

УДК 539.3

М.А. Чугай

Институт проблем машиностроения имени А.Н. Подгорного НАН Украины

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛОПАТОК С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

В работе проведен анализ колебаний монокристаллической лопатки с повреждениями. Расчеты проводились на основе трехмерных моделей методом конечных элементов с использованием специальных конечных элементов, которые отражают особенности напряженно-деформированного состояния в окрестности вершины трещины. При численном анализе учитывалось, что пространственная ориентация трещин в монокристаллических лопатках зависит от расположения кристаллографических осей.

Ключевые слова: рабочие лопатки, монокристаллический материал, повреждения, метод конечных элементов, формы колебаний, локализация напряжений.

Введение

Проблема продления надежности и ресурса турбомашин весьма актуальна для современного машиностроения. Наиболее нагруженным и ответственным элементом турбоагрегатов является лопаточный аппарат, для которого основную опасность представляют вибрационные нагрузки. Наибольшее число отказов турбин в течение всего срока эксплуатации связано с возникновением усталостных трещин в рабочих колесах, поэтому они и были выбраны в качестве объекта исследования.

Монокристаллические лопатки турбин современных ГТД работают в условиях высоких температур и интенсивных вибрационных нагрузок. Эти лопатки отличаются сложностью конструкции и неоднородностью материала, вызванной как монокристаллической структурой материала, так и воздействием температурных полей. Вопросам влияния монокристаллической структуры на прочность и колебания лопаток посвящен ряд работ [1 – 4].

Монокристаллические лопатки, как и поликристаллические, в процессе эксплуатации могут получить повреждения, в том числе в виде трещин. Влияние повреждений на спектр частот, формы, распределение и локализацию напряжений в поликристаллических лопатках рассмотрено в ряде работ, в частности в [2 – 4]. Данные проблемы для монокристаллических лопаток имеют ряд особенностей и нуждаются в специальных исследованиях. В работе [2] на основе экспериментальных исследований показано, что магистральные трещины в монокристаллических лопатках распространяются вдоль кристаллографических осей. Для образцов и лопаток с аксиальной ориентацией [001] они расположены под углами 35–45° к оси, а для аксиальной ориентации [111] трещины могут располагаться под углами 15–20° к оси. Кроме того, направление магистраль-

ных трещин зависит от азимутальной ориентации материала [2]. В ряде случаев возможно появление трещин в направлении перпендикулярно оси z . Этот случай рассмотрен в работе [3]. Однако наибольший интерес представляют исследования колебаний монокристаллических лопаток с трещинами, расположенными под углом к продольной оси лопатки. При решении таких задач используются трехмерные конечноэлементные модели. В области расположения трещины возникают большие градиенты деформаций и напряжений, что вызывает необходимость использования специальных конечных элементов, отражающих эти особенности.

Цель работы. Целью работы является проведение моделирования возникающих в монокристаллической лопатке повреждений с использованием сингулярных конечных элементов, анализ распределения вибрационных напряжений и влияния свойств материала, а также ориентации кристаллографических осей на спектр собственных частот, форм и распределение относительных напряжений при колебаниях рабочих монокристаллических лопаток.

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 границентрированную кубическую решетку [5]. Схемати-

чески ее структура с обозначением основных направлений КГО представлена на рис. 1.

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.

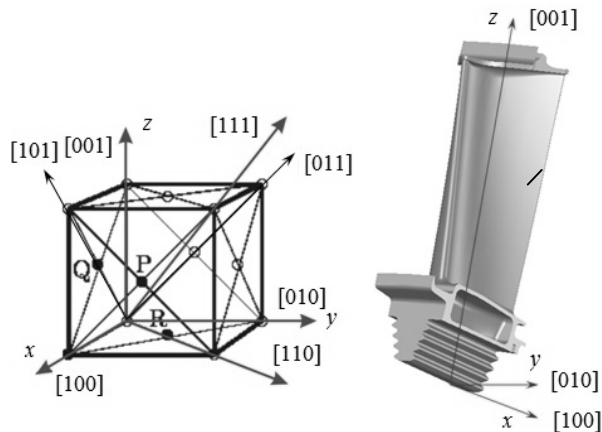


Рис. 1. Структура монокристалла, геометрия лопатки и схема расположения осей КГО [100], [010], [001] при совпадении с осями x, y, z

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 моделей лопаток в работе использовался изопараметрический 20-узловой конечный элемент в криволинейной системе координат, учитывающий неоднородность монокристаллического материала.

