

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЗИМУТАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛА НА ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФОРМЫ КОЛЕБАНИЙ

© 2006 А.Н. Петухов, Е.Р. Голубовский, К.А. Басов

ЦИАМ им. П.И. Баранова, г. Москва

На основе разработанной расчётной модели определены частотные характеристики образца с равноосной и монокристаллической структурой с заданными кристаллографическими ориентациями. Исследованы упругие деформации и перемещения для плоского образца и охлаждаемой монокристаллической лопатки при колебаниях по изгибным и крутильным формам (в диапазоне $k = 1 \dots 20$) с учётом кристаллографической анизотропии упругих свойств материала.

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 МНО - структурой обладают анизотропией свойств, что проявляется в неоднородности напряженно деформированного состояния, разбросе ЧХ, нестабильности характеристик усталости. Это нередко связывают с отклонениями аксиальной оси кристалла от заданного кристаллографического направления или влиянием нерегламентированной азимутальной ориентации. Отклонение на аксиальную ориентацию задаётся в ТУ, а азимутальная ориентация не регламентируется.

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

Для монокристаллов такая зависимость не имеет места, а частота ω зависит от компонент волнового вектора k_1, k_2, k_3 . Сами компоненты вектора групповой скорости 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 W и 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 физическими параметрами, рассмотрены в «чистом виде» задачи, связанные с влиянием структуры (равноосная поликристаллическая, МОН) формы колебаний и ЧХ.

Верификация расчётов ЧХ и деформаций плоского образца выполнялась по экспериментальному спектру частот образца с поликристаллической структурой из сплава ЭИ698ВД. Затем были получены ЧХ выбранной конструкции лопаток турбины в зависимости от аксиальной и азимутальной ориентаций.

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 САД геометрическая модель содержала все необходимые для расчета элементы, включая галтели. В препроцессоре комплекса МКЭ ANSYS создана сетка конечных элементов, для которой и проводились расчеты.

Для обеспечения необходимой точности расчета применялась регулярная сетка КЭ шестигранной формы. Расчетная модель включала 17388 узлов, т.е. свыше 51000 степеней свободы и 14560 элементов.

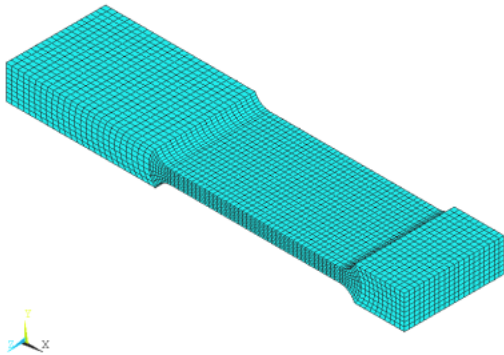


Рис.1. Модель плоского образца

Приложенные к модели связи соответствовали условиям нагружения образцов. При моделировании материала применялись анизотропные КЭ, входившие в библиотеку 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 для упругих модулей C_{11} , C_{12} и C_{44} ($C_{11} = 2.86127 \times 10^2 \text{ ГПа}$, $C_{12} = 1.8762 \times 10^2 \text{ ГПа}$, $C_{44} = 1.25 \times 10^2 \text{ ГПа}$) [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.

Сравнение расчётных и экспериментальных данных частот для плоского образца из сплава ЭИ698ВД, представленных на

спектрограмме (рис.1) и в таблице 1, свидетельствует об удовлетворительном их совпадении в диапазоне колебаний от 1-й до 8-й формы.

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).

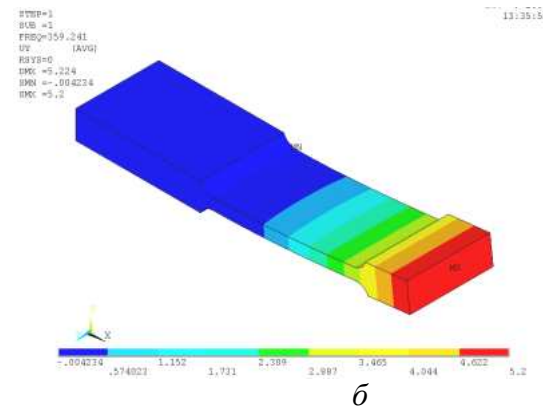
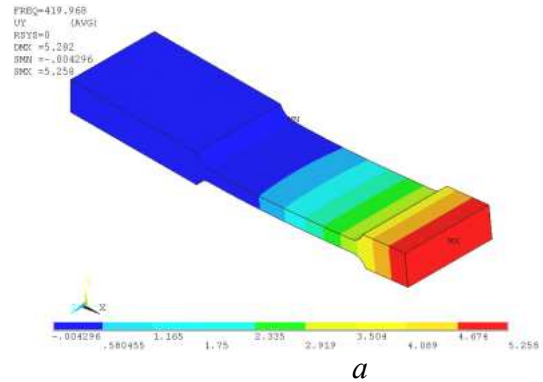


