

ДИНАМІКА ТА МІЦНІСТЬ МАШИН

УДК: 539.3

*Воробьев Ю.С. д-р техн. наук; Жондковски Р. д-р техн. наук; Берлизова Т.Ю.,
Овчарова Н.Ю.*

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМОУПРУГОГО И ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛОПАТКИ С ВИХРЕВОЙ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

Введение и постановка задач. Необходимость использования охлаждаемых лопаток в газотурбинных двигателях (ГТД), вызвана возрастающими температурами газового потока. Возможность современных жаропрочных сплавов отстают от требований газотурбостроения [1]. Эффективные системы охлаждения такие, как вихревая и пленочная существенно усложняют конструкцию лопатки и вызывают концентрацию напряжений. Использование монокристаллических жаропрочных сплавов расширяет возможности ГТД, но требует учета неоднородности материала.

Лопатки сложной формы изготавливаются с помощью точного литья. Сложный технологический процесс охлаждения литья обеспечивает направленную кристаллизацию материала лопатки. Применение направленной кристаллизации позволяет сформировать в отливке структуру, состоящую из столбчатых зерен, границы которых в основном параллельны направлению главных растягивающих напряжений. Структура монокристалла с кристаллографической аксиальной ориентацией вдоль оси лопатки состоит из дендритных ветвей, которые параллельны этому направлению и ориентированы вдоль теплового потока. Структура таких сплавов представляет гранцентрированную кубическую решетку [2]. В таких монокристаллах имеется ряд кристаллографических направлений. Обычно выделяют три взаимоортогональные кристаллографические оси [001], [010], [100].

Кристаллографическая ориентация материала лопаток существенно влияет на их механические характеристики. Влиянию ориентации КГО на термоупругие и вибрационные свойства посвящен ряд работ. В большинстве работ рассматриваются лопатки с прямыми охлаждающими каналами, расположенными вдоль продольной оси лопатки. Так в работах [3, 4] рассматривается влияние изменения ориентации КГО на термоупругое состояние лопаток, а в работах [5 - 7] на их вибрационное состояние. В работе [8] показано влияние ориентации КГО на надежность и долговечность монокристаллических охлаждаемых лопаток также с прямыми охлаждающими каналами.

В работах авторов статьи рассматривается монокристаллическая охлаждаемая лопатка, с вихревой системой охлаждения, с использованием трехмерных моделей и метода конечных элементов. Рис. 1 дает представление о конструкции лопатки, системе охлаждающих каналов, расположения КГО относительно гранцентрированной кубической решетки материала. В работах [9, 10] проведены исследования сходимости вычислительного процесса при изменении числа и типа конечных элементов.

Для этой расчетной схемы решалась задача температурного состояния, что позволило перейти к анализу температурного и вибрационного состояния лопатки. Работы посвящены анализу влияния и изменения азимутальной ориентации КГО на термоупругое состояние лопатки и выявления концентрации напряжений. Поэтому в данной

© Ю.С. Воробьев, 2017

работе рассмотрено влияние изменение аксиальной ориентации кристаллографических осей на термонапряженное состояние лопатки.