Для описания особенностей распределения перемещений, деформаций и напряжений в области фронта трещины используются специальные 15-узловые конечные элементы, построение которых описано в работах [3, 4, 6, 7]. Такие так называемые «сингулярные» элементы имеют такие важные свойства: они обеспечивают особенности типа $O(\gamma^{-1/2})$ для напряжений, где γ – расстояние от фронта трещины, полностью совместимы с обычными квадратичными элементами, отображают деформацию тела как целого, для них остаются справедливыми теоремы о сходимости решения к точному для обычных элементов. Из этих элементов можно построить розетку элементов вокруг вершины трещины, которая совместима с общей сеткой конечных элементов [6, 7].

Численный анализ

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 собственных частот (Гц) для поликристаллической и монокристаллических лопаток с различной КГО с трещиной и без трещины

Тон колебаний	Поликристаллический материал		Монокристаллический материал			
	Лопатка без трещины	Лопатка с трещиной	Лопатка без трещины КГО [001]	Лопатка с трещиной КГО [001]	Лопатка без трещины КГО [111]	Лопатка с трещиной КГО [111]
f1	834	833	926	881	1039	1020
f2	1488	1486	1829	1823	1983	1904
f3	2412	2410	3062	2895	3409	3329
f4	3142	3101	3683	3555	4086	4020
f5	4557	4536	5826	5821	6131	6034
f6	5714	5692	7110	7069	7453	7452
f7	7743	7717	9525	9362	10285	10191
f8	8219	8190	10143	9868	11080	11072
f9	9332	9182	11323	11375	12256	12073
f10	10363	10339	11507	11981	13610	13557

Переход к монокристаллическому материалу с КГО [001] вызывает наиболее сильное повышение собственных частот для преимущественно крутильных колебаний (третья, четвертая и седьмая частоты), а переход к материалу с КГО [111] – для преимущественно изгибных и более сложных форм колебаний.

Хорошо видно, что наличие трещины мало влияет на частоты лопатки из поликристаллического материала. Это объясняется тем, что частоты являются интегральными характеристиками, и на них влияют только достаточно развитые трещины.

В то же время оказывается, что трещины более существенно влияют на частоты лопатки из монокристаллического материала, особенно с КГО [111] и [001]. Для лопатки с КГО [001] влияние трещины наиболее заметно на третью, четвертую, седую и восьмую частоты, а с КГО [111] – на третью и пятую.

Разумеется, наличие трещин существенно влияет на поля перемещений и, особенно, напряжений. Возникает явно выраженная локализация напряжений в области устья трещины. При численных расчетах трещины располагались в местах, где они возникали на практике, или имеются наибольшие напряжения в лопатке без повреждений.

В качестве примера проведенных исследований на рис. 2 – 5 приведены поля интенсивностей напряжений в зоне устья трещины в лопатках ГТД из поликристаллического и монокристаллических материалов с различными КГО при колебании по четвертой и восьмой формам. Для всех лопаток угол расположения трещины был принят 45° для возможности сопоставления результатов.

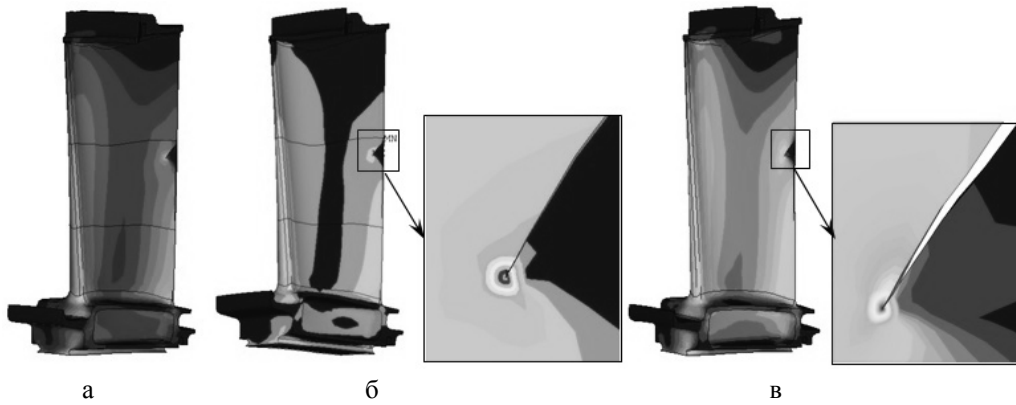


Рис. 2. Поля относительных интенсивностей напряжений на 1-й форме колебаний лопаток: поликристаллической (а), монокристаллической с КГО [001] (б) и монокристаллической с КГО [111] (в)

