сделана попытка, оценить влияние азимутальной ориентации на формы колебаний и частотные характеристики лопаток турбины.

На первом этапе, на примере плоского образца с постоянными геометрическими и заданными физическими параметрами, рассмотрены в «чистом виде» некоторые задачи, связанные с влиянием структуры (равноосная поликристаллическая, монокристаллическая) на его формы колебаний и ЧХ.

Верификация расчётов ЧХ и деформаций плоского образца выполнялась по экспериментальному спектру частот образца с поликристаллической структурой из сплава ЭИ698ВД.

Далее были получены ЧХ выбранной конструкции лопаток турбины в зависимости от аксиальной и азимутальной ориентаций.

¹ Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 05-01-00295а)

1. Методика исследования ЧХ образцов и охлаждаемых монокристаллических лопаток турбины

Расчет собственных колебаний образца (рис. 1) осуществлялся при помощи метода конечных элементов (МКЭ). Для расчета собственных частот колебаний образца применялся пакет МКЭ ANSYS. Созданная средствами CAD геометрическая модель содержала все необходимые для расчета элементы, включая галтели. В препроцессоре комплекса МКЭ ANSYS была построена сетка конечных элементов, для которой и проводились расчеты.

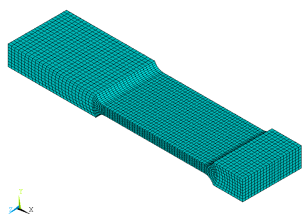


Рис. 1. Модель плоского образца

Для обеспечения необходимой точности расчета применялась регулярная сетка конечных элементов шестигранной формы. Расчетная модель включала 17388 узлов, т.е. свыше 51000 степеней свобод, и 14560 элементов. Приложенные к модели связи (запрещенные перемещения) соответствовали условиям нагружения образцов. При моделировании материала применялись специальные анизотропные конечные элементы, содержащиеся в библиотеке комплекса МКЭ ANSYS (SOLID 64).

Исследование перемещений и упругих деформаций выполнялось на монокристаллическом образце и профиле охлаждаемой монокристаллической лопатки при различных формах колебаний (изгибных, крутильных и др.) с учётом кристаллографической анизотропии упругих свойств материала, вызванных изменением аксиальной и азимутальной КГО в максимально допустимых пределах на ЧХ монокристаллических охлаждаемых лопаток.

1.1. Объекты исследования. Для экспериментального исследования и верификации расчётной модели использовался плоский образец из сплава

ЭИ698ВД, а для расчётного исследования - образец из сплава ЖС6Ф-МОНО (плотность $\rho = 8,64 \text{ г/см}^3$). ЧХ монокристаллических образцов для различных ориентаций рассчитывались с использованием значений упругих модулей C_{11} , C_{12} и C_{44} ($C_{11}=2,86127 \cdot 10^2 \text{ ГПа}$, $C_{12}=1,8762 \cdot 10^2 \text{ ГПа}$, $C_{44}=1,25 \cdot 10^2 \text{ ГПа}$) [1].

Спектры ЧХ в зависимости от параметров КГО определялись на охлаждаемых рабочих лопатках ТВД из сплава ЖС32-МОНО.

1.2. Исследования ЧХ. Расчётные исследования плоского образца из сплава ЖС6Ф были проведены для образца с равноосной структурой и для образца с монокристаллической структурой. На рис. 2 и 3 в качестве примера (из-за ограниченности объёма) показаны результаты расчётов только 1-й и 2-й форм колебаний (расчёты были проведены до 20-й формы).