Рис.2. Образец с равноосной (а) и монокристаллической (б) структурой. а - изгибная форма колебаний, $f_1=420 \text{ Гц}$, б - изгибная форма колебаний, $f_1=359 \text{ Гц}$,

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.

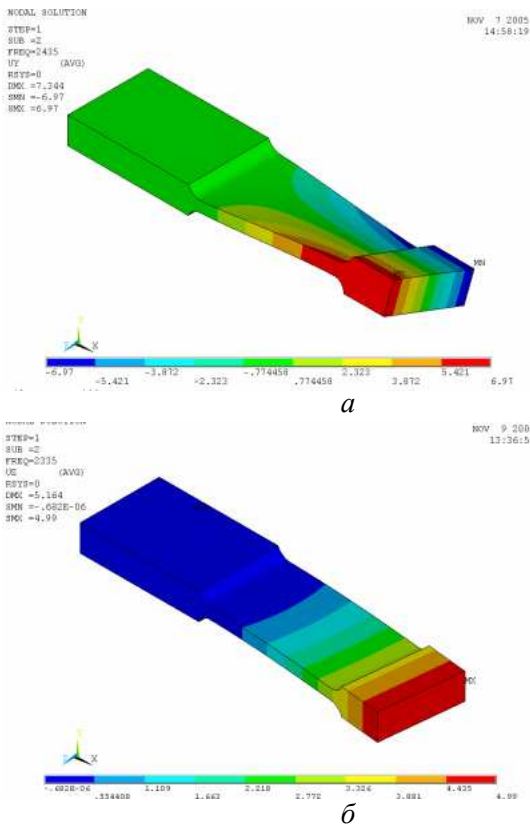


Рис.3. Образец с равноосной (а) и монокристаллической (б) структурой: а – вторая форма крутильная – $f_2 = 2435$ Гц; б- изгибная форма в плоскости максимальной жёсткости – $f_2 = 2335$ Гц

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

Таблица 1. Значения расчётных и экспериментально измеренных частот на образце из сплава ЭИ698

| Формы | Частота, Гц | | |
|-------|-------------|-------|------------------|
| | f_p | f_s | $\Delta f_{омн}$ |
| 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 |

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).

В таблице 2 представлены диапазоны изменения аксиальной и азимутальной ориентаций исследованных охлаждаемых МО-НО 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 град.

| 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 |

Наибольшее различие частот $\Delta f_{омн} = (f_s - f_p / f_s) f_s$ наблюдались для формы 4, когда отношение экспериментальных и расчётных частот $\Delta f_{омн} = 0,38$. Однако, в целом, отклонения частот $\Delta f_{омн}$ составляют около 0,1.

Этот результат показал, что оборудование не вносило 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 $\alpha_{акс}$ находился в пределах $1,3^0$ (от 0^0 до $5,6^0$), а значения отклонений в азимутальном направлении $\alpha_{аз}$ от -42^0 до $+48^0$.

2.2. Анализ ЧХ лопаток в зависимости от аксиальной ориентации

Выборки лопаток для анализа ЧХ в зависимости от аксиальной ориентации представлены в таблицах 3 и 4.

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

Таблица 3. ЧХ лопаток, различающиеся по $\alpha_{акс}$ от $0,7^0$ до $5,6^0$, а по $\alpha_{аз}$ от $+12^0$ до $+16,5^0$

| 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 $\alpha_{акс}$ от 0^0 до $7,6^0$ и $\alpha_{аз}$ (от -5^0 до $-6,3^0$)

| Частота, Гц | |
|--------------------------|-----------------------------|
| № 4110 $\alpha_{акс}=0,$ | № 4040 $\alpha_{акс}=7,6^0$ |
| 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 |

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

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

Во вторую группу (таблица 6) включены лопатки №4138 и № 4223, имевшие аксиальную ориентацию $\alpha_{акс} = 1,0^0$ и $\alpha_{акс} = 1,4^0$ и азимутальные отклонения $\alpha_{аз} = -2^0$ и $\alpha_{аз} = 31^0$. Значения отношений собственных частот в зависимости от $\alpha_{аз}$ (в пределах от -2^0 до 31^0 при $\alpha_{акс}$ от $1,0^0$ до $1,4^0$) также остаются практически постоянными. 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.

