

УДК 539.3

Ю.С. ВОРОБЬЕВ, М.А. ЧУГАЙ

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

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛОПАТКАХ 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. Исследовано влияние кристаллографической ориентации на собственные частоты, формы колебаний и распределение интенсивностей напряжений.

Ключевые слова: рабочая лопатка, монокристаллический материал, повреждения, метод конечных элементов, формы колебаний, локализация напряжений.

Введение

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 – 5].

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 $35 - 45^\circ$ к оси, а для аксиальной ориентации [111] трещины могут располагаться под углами $15 - 20^\circ$ к оси. Кроме того, направление магистральных 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, располо-

женными 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.

1. Постановка задачи

Рассматривается неохлаждаемая лопатка ГТД из монокристаллического никелевого жаропрочного сплава. Геометрическая форма лопатки и расположение кристаллографических осей [100], [010], [001] при их совпадении с осями x , y , z представлено на рис. 1.



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

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 – 5]. Такие так называемые «сингулярные» элементы имеют такие важные свойства: они обеспечивают особенности типа $O(r^{-1/2})$ для напряжений, где r – 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 элемен-

тов. Из этих элементов можно построить розетку элементов вокруг вершины трещины, которая совместима с общей сеткой конечных элементов [3, 4].

2. 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 [3], а на рис. 2, 3 поля интенсивностей напряжений при колебаниях лопаток с трещинами.

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.

Таблица 1

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

№ п/п	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]
1	834	833	926	881	1039	1020
2	1488	1486	1829	1823	1983	1904
3	2412	2410	3062	2895	3409	3329
4	3142	3101	3683	3555	4086	4020
5	4557	4536	5826	5821	6131	6034
6	5714	5692	7110	7069	7453	7452
7	7743	7717	9525	9362	10285	10191
8	8219	8190	10143	9868	11080	11072
9	9332	9182	11323	11375	12256	12073
10	10363	10339	11507	11981	13610	13557

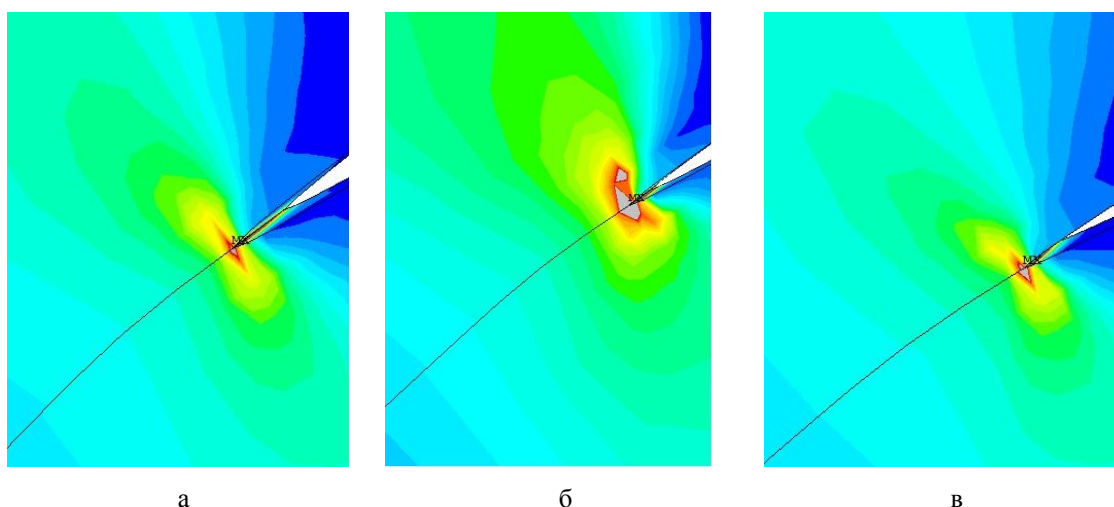


Рис. 2. Поля интенсивностей напряжений вблизи устья трещины в лопатках из поликристаллического (а) и монокристаллических материалов с КГО [001] (б) и [111] (в) при колебаниях по четвертой форме