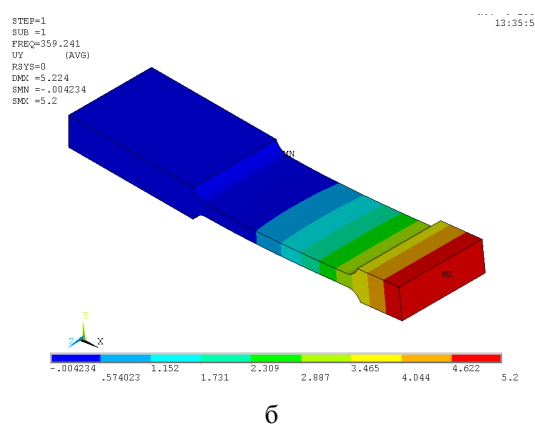
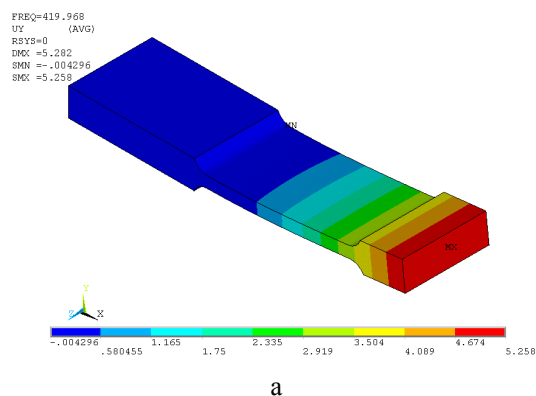


Рис. 2. Образец с равноосной (а) и монокристаллической (б) структурой:
а – изгибная форма колебаний, $f_1 = 420 \text{ Гц}$;
б – изгибная форма колебаний, $f_1 = 359 \text{ Гц}$

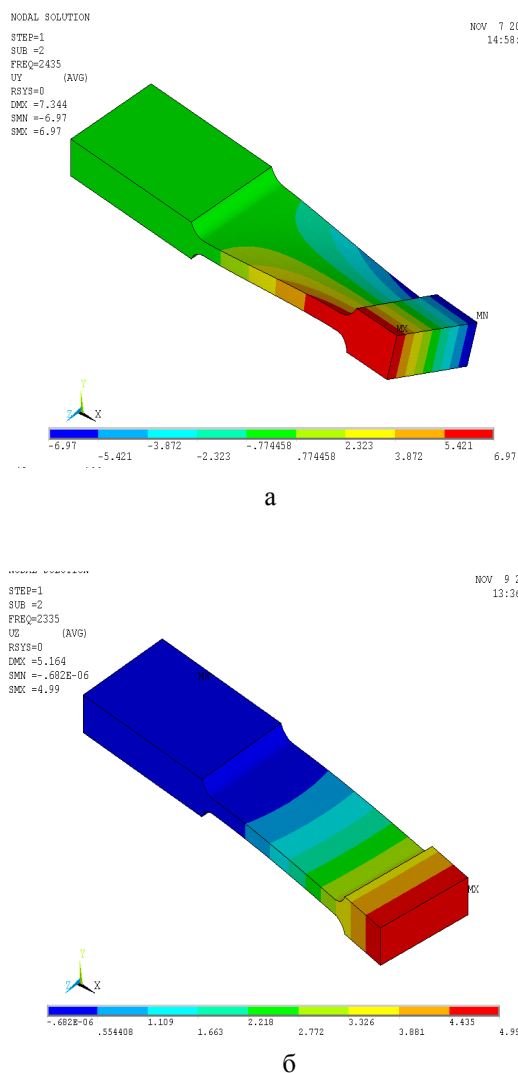


Рис. 3. Образец с равноосной (а) и монокристаллической (б) структурой.
а – вторая форма крутильная, $f_2 = 2435$ Гц;
б – изгибная форма в плоскости максимальной жёсткости, $f_2 = 2335$ Гц.

Необходимо подчеркнуть, что для образца с равноосной и монокристаллической структурами колебания по 1-й гармонике совпадают по форме (изгибные колебания), но несколько различаются по частоте.

По второй гармонике частоты практически совпадают, но форма колебаний различна в зависимости от структуры – для образца с равноосной структурой имеет место крутильная форма, а для монокристаллического образца – изгибная форма в плоскости максимальной жёсткости. Таким образом переход от равноосной структуры к монокристаллической может изменить не только частоту, но и форму колебаний.