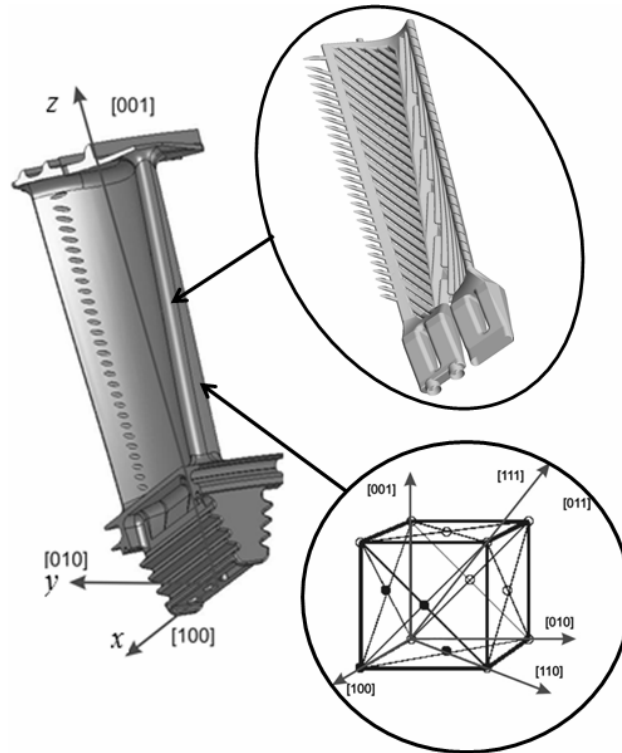


Рис.1. Охлаждаемая лопатка, ее система охлаждения и расположение КГО относительно гранцентрированной кубической решетки материала

Термоупругое напряжение лопатки при изменении аксиальной ориентации КГО. Для изготовления современных охлаждаемых лопаток используются, как уже отмечалось, жаропрочные монокристаллические сплавы, которые обладают анизотропными свойствами. В общем случае матрица податливости для монокристаллической лопатки является полностью заполненной [2]. В данном случае кристаллографические оси [100], [010], [001] совпадают с осями лопатки x , y , z .

Структура монокристалла таких сплавов представляет собой гранцентрированную кубическую решетку. Такой сплав имеет 3 независимые константы [2]. Тогда матрица податливости S имеет вид:

$$S = K^{-1} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{12} & s_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где S – матрица податливости, K – матрица жесткости, s_{ij} – коэффициенты матрицы податливости.

$$s_{11} = \frac{1}{E}, \quad s_{12} = -\frac{\nu}{E}, \quad s_{44} = G.$$

Здесь модуль упругости на растяжение E , модуль сдвига – G и коэффициент поперечной деформации ν являются тремя независимыми константами.

Для оценки влияния изменения аксиальной ориентации кристаллографических осей проводились исследования изменения напряженно-деформированного состояния лопатки при повороте кристаллографической оси $[001]$ вокруг осей x и y . Для примера на рис. 2 показано изменение температурных напряжений в наиболее характерном сечении при повороте кристаллографических осей вокруг оси y .

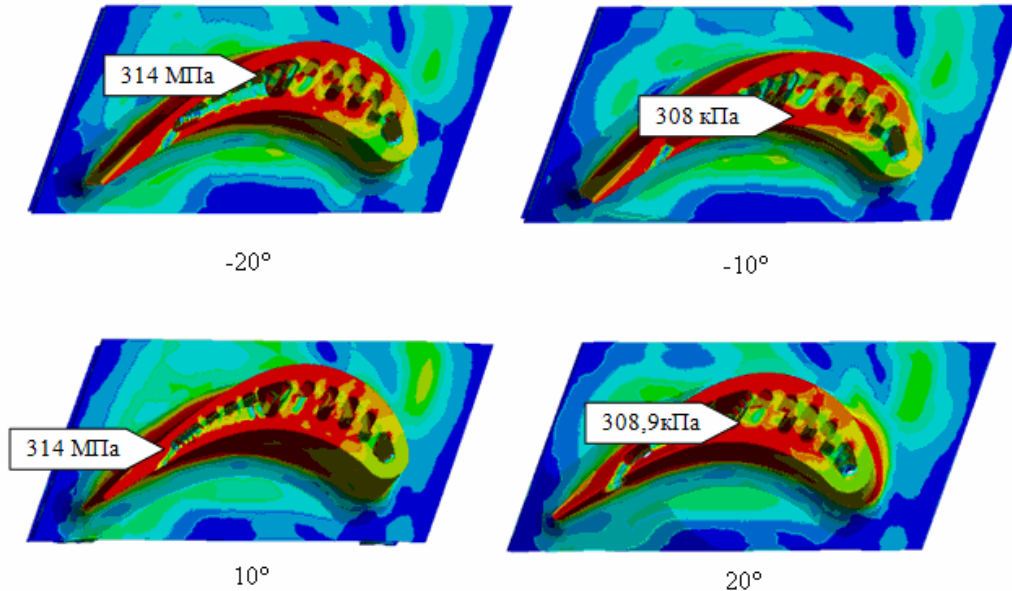


Рис. 2. Изменение полей интенсивностей напряжений в поперечных сечениях лопатки при повороте кристаллографических осей на -20° , -10° , 10° , 20° вокруг оси y

