

УДК 539.3

**Ю.С. ВОРОБЬЕВ¹, В.Н. РОМАНЕНКО¹, К.Д. ТЫРТЫШНИКОВ²,
С.Б. КУЛИШОВ³, А.Н. СКРИЦКИЙ³**¹ *Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков*² *Национальный технический университет «ХПИ», Украина*³ *ГП НТКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина*

АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОЧНОГО АППАРАТА КОМПРЕССОРА ГТД

Проведен анализ особенностей статических деформаций и колебаний лопаток четырех ступеней компрессора газотурбинного двигателя. Учитывалось влияние центробежных сил, свойства материала и условия закрепления лопаток. Используются трехмерные конечно-элементные модели лопаток и метод конечных элементов. Показано влияние центробежных сил и особенностей геометрии лопаток на статические деформации, спектр собственных частот, формы колебаний, распределение и локализацию относительных интенсивностей напряжений в лопатках четырех ступеней компрессора газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: *Компрессорные лопатки, газотурбинные двигатели, колебания, статика, центробежные силы, распределение напряжений.*

Введение и постановка задачи

Компрессорные лопатки, как и весь лопаточный аппарат, современных газотурбинных двигателей является одним из наиболее напряженных элементов и подвержен действию интенсивных статических и динамических нагрузок. Хотя они работают при более низких температурах, чем турбинные лопатки, но ряд особенностей их конструкции требуют тщательного совместного анализа их статики и колебаний. Тонкий профиль лопаток и отсутствие межлопаточных связей приводят к их значительным деформациям в поле центробежных сил, в частности, к раскрутке.

Эти же особенности конструкции вызывают необходимость анализа весьма высоких тонов колебаний со сложными формами. Следует учитывать, что колебания компрессорных лопаток в поле центробежных сил происходят вокруг их деформированного состояния. Профили лопаток имеют различную кривизну со стороны спинки и корыта. Поэтому, несмотря на тонкий профиль, геометрия пера не может быть с достаточной степенью точности описана с помощью теории оболочек.

Для лопатки с ножкой и замком следует использовать трехмерные модели. На основе опыта построения конечноэлементных моделей для лопаток различных типов [1 – 4] была выбрана конечноэлементная сетка из десятиузловых тетраэдров с шестью степенями свободы в каждом узле. Функции

форм таких элементов позволяют описать непрерывное и гладкое изменение напряжений.

Анализировались статические деформации и колебания лопаток четырех первых ступеней компрессора. Лопатки изготовлены из титанового сплава. Наиболее сложную форму имеет лопатка первой ступени. Перо лопатки сужается от входной кромки к выходной. Хорда профиля расширяется от корневого сечения к периферии. Лопатка имеет большую закрутку и парусность, ножку и замок с двумя зубцами. Геометрическая форма лопаток последующих ступеней не усложняется.

Использованные модели позволяют с необходимой точностью описать высшие формы колебаний и распределение напряжений.

1. Анализ статической деформации лопаток под действием центробежных сил

Под действием центробежных сил происходит статическая деформация лопаток, в частности их раскрутка. Наибольшие деформации испытывают лопатки первой ступени.

Ни рис. 1, а представлены статические деформации лопатки. Чтобы наглядно показать раскрутку лопатки, представлен вид сверху с контуром недеформированной лопатки.

На рис. 1, б представлено распределение интенсивностей напряжений. В связи с парусностью ло-

патки наибольшие напряжения возникают не только вблизи корневого сечения, но и в верхней трети пера.

Наибольшие интенсивности напряжений не превышают значений 500 МПа, то есть деформации происходят в упругой области.