Экспериментальные исследования ЧХ образца и лопаток проводились на вибростенде типа 4801 с вибростолом 4811 и задающим генератором белого шума типа 1027 фирмы Брюль и Кьер (Brüel&Kjer).

На рис. 4 (в конце статьи) представлены результаты обработки ЧХ плоского образца из деформированного сплава ЭИ698ВД, с помощью которых были проанализированы частотные характеристики выбранного оборудования и, в частности, подвижного стола вибростенда.

Полученные результаты позволили сделать заключение о возможности выполнения исследований в реальных спектрах частот, характерных для образца и лопаток.

Сравнение расчётных и экспериментальных данных частот для плоского образца из сплава ЭИ698ВД, представленных на спектрограмме (рис. 1) и в табл. 1, свидетельствует об удовлетворительном их совпадении в диапазоне колебаний от 1-й до 8-й формы. Наибольшие различие частот $\Delta f_{отн} = (f_3 - f_p / f_3) f_3$ наблюдались для формы 4, когда отношение экспериментальных и расчётных частот $\Delta f_{отн} = 0,38$. Однако, в целом, отклонения частот $\Delta f_{отн}$ составляют около 0,1.

Таблица 1

Значения расчётных и экспериментально измеренных частот на образце из сплава ЭИ698

Формы	Частота, Гц		
	f_p	f_3	$\Delta f_{отн}$
1	454	485	0,06
2	2435	2815	3224
3	2850	3224	0,08
4	3533	5677	0,38
5	10435	8858	-0,15
6	10581	9807	-0,07
7	13539	11625	-0,14
8	15069	15362	0,02

Этот результат свидетельствует о том, что на выбранном оборудовании не было существенных погрешностей при исследовании частотных характеристик образцов и лопаток.

2. Анализ расчётных и экспериментальных форм и частот колебаний

2.1. Анализ частотных характеристик монокристаллических лопаток. В комплекте исследованных лопаток интервал изменения аксиального угла находился в пределах от 0° до $5,6^\circ$, а значения отклонений в азимутальном направлении были от -42° до $+48^\circ$.

В табл. 2 представлены диапазоны изменения аксиальной и азимутальной ориентаций исследованных охлаждаемых МОНО лопаток ТВД. Т.к. значения аксиальных $\alpha_{акс}$ и азимутальных $\alpha_{аз}$ направлений у лопаток были случайными, то оценка влияния факторов проводилась по лопаткам, попадающим в близкий по значениям интервал ориентаций.

Таблица 2

Диапазоны изменения отклонений исследованных лопаток в пределах интервалов аксиальной и азимутальной ориентаций в градусах

Аксиальная ориентация $\alpha_{акс}$	Азимутальная ориентация $\alpha_{аз}$
От 0 до 1,4	От $-6,3$ до $+31,7$
От 1,6 до 2,0	От $16,8$ до $+48,5$
От 3,3 до 3,8	От $-38,5$ до $+31,7$
От 5 до 5,6	От -42 до $+40,2$

2.2. Анализ ЧХ лопаток в зависимости от аксиальной ориентации. Выборки лопаток для анализа ЧХ в зависимости от аксиальной ориентации представлены в табл. 3 и 4.

Анализ отношений значений собственных частот разных лопаток при одинаковых формах колебаний (табл. 3) в зависимости от $\alpha_{акс}$ в пределах от $0,7$ до $5,6^\circ$ и для $\alpha_{аз}$ ориентации от 12 до $16,5^\circ$ показал, что они остаются постоянными во всём диапазоне частот.

Значения отношений собственных частот в зависимости от аксиальной ориентации $\alpha_{акс}$ в пределах от 0 до $7,6^\circ$, для азимутальной ориентации $\alpha_{аз}$ в пределах от -5 до $-6,3^\circ$ также практически одинаковы (табл. 4).