В табл. 1 показаны изменения максимальных термоупругих напряжений в зависимости от угла поворота кристаллографической оси $[001]$.

Таблица 1

Изменение максимальных термоупругих напряжений σ_{\max}^x при повороте кристаллографической оси $[001]$ вокруг оси x и σ_{\max}^y при повороте оси $[001]$ вокруг оси y

Угол поворота	σ_{\max}^x , МПа	σ_{\max}^y , МПа
40°	356	254
30°	351	265
20°	341	275
10°	272	253
0°	250	250
-10°	271	245
-20°	342	234
-30°	351	246
-40°	357	255

При изменении аксиальной ориентации кристаллографических осей, температурные напряжения могут возрасти на 80% (табл. 4), в то время как при изменении

азимутальной ориентации увеличение температурных напряжений не превышает 42% (табл. 5).

Наибольшие напряжения с учетом воздействий температурных полей и центробежных сил не превышает 500 МПа. Это значительно ниже статического предела прочности для монокристаллических материалов при температуре 800°C [2]. При этом наибольшие напряжения находятся в местах максимальных градиентов температур. Как правило, это соответствует местам на поверхности охлаждающих каналов и отверстий для выхода охлаждающего воздуха. Места локализации термоупругих напряжений часто совпадают с местами локализации вибрационных напряжений [9, 10], что создает дополнительную опасность. Поэтому для оценки прочностной надежности охлаждаемых монокристаллических лопаток необходимо проводить комплексный анализ их динамического напряженного состояния при колебаниях и статического термоупругого состояния. Целесообразно ограничить повышение термоупругих напряжений величиной 270 – 350 МПа (на 30%), что соответствует повороту кристаллографических осей на 12° – 15° [1]. При этом эквивалентные напряжений в характерных точках возле входной кромки имеют наименьшие значения, а возле выходной кромки наибольшие. Такие же ограничения на поворот кристаллографических осей рекомендуются для лопаток других конструкций [4, 5], а также соответствуют условиям разброса собственных частот лопаток не более чем на 8 – 10% [6, 7].

Анализ вибрационных характеристик монокристаллической лопатки. Использование монокристаллических материалов, обладающих анизотропными свойствами приводит к изменению собственных частот лопаток. Для оценки такого влияния были проведены исследования спектров частот лопаток из монокристаллического и поликристаллического материала. Модуль упругости поликристаллического материала был принят равным модулю упругости монокристаллического материала при ориентации материала [001] вдоль оси z . Сопоставления спектров собственных частот колебаний лопатки из поликристаллического и монокристаллического материалов приведены в таблице 6. В таблице представлены относительные различия собственных частот из данных материалов [9].

Таблица 2

Сравнение спектров собственных частот лопатки из поликристаллического и монокристаллического материалов

№ частоты	Значения собственных частот лопаток из сплавов, Гц		Относительное различие частот, %
	поликристаллического	монокристаллического	
1	576	609	5.8
2	1326	1478	11.3
3	1943	2916	50
4	2940	3261	10.9
5	4881	6477	32.7
6	6067	7510	23.8
7	6733	7817	16.1
8	7560	8646	14.4
9	8524	11152	30.8
10	8934	11319	26.7

Видно повышение собственных частот лопатки из монокристаллического материала, что следовало ожидать в связи с характером анизотропии материала с границированной кубической решеткой (рис.1). Наибольшее влияние анизотропия материала оказывает на преимущественно крутильные частоты. В связи с особенностями механических свойств монокристаллического материала следует ожидать, что отклонение кристаллографических осей от исходного состояния будет существенно влиять на частотные характеристики лопаток.