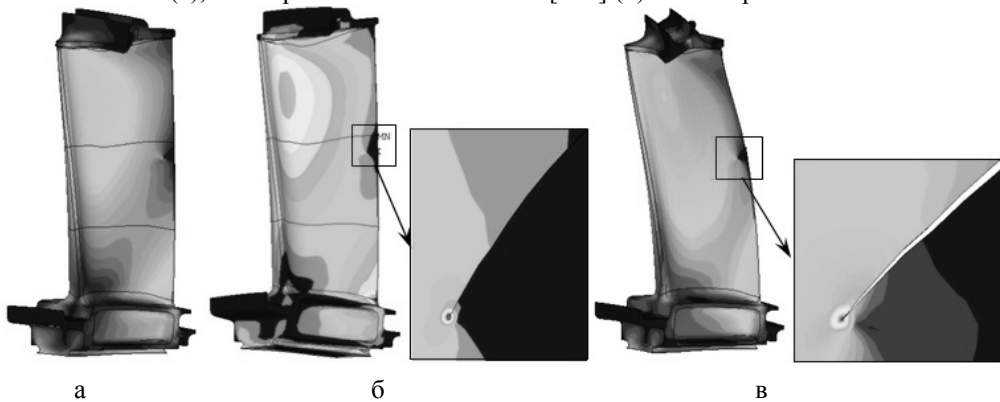


Рис. 3. Поля относительных интенсивностей напряжений на 2-й форме колебаний лопаток: поликристаллической (а), монокристаллической с КГО [001] (б) и монокристаллической с КГО [111] (в)

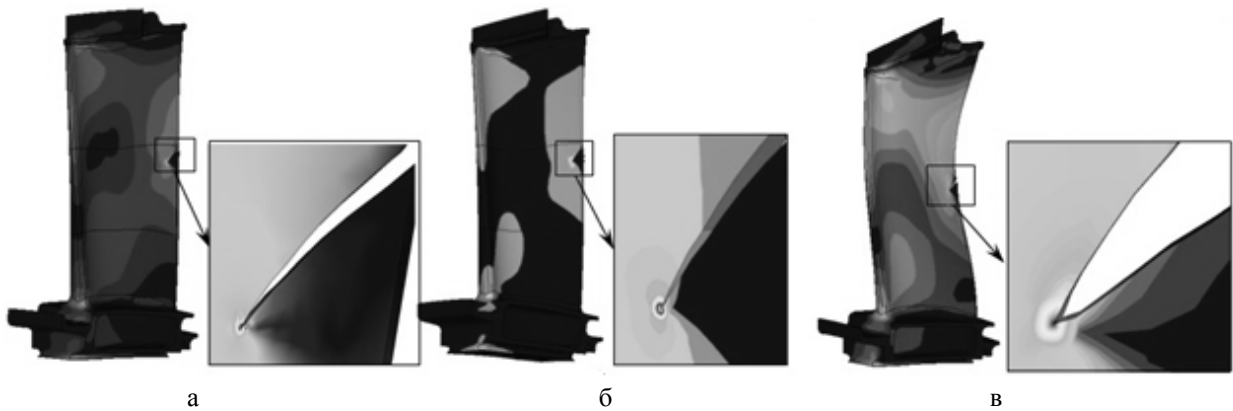


Рис. 4. Поля относительных интенсивностей напряжений на 4-й форме колебаний лопаток: поликристаллической (а), монокристаллической с КГО [001] (б) и монокристаллической с КГО [111] (в)

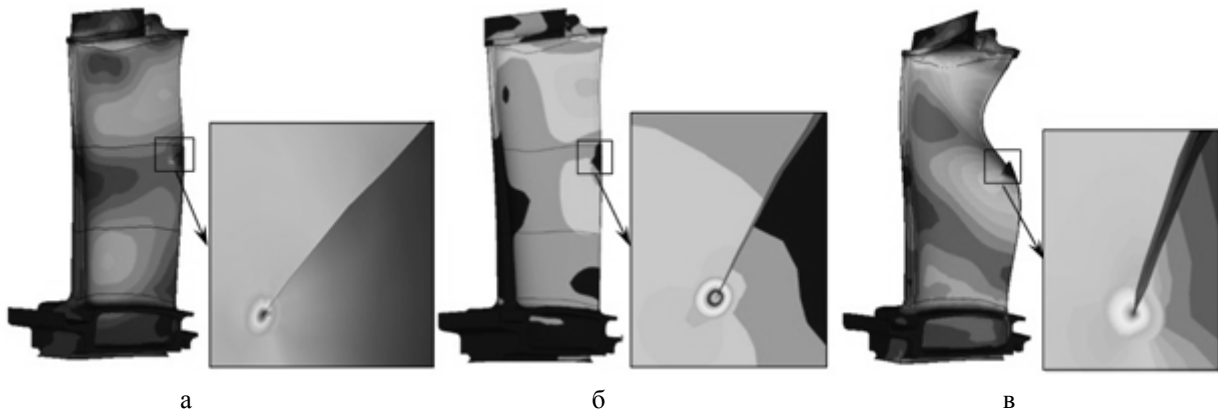


Рис. 5. Поля относительных интенсивностей напряжений на 6-й форме колебаний лопаток: поликристаллической (а), монокристаллической с КГО [001] (б) и монокристаллической с КГО [111] (в)