Таблица 3

ЧХ лопаток, различающиеся по $\alpha_{акс}$ от $0,7$ до $5,6^\circ$, а по $\alpha_{аз}$ в интервале от $+12$ до $+16,5^\circ$

Частота, Гц		
Лопатка № 4266 $\alpha_{акс} = 0,7$	Лопатка № 4138 $\alpha_{акс} = 1,0$	Лопатка № 4148 $\alpha_{акс} = 5,6$
1371	1225	1352
	2098	2150
2296	2182	2285
5573	5579	5711
6693	6738	6446
7314	7144	7447
8494	8172	8311
10040	10163	10218
10888	10553	
	11310	10923
		12690
		14083
14582		
15550		15550
16416		16346
	16815	17197
18289	18315	
18806		18727
19358		

Таблица 4

ЧХ лопаток, различающихся по аксиальной ориентации $\alpha_{акс}$ от 0° до $7,6^\circ$ (интервал азимутального направления $\alpha_{аз}$ в пределах $1,3^\circ$ (от -5 до $-6,3^\circ$))

Частота, Гц	
№ 4110 $\alpha_{акс}=0$	№ 4040 $\alpha_{акс}=7,6$
1290	1229
2119	2025
2243	2203
3725	4084
5730	5600
6559	
7198	7336
	8342
9422	9239
10155	10514
10913	10797
11419	
13525	
15114	
15918	
	16883
17750	
18233	
19233	19078

2.3. Анализ ЧХ лопаток в зависимости от азимутальной ориентации. Анализ ЧХ лопаток в зависимости от азимутальной ориентации проводился для трёх выборок лопаток.

В первую выборку (табл. 5) включены лопатки №№ 4110, 4266 и 4224, имевшие $\alpha_{акс}$ от 0 до $1,4^\circ$ при диапазоне изменения $\alpha_{аз}$ в пределах от -6 до 32° .

Во вторую группу (табл. 6) включены лопатки №4138 и № 4223, имевшие соответственно аксиальную ориентацию $\alpha_{акс} = 1,0^\circ$ и $\alpha_{акс} = 1,4^\circ$ и азимутальные отклонения $\alpha_{аз} = -2^\circ$ и $\alpha_{аз} = 31^\circ$.

Таблица 5

ЧХ лопаток МОНО в зависимости от азимутальной ориентации в пределах от 6 до 32° при интервале аксиальной ориентации от 0 до $1,4^\circ$.

Частота, Гц		
Лопатка № 4110 $\alpha_{акс}=0; \alpha_{аз}=-6$	Лопатка № 4266 $\alpha_{акс}=0,7; \alpha_{аз}=12$	Лопатка № 4224 $\alpha_{акс}=1,4; \alpha_{аз}=32$
1290	1371	1331
2079		2132
2199	2296	2243
4152		4884
5703	5573	5636
6130		5869
6862	6693	6650
7511	7314	7667
8048		7987
8888	8494	
		9130
	10040	
10345		
10611	10888	10792
11290		11458
12270		
		13354
	14582	14305
	15550	15768
16273	16416	16063
		17141
	18289	18123
18983	18806	
	19358	

Таблица 6

Частотные характеристики лопаток МОНО в зависимости от азимутальной ориентации в пределах от -2 до 31° при интервале аксиальной ориентации от $1,0$ до $1,4^\circ$.

Частота, Гц	
Лопатка № 4138 $\alpha_{акс}=1,0; \alpha_{аз}=-2$	Лопатка № 4223 $\alpha_{акс}=1,7; \alpha_{аз}=31$
1225	1410
2098	
2182	
2572	2346
5346	5468
5579	
6738	6548
7144	6758
7886	7467
8172	
9204	8713
10163	
10553	10633
	10770
11310	11743
	14686
	15583
16815	16647
18315	18598

Третья группа (табл. 7) включала лопатки №4135 и № 4258, имевшие аксиальную ориентацию $\alpha_{акс} = 5^\circ$ и азимутальные отклонения $\alpha_{аз} = -40^\circ$ и $\alpha_{аз} = -18^\circ$.