Для выявления влияния отклонения кристаллографических осей на параметры колебаний, проводилась серия расчетов частот собственных колебаний с варьированием отклонений кристаллографических осей материала от осей кристаллографической ориентации монокристалла.

Лишь на некоторых формах колебаний изменение азимутальной ориентации оказывает заметное влияние на собственные частоты. Для данной лопатки такими частотами являются шестая, девятая и десятая. В качестве примера приводятся влияние аксиальной и азимутальной ориентации на собственные частоты для шестой и девятой форм колебаний (табл. 3). Частоты имеют обозначение ω_k^x , ω_k^y , где нижний индекс показывает номер частоты, а верхний ось вокруг которой осуществляется поворот кристаллографических осей.

Таблица 3

Влияние аксиальной и азимутальной ориентации кристаллографических осей на шестую и девятую собственные частоты.

Угол поворота	ω_6^x , Hz	ω_6^y , Hz	ω_6^z , Hz	ω_9^x , Hz	ω_9^y , Hz	ω_9^z , Hz
45°	7825	7825	7501	11215	10650	10770
35°	7730	7850	7490	11170	10840	10710
25°	7605	7750	7470	11160	11010	10770
15°	7540	7610	7450	11090	11060	10870
5°	7470	7510	7471	11060	11150	11010
0°	7480	7480	7480	11055	11055	11055
-5°	7490	7410	7490	11055	10910	11105
-10°	7580	7420	7505	11080	10640	11150
-25°	7700	7550	7515	11120	10420	11070
-35°	7800	7720	7506	11180	10440	10900
-45°	7825	7825	7500	11205	10648	10775

Наибольшие отклонения собственных частот лопатки при повороте кристаллографических осей вокруг различных направлений приведены в табл. 4.

Наибольшие относительные отклонения собственных частот при варьировании ориентации кристаллографических осей относительно осей x, y, z

№ собственной частоты колебаний	Величина наибольшего относительного отклонения частот при повороте вокруг направлений $x, y, z, \%$		
	x	y	z
1	26	23	0,2
2	21	12	0,01
3	13	27	0,4
4	17	19	0,2
5	5,6	11	1,0
6	4,7	5,8	1,1
7	15	9	0,2
8	17	16	1,6
9	1,4	7,1	3,5
10	1,6	5,6	0,8

Наибольшее влияние на собственные частоты оказывает отклонение аксиальной ориентации кристаллографических осей. Причем максимальное влияние возникает при повороте кристаллографических осей вокруг направления y и достигает 27%, а при повороте вокруг оси x максимальное изменение частот достигает 26%. Отклонения азимутальной ориентации кристаллографических осей оказывает значительно меньшее влияние на собственные частоты лопатки. Эти результаты соответствуют данным, полученным в работах [5 – 7] для монокристаллических лопаток с другими системами охлаждения.

Из результатов подобных исследований можно сделать вывод, что при изготовлении серии монокристаллических лопаток для ограничения разброса их собственных частот не более 10% и, учитывая другие технологические отклонения, следует обеспечить соблюдение аксиальной ориентации кристаллографических осей с точностью до 10–15° [1, 9]. Кристаллографическая ось [001] должна находиться в конусе с эллиптическим сечением параллельным плоскости xu , а углы отклонения этой оси изменяются от 10° до 15°.

Большой интерес представляют результаты анализа форм колебаний и распределения напряжений. Сложность геометрической формы охлаждаемых лопаток обуславливает и сложность форм их колебаний [9]. Но наибольший интерес вызывает анализ распределения относительных эквивалентных напряжений. Примеры расположения зоны локализации относительных интенсивностей напряжений представлены на рис. 3. Результаты численных исследований показывают, что зоны локализации относительных напряжений расположены не только на поверхности лопаток, но и на внутренней поверхности охлаждающих каналов и отверстий для выхода охлаждающего воздуха (рис. 6, 7) [9]. Эти обстоятельства следует учитывать, т.к. возможно возникновение повреждений в зонах, недоступных визуальному контролю и тензометрическим исследованиям.