Известно, что распределение напряжений в поликристаллической лопатке с трещиной существенно изменяется. Похожая картина наблюдается в лопатках из монокристаллических материалов. Видно возникновение локализации напряжений с большими градиентами в области устья трещины, и влияние материала лопатки на характер локализации напряжений. Кроме того, следует отметить влияние угла расположения трещины.

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.

Материал с КГО [001] оказывает большее влияние на частоты преимущественно крутильных колебаний, а материал с КГО [111] – на частоты преимущественно изгибных колебаний.

Влияние повреждений на частоты и распределение относительных напряжений зависит как от материала лопатки, так и от формы колебаний. Для ряда форм колебаний влияние повреждения более сказывается на монокристаллические лопатки, чем на поликристаллические.

Выбор наиболее рационального КГО материала лопатки зависит от ее конструктивных особенностей и частотного диапазона, в котором будут возбуждаться наиболее интенсивные колебания, и от возможного ожидаемого расположения повреждений.

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. Голубовский Е.Р. Экспериментальная оценка сопротивления многоциклового усталости монокристаллов никелевых сплавов и монокристаллических лопаток ГТД / Е.Р. Голубовский, Н.Д. Жуков, А.Н. Стадников, С.А. Черкасова, А.Н. Петухов // *Прочность материалов и элементов конструкций: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. В 2 т.* – К.: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2010. – Т.1. – С. 104-105.
3. Воробьев Ю.С. Влияние повреждений на колебания монокристаллических лопаток / Ю.С. Воробьев, М.А. Чугай // *Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла: Зб. наукових праць*. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2010. – Вип. 11. – С. 64-70.
4. Чугай М.А. Особенности моделирования напряжений в окрестности вершины трещины при колебаниях лопаточного аппарата турбомашин / М.А. Чугай // *Проблемы машиностроения*. – 2014. – №3. – С. 25-33.
5. Vorobiov Iu.S. Analysis of turbomachinery blading vibrations using new materials / Iu.S. Vorobiov, M. Chugay, J.S. Rao, R. Rzakowski, S.B. Kulishov, A.N. Skritskij // *Journal of vibration engineering & technologies*. – December 2014. – Vol. 2, No. 6. – P. 529-535.
6. Сиратори М. Вычислительная механика разрушения: пер. с японск. / М. Сиратори, Т. Миесси, Х. Мацусита. – М.: Мир, 1986. – 334 с.
7. Морозов Е.М. Метод конечных элементов в механике разрушения / Е.М. Морозов, Г.П. Никишков. – М.: Наука, 1980. – 354 с.

Поступила в редколлегию 12.01.2015

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

АНАЛІЗ РОЗПОДІЛУ ВІБРАЦІЙНИХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ КОЛИВАННЯХ В МОНОКРИСТАЛІЧНИХ ЛОПАТКАХ З ПОШКОДЖЕННЯМИ

М.О. Чугай

В роботі проведено аналіз коливань монокристалічної лопатки з пошкодженнями. Розрахунки проводилися на підставі тривимірних моделей методом скінченних елементів з використанням спеціальних скінченних елементів, що відображають особливості напружено - деформівного стану в околі вершини тріщини. При чисельному аналізі враховувалось, що просторова орієнтація тріщини в монокристалічних лопатках залежить від положення кристаллографічних осей. Досліджено вплив кристаллографічної орієнтації та пошкоджень на власні частоти, форми коливань та локалізацію інтенсивностей напружень.

Ключові слова: робочі лопатки, монокристалічний матеріал, пошкодження, метод кінцевих елементів, форми коливань, локалізація напружень.

ANALYSIS OF DISTRIBUTING OF VIBRATIONS STRESSES IN SINGLE-CRYSTAL BLADES WITH DAMAGES

M.A. Chugay

The work presents an analysis of vibrations of single crystal turbine blade with damage. The calculations was spent on the basis of the 3D models by finite elements method with the use of the special singular finite elements that account for the stress localization effect in the crack apex. At a numerical analysis taken into account, that the spatial orientation of cracks in one single-crystal blades depended on the crystallography axes orientation. Influence of crystallographic anisotropy and damages on natural frequencies, modes and stress intensities localizations is estimated.

Keywords: workings shoulder-blades, single-crystal material, damages, method of eventual elements, forms of vibrations, localization of tensions.