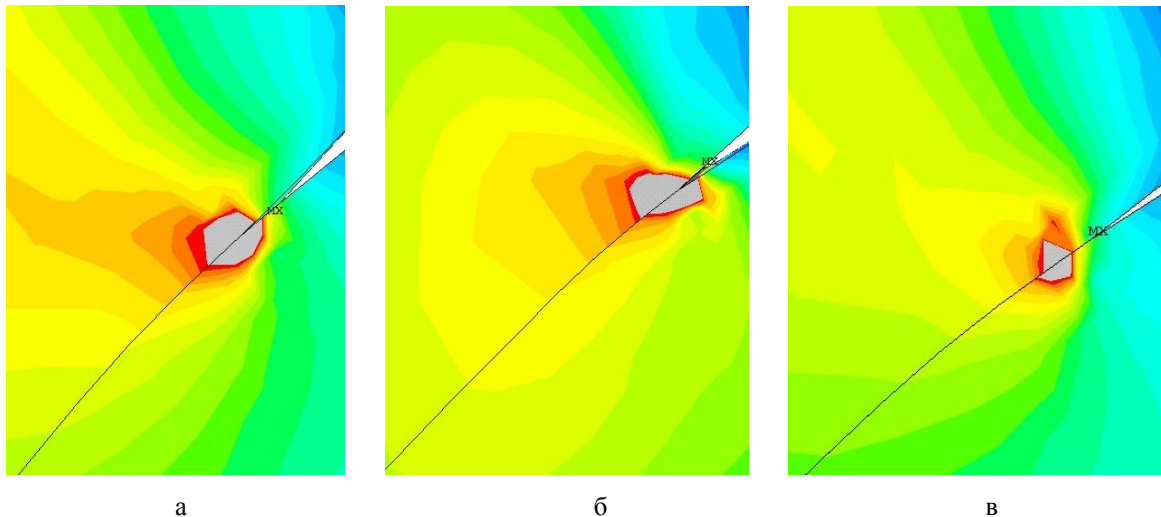


Рис. 3. Поля интенсивностей напряжений вблизи устья трещины в лопатках из поликристаллического (а) и монокристаллических материалов с КГО [001] (б) и [111] (в) при колебаниях по восьмой форме

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, 3 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.

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.

Литература

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. 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. Международ. 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 // Методы розв'язування при-

кладних задач механіки деформівного твердого тіла: зб. наукових праць. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2010. – Вип. 11. – С. 64-70.

4. Vorobyov Yu. The influence of damages on vibration stress localization in turbomachine blading / Yu. Vorobyov, M. Chugay, R. Rzadkowski // IFToMM International Symposium on "Dynamics of Steam and Gas Turbines", 1-3 December 2009, Gdansk, Poland – P. 263-273.

5. Сиратори М. Вычислительная механика разрушения: пер. с японск. / М. Сиратори, Т. Миесси, Х. Мацусита. – М.: Мир, 1986. – 334 с.

Поступила в редакцию 30.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., ведущий научный сотрудник отдела тонкостенных конструкций Е.А. Стрельникова, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина.

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ ВІБРАЦІЙНИХ НАПРУЖЕНЬ В МОНОКРИСТАЛІЧНИХ ЛОПАТКАХ З ПОШКОДЖЕННЯМИ

Ю.С. Воробйов, М.О. Чугай

У 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 кристалографічних осей. Досліджено вплив кристалографічної орієнтації та пошкоджень на власні частоти, форми коливань та локалізацію інтенсивностей напружень.

Ключові слова: робоча лопатка, монокристалічний матеріал, пошкодження, метод скінченних елементів, форми коливань, локалізація напружень.

PECULIARITIES OF DISTRIBUTING OF VIBRATIONS STRESSES IN ONE SINGLE-CRYSTAL BLADES WITH DAMAGES

Yu.S. Vorobiov, 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 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.

Key words: turbomachine blade, one single crystal material, damage, finite elements, vibrations, stress localization.

Воробьев Юрий Сергеевич – д-р техн. наук, проф., зав. отделом нестационарных механических процессов Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua.

Чугай Марина Александровна – канд. техн. наук, научный сотрудник отдела нестационарных механических процессов Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: chugay@ipmach.kharkov.ua.