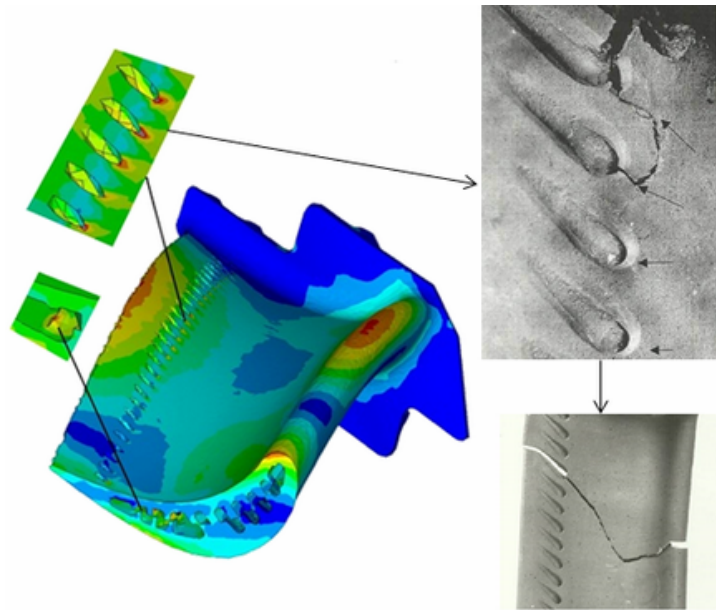


Рис.3. Зоны локализации напряжений при собственных колебаниях лопатки, возникновение трещин в этих зонах и разрушение лопатки

На этих же рисунках (рис.6 и 7) для сравнения приведены примеры возникновения трещин и повреждения в лопатках при их испытаниях на лабораторных стендах [9]. Видно, что зоны локализации вибрационных напряжений, полученные при численном анализе, являются местами зарождения трещин.

Выводы. Основной вклад в напряженно-деформированное состояние охлаждаемой лопатки вносят термоупругие напряжения. Напряжения от центробежных сил достигают значительно меньших значений и при повороте кристаллографических осей. Однако, суммарные максимальные интенсивности напряжений значительно ниже статического предела прочности для монокристаллических материалов.

Контроль напряжений на поверхности охлаждаемых каналов затруднен. Но систематические расчеты напряженно-деформированного состояния лопатки с учетом различных факторов позволяют связать напряжения на поверхности пера лопатки с напряжениями на поверхности охлаждаемых каналов, что позволяет судить о величине последних (рис.3). Это дает возможность контроля и диагностики максимальных напряжений.

Азимутальная ориентация кристаллографических осей оказывает существенное влияние на всю картину напряженно-деформированного состояния лопатки. Общая картина напряженно-деформированного состояния циклически повторяется при повороте кристаллографических осей на 90° . При этом максимальные напряжения существенно изменяются до 80%, поэтому требуется некоторое ограничение на отклонение кристаллографических осей. При изготовлении монокристаллических лопаток следует стремиться, чтобы поворот кристаллографических осей в плоскости xu не превышал $12^\circ - 15^\circ$. Изменение аксиальной ориентации кристаллографических осей вызывает повышение термических напряжений на 42%. Следует стремиться к сглаживанию по-

верхности угловых форм в охлаждающих каналах и отверстиях для выхода охлаждающего воздуха.

Выявлены закономерности влияния кристаллографических осей материала лопаток на их собственные частоты относительно осей x , y , z в широком диапазоне углов отклонения. Изменение аксиальной ориентации (отклонение от направления оси z) оказывает наибольшее влияние на собственные частоты. Изменение азимутальной ориентации оказывает некоторое влияние на высшие частоты (особенно, начиная с девятой) собственных колебаний. Однако на напряженно-деформированное состояние лопатки, вызванное температурным полем, большое влияние оказывает изменение азимутальной ориентации. Общие ограничения на изменение кристаллографических осей с учетом термоупругих, вибрационных напряжений и спектра собственных частот схематически представлено на рис. 4 [11].