Таблица 5. ЧХ лопаток МОНО в зависимости от $\alpha_{аз}$ в пределах от 6^0 до 32^0 при $\alpha_{акс}$ от 0 до $1,4^0$

| Частота, Гц | | |
|---|---|---|
| Лопатка № 4110 $\alpha_{акс}=0;$ $\alpha_{аз}=-6^0$ | Лопатка № 4266 $\alpha_{акс}=0,7;$ $\alpha_{аз}=12^0$ | Лопатка № 4224 $\alpha_{акс}=1,4;$ $\alpha_{аз}=32^0$ |
| 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 | |

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 (таблица 6). Наибольшая плотность спектра отмечается у лопатки № 4110 до частоты 12270Гц и лопатки №4224 от частоты 10792Гц.

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

Аналогичная картина наблюдается для зависимости отношений собственных частот от $\alpha_{аз}$ (в пределах от -40° до -18° при $\alpha_{акс} = 5^{\circ}$) (таблица 7 - лопатки №№ 4135 и 4258). В то же время более высокая плотность спектра частот характерна для лопаток почти во всём частотном диапазоне от $f_1 = 1261$ Гц до $f_{19} = 18222$ и $f_{17} = 18573$.

Таблица 6. Частотные характеристики лопаток МОНО в зависимости от азимутальной ориентации $\alpha_{аз}$ от -2° до 31° при $\alpha_{акс}$ от $1,0^{\circ}$ до $1,4^{\circ}$

| Частота, Гц | |
|--|--|
| Лопатка № 4138 $\alpha_{акс}=1,0^{\circ}; \alpha_{аз} = -2^{\circ}$ | Лопатка № 4223 $\alpha_{акс}=1,7^{\circ}; \alpha_{аз}=31^{\circ}$ |
| 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 |

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

Таблица 7. ЧХ лопаток в зависимости от $\alpha_{аз} = -40^{\circ}$ до -18° при $\alpha_{акс} = 5^{\circ}$

| Частота, Гц | |
|---|---|
| Лопатка № 4135 $\alpha_{аз} = -40^{\circ}$ | Лопатка № 4258 $\alpha_{аз} = -18^{\circ}$ |
| 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 |

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, а тем более охлаждаемой монокристаллической лопатки, необходима большая подготовительная работа при исследовании напряжённо – деформированного состояния лопатки, включающая: 1) определение кристаллографической ориентации каждой лопатки; 2) информацию о значениях модулей упругости C_{11} , C_{12} и C_{44} из матрицы модулей упругости; 3) расчёт частот и форм колебаний с нахождением 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 последую-

шего определения направления действия главных напряжений. С целью уточнения разрушающих напряжений на лопатках после испытаний на усталость необходима контрольная проверка КГО 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, но замечено изменение плотности спектра: при минимальных α_{az} отмечен 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. Исследования показали, что наибольшее изменение вида и формы колебаний имеет место при отклонении от заданной ориентации в плоскости XZ , вызывая при из-

гибе несимметричное сжатие, наложение кручения на изгибные колебания и др., при росте перемещений и смещение узловых линий.

3. Отклонение вектора ориентации в плоскости XU сопровождалось возникновением совместных форм колебаний (изгибных, крутильных и осевых колебаний), смещением узловых линий, т.е. изменением НДС профильной части лопатки.

Список литературы

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

RESEARCH OF INFLUENCE OF AZIMUTHAL ORIENTATION OF MONOCRYSTAL ON FREQUENCY CHARACTERISTICS AND FORMS OF OSCILLATIONS

© 2006 A.H. Petukhov, E.R. Golubovskiy, K.A. Basov

CIAM, Moscow

Results of research of frequency characteristics and forms of natural oscillations of flat polycrystal and monocrystal samples from heat resisting nickel alloy ЖС6Ф and monocrystal лопаток turbines from alloy ЖС32, having various azimuthal orientations presented at constant axial orientation.