Значения отношений собственных частот в зависимости от азимутальной ориентации (в пределах от -6 до 32° при аксиальной ориентации $\alpha_{акс}$ от 0 до $1,4^\circ$) остаются практически постоянными (табл. 7). Наибольшая плотность спектра отмечается у лопатки № 4110 до частоты 12270 Гц и лопатки № 4224 от частоты 10792 Гц.

Значения отношений собственных частот в зависимости от $\alpha_{аз}$ (в пределах от -2 до 31° при $\alpha_{акс}$ от $1,0$ до $1,4^\circ$) также остаются практически постоянными (табл. 6). У лопатки № 4138 высокая плотность спектра

от $f_1 = 1225$ Гц до частоты $f_{14} = 10553$ Гц,

а у лопатки № 4223

от $f_8 = 6548$ до $f_{20} = 18598$ Гц.

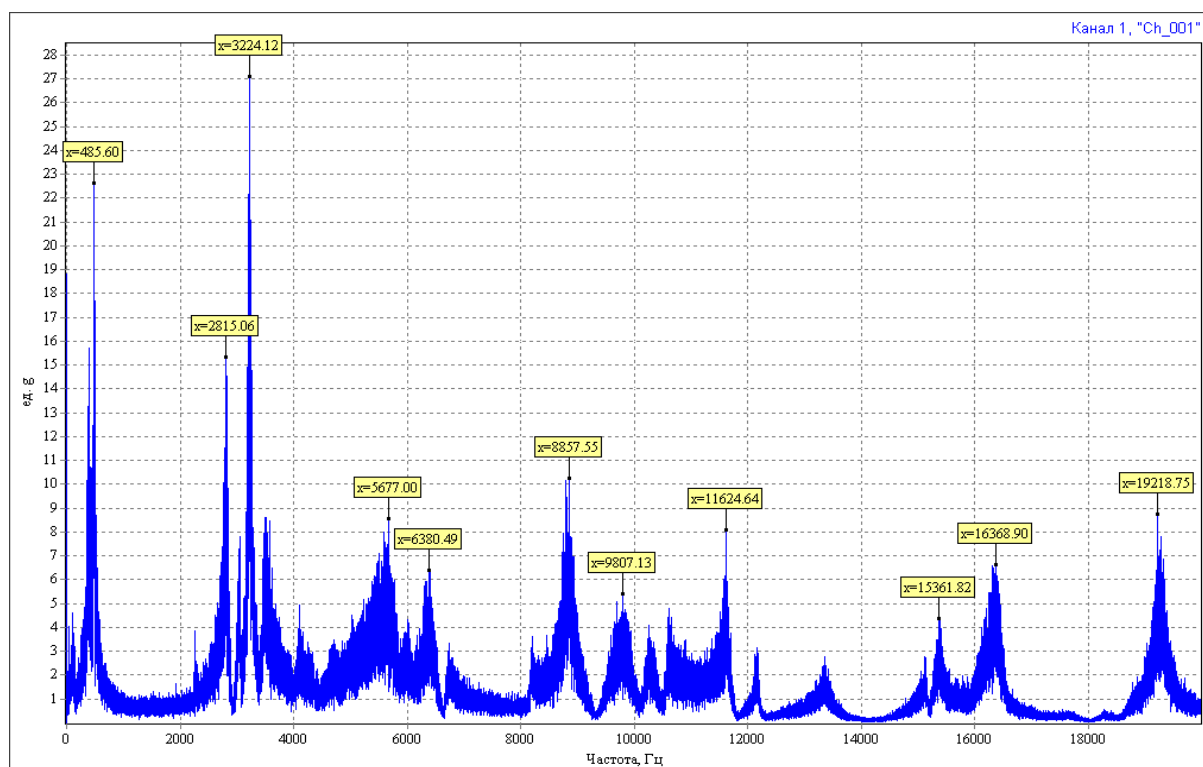


Рис. 4. Пример спектра частот для плоского образца из сплава ЭИ698ВД

Таблица 7

Число лопаток в зависимости от азимутальной ориентации в пределах от -40° до -18° при интервале аксиальной ориентации $\alpha_{акс} = 5^\circ$