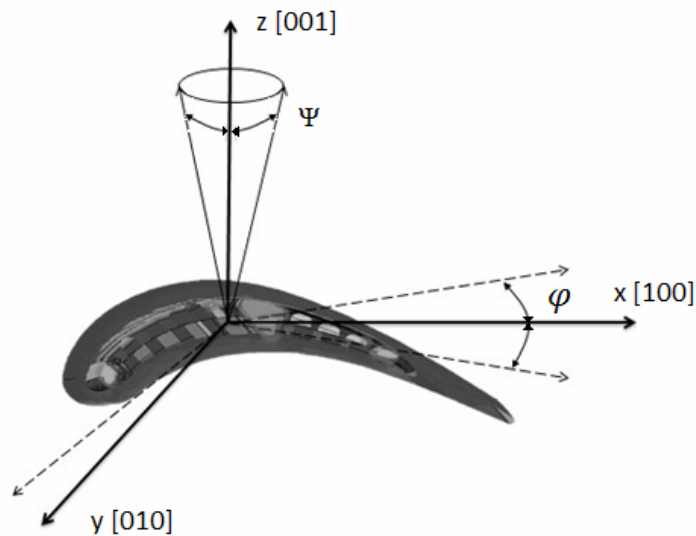


Рис. 4. Схема ограничений на изменение ориентации кристаллографических осей охлаждаемой лопатки

Кристаллографическая ось $[001]$ не должна выходить за пределы конуса. Угол ψ составляет $14^\circ - 15^\circ$. Угол φ меняется в пределах $12^\circ - 15^\circ$.

Следует учитывать опасность возникновения зон локализации и повышения относительных вибрационных напряжений на внутренней поверхности охлаждающих каналов и отверстий для выхода охлаждающего воздуха, что ведет к повреждениям в местах, недоступных для визуального контроля.

Магистральные трещины в монокристаллических лопатках распространяются преимущественно вдоль кристаллографических осей, хотя распространение конкретных трещин может иметь более сложный характер.

Анализ особенностей колебаний и термоупругих напряжений монокристаллических лопаток является достаточно сложным и требует детальнейших исследований.

Окончательные требования к изготовлению конкретных охлаждаемых лопаток могут быть выявлены при совместной работе представителей научных организаций и промышленных предприятий [1, 3, 9, 12].

Литература: 1. Ножницкий Ю.А., Голубовский Е.Р. Монокристаллические рабочие лопатки высокотемпературных ГДТ // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. - №9 (35). – С.117 – 123. 2. Шалин Р.Е. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / Р.Е.Шалин, И.Л.Светлов, Е.Б.Качанов и др. – М.:Машиностроение, 1997. – 336 с. 3. Maclachlan, D. W. and D.M. Knowles. 2002. The effect of materials behavior on the analysis of single-crystal turbine blade. Part II – component analysis. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 25: 399–409. 4. Придорожный Р.П. Оценка влияния азимутальной ориентации на напряженность монокристаллической охлаждаемой лопатки в системе перфорационных отверстий / Р.П. Придорожный, А.В.Шереметьев, А.П. Зиньковский // *Вестник двигателестроения*. - 2013. - №1. - С.53-57. 5. Мельникова Г.В. Влияние кристаллографической ориентации монокристалла и ее технологического разброса на частотный спектр турбинных лопаток / Г.В.Мельникова, Б.Ф.Шорр, Л.А.Маггеррамова, Д.А.Протопопова // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2001. - Выпуск 26. – С. 140-144. 6. Придорожный Р.П. Влияние кристаллографической ориентации на спектр собственных частот и форм колебаний монокристаллических рабочих лопаток турбин / Р.П.Придорожный, А.В.Шереметьев, А.П.Зиньковский // *Вестник двигателестроения* – 2006. - №2. – С. 42-48. 7. Придорожный Р.П. Влияние кристаллографической ориентации на спектр собственных колебаний и предел выносливости монокристаллических рабочих лопаток турбин / Р.П.Придорожный, А.В.Шереметьев, А.П.Зиньковский // *Проблемы прочности*. - 2008. - №5. - С.15-27. 8. Маггеррамова Л.А., Васильев Б.Е. Влияние азимутальной ориентации монокристалла на напряженно-деформированное состояние и прочность лопаток высокотемпературных газовых турбин // *Вестник УГАТУ, Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки ЛА*. – Уфа. – 2011. - №4(44). – С. 54-58. 9. Воробьев Ю.С. Особенности температурного и термоупругого состояния монокристаллической охлаждаемой лопатки ГТД / Воробьев Ю.С., Овчарова Н.Ю., Берлизова Т.Ю., Кулишов С.Б., Скрицкий А.Н. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Харьков: НАКУ «ХАИ» – 2014. 10 (117). – С. 75 – 78. 10. Vorobiov, Yu.S., K.Yu. Dyakonenko, S.B. Kulishov, A.N. Skritskij and R. Zhondkovski. 2014b. Vibration characteristics of cooled single-crystal gas turbine blades. *Journal of vibration engineering & technologies*. 2(6): 537–541. 11. Воробьев Ю.С. Влияние ориентации кристаллографических осей на термонапряженное состояние монокристаллической охлаждаемой лопатки / Воробьев Ю. С., Берлизова Т. Ю., Овчарова Н. Ю. // *Вісник Запорізького національного університету*. – Запоріжжя. – 2017. - №1. – С. 57 – 64. 12. Caron, P., F. Diologent and S. Drawin. 2011. Influence of chemistry on the tensile yield strength of nickel-based single crystal superalloys. *Euro Superalloys 2010. Trans. Tech. Publication, Switzerland: Advanced Materials Research*. 278:345–350.

Bibliography (transliterated): 1. Nozhnitskiy YU.A., Golubovskiy Ye.R. Monokristallicheskiye rabochiye lopatki vysokotemperaturnykh GDT // *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. – 2006. - №9 (35). – S.117 – 123. 2. Shalin R.Ye. Monokristally nikelovykh zharoprochnykh spлавov / R.Ye.Shalin, I.L.Svetlov, Ye.B.Kachanov i dr. – M.:Mashinostroyeniye, 1997. – 336 s. 3. Maclachlan, D. W. and D.M. Knowles. 2002. The effect of materials behavior on the analysis of single-crystal turbine blade. Part II – component analysis. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 25: 399–409. 4. Pridorozhnyy R.P. Otsenka vliyaniya azimutal'noy oriyentatsii na napryazhennost' monokristallicheskoй okhlazhdayemoy lopatki v sisteme perforatsionnykh otverstiy / R.P. Pridorozhnyy, A.V.Sheremet'yev, A.P. Zin'kovskiy // *Vestnik dvigatelestroyeniya*. - 2013. - №1. - S.53-57. 5. Mel'nikova G.V. Vliyaniye kristallograficheskoy oriyentatsii monokristalla i yeye tekhnologicheskogo razbrosa na chastotnyy spektr turbinnykh lopatok / G.V.Mel'nikova, B.F.Shorr, L.A.Magerramova, D.A.Protopopova // *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2001. - Vypusk 26. – S. 140-144. 6. Pridorozhnyy R.P. Vliyaniye kristallograficheskoy oriyentatsii na spektr sobstvennykh chastot i form kolebaniy monokristallicheskiykh rabochikh lopatok turbin / R.P.Pridorozhnyy, A.V.Sheremet'yev, A.P.Zin'kovskiy // *Vestnik dvigatelestroyeniya* – 2006. - №2. – S.