Частота, Гц	
Лопатка № 4135 $\alpha_{акс}=5,0; \alpha_{аз}=-40$	Лопатка № 4258 $\alpha_{акс}=5,0; \alpha_{аз}=-18$
1261	1229
2036	1997
2244	2236
4132	4017
4556	
5574	5893
6396	6500
7059	7032
8011	7716
9016	
9466	9333
10417	10426
10781	10774
11398	
13509	13305
	13767
15072	14895
15886	15768
17289	17410
18222	18573

Аналогичная картина наблюдается для зависимости отношений собственных частот от $\alpha_{аз}$ (в пределах от -40° до -18° при $\alpha_{акс} = 5^\circ$ (табл.7 – лопатки №№ 4135 и 4258).

В то же время более высокая плотность спектра частот характерна для лопаток почти во всём частотном диапазоне от $f_1 = 1261$ до $f_{19} = 18222$ и $f_{17} = 18573$ Гц.

При близких или равных значениях аксиальных ориентаций с уменьшением азимутальных углов наблюдается уплотнение спектра частот в области малых и средних (по номеру) форм колебаний.

С ростом азимутального угла уплотняется спектр частот высоких форм колебаний.

3. Необходимые дополнения и изменения к методике измерения деформаций при колебаниях монокристаллических лопаток

Результаты выполненных исследований показали, что без визуализации реальных форм колебаний монокристаллического образца, и тем более охлаж-

даемой монокристаллической лопатки, требуется большая подготовительная работа при исследовании напряжённо – деформированного состояния лопатки, включающая:

- определение кристаллографической ориентации каждой монокристаллической лопатки;
- информацию о значениях модулей упругости C_{11} , C_{12} и C_{44} из матрицы модулей упругости;
- расчёт частот и форм колебаний с определением узловых линий деформаций и расчётная визуализация вида колебаний.

Перед испытаниями на усталость, по формам выше основной, на каждой лопатке необходимо визуализировать формы колебаний с целью сравнения расчётных и экспериментальных узловых линий и последующего определения направления действия главных напряжений.

С целью уточнения разрушающих напряжений на лопатках после испытаний на усталость следует провести контрольную проверку кристаллографической ориентации (у разрушенных лопаток по месту очага разрушения).

Заключение

1. Анализ спектрограмм частот, проведенный для охлаждаемых монокристаллических лопаток турбин, которые имели отклонения аксиальной ориентации от 0° до $5,6^\circ$ при α_{az} от -42° до $+48,5^\circ$, не выявил существенного влияния на отношения частот в спектрах исследованных лопаток. Однако при этом наблюдается изменение плотности спектра:

- при минимальных α_{az} имеет место рост плотности спектра частот в диапазоне форм от f_1 до f_8 ;
- с увеличением α_{az} от 0° плотность спектра частот увеличивается в диапазоне форм от f_7 до f_{18} .

2. Проведённые исследования показали, что наиболее существенное влияние на изменение вида и формы колебаний наблюдается при отклонении от заданной ориентации в плоскости XZ , что при изгибе вызывает несимметричное сжатие, наложение кручения на изгибные колебания и др., а также рост величины перемещений и смещение узловых линий.

3. Показано, что отклонение вектора ориентации в плоскости XU сопровождается возникновением дополнительных совместных форм колебаний (совместных изгибных, крутильных и осевых колебаний) и, как следствие, смещением узловых линий, что свидетельствует об изменении напряжённо – деформированного состояния лопатки. Поэтому при определении зон размещения тензорезисторов для измерения деформаций при тензометрировании и при усталостных испытаниях охлаждаемой монокристаллической лопатки, необходима информация о возможном распределении упругих перемещений в различных зонах.

Литература

1. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов и др. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том 7. «Теория упругости». – М.: Наука, 1965. – 204 с.
3. Смирнов А.А. Молекулярно-кинетическая теория металлов. – М.: Наука, 1966. – 488 с.

Поступила в редакцию 7.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Ю. Коллеров, РГТУ-МАТИ им. К.Э.Циолковского, Москва.