42-48. 7. Pridorozhnyy R.P. Vliyaniye kristallograficheskoy oriyentatsii na spektr sobstvennykh kolebaniy i predel vynoslivosti monokristallicheskiykh rabochikh lopatok turbin / R.P.Pridorozhnyy, A.V.Sheremet'yev, A.P.Zin'kovskiy // *Problemy prochnosti*. - 2008. - №5. - S.15-27. 8. Maggerramova L.A., Vasil'yev B.Ye. Vliyaniye azimutal'noy oriyentatsii monokristalla na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye i prochnost' lopatok vysokotemperaturnykh gazovykh turbin // *Vestnik UGATU, Teplovyye, elektroraketnyye dvigateli i energoustanovki LA*. - Ufa. - 2011. - №4(44). - S. 54-58. 9. Vorob'yev YU.S. Osobennosti temperaturnogo i termouprugogo sostoyaniya monokristallicheskoy okhlazhdayemoy lopatki GTD / Vorob'yev YU.S., Ovcharova N.YU., Berlizova T.YU., Kulishov S.B., Skritskiy A.N. // *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. - Khar'kov: NAKU «KHAI» - 2014. 10 (117). - S. 75 - 78. 10. Vorobiov, Iu.S., K.Yu. Dyakonenko, S.B. Kulishov, A.N. Skritskij and R. Zhondkovski. 2014b. Vibration characteristics of cooled single-crystal gas turbine blades. *Journal of vibration engineering & technologies*. 2(6): 537-541. 11. Vorob'yev YU.S. Vliyaniye oriyentatsii kristallograficheskikh osey na termonapryazhennoye sostoyaniye monokristallicheskoy okhlazhdayemoy lopatki / Vorob'yev YU. S., Berlizova T. YU., Ovcharova N. YU. // *Visnik Zaporiz'kogo natsional'nogo universitetu*. - Zaporizhzhya. - 2017. - №1. - S. 57 - 64. 12. Caron, P., F. Diologent and S. Drawin. 2011. Influence of chemistry on the tensile yield strength of nickel-based single crystal superalloys. *Euro Superalloys 2010. Trans. Tech. Publication, Switzerland: Advanced Materials Research*. 278:345-350.

Воробьев Ю. С., Жондковски Р., Берлизова Т. Ю., Овчарова Н. Ю.

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМОУПРУГОГО И ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЙ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛОПАТКИ С ВИХРЕВОЙ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

Рассматривается монокристаллическая лопатка с вихревой системой охлаждения. Исследуется влияние изменения ориентации кристаллографических осей на вибрационные характеристики и термоупругое состояние лопатки. Используются трехмерная модель и метод конечных элементов. Выполнена оценка ограничений на изменение ориентаций кристаллографических осей.

Воробйов Ю. С., Жондковські Р., Берлізова Т. Ю., Овчарова Н. Ю.

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ТЕРМОПРУЖНОГО ТА ВІБРАЦІЙНОГО СТАНУ МОНОКРИСТАЛІЧНОЇ ЛОПАТКИ З ВИХРОВОЮ СИСТЕМОЮ ОХОЛОДЖЕННЯ

Розглядається монокристалічна лопатка з вихровою системою охолодження. Досліджується вплив зміни орієнтації кристаллографічних осей на вібраційні характеристики і термопружний стан лопатки. Використовуються тривимірна модель і метод скінчених елементів. Виконано оцінку обмежень на зміну орієнтацій кристаллографічних осей.

Yu. Vorobiov, R. Zhondkovski, T. Berlizova, N. Ovcharova

COMPLEX ANALYSIS OF THERMO-ELASTIC AND VIBRATIONAL STATE OF A SINGLE-CRYSTAL BLADE WITH A VORTEX COOLING SYSTEM

A single-crystal blade with a vortex cooling system is considered. The effect of changing the orientation of the crystallographic axes on the vibrational characteristics and the thermoelastic state of the blade is investigated. The three-dimensional model and the finite element method are used. The bounds on the changes in orientations of the crystallographic axes are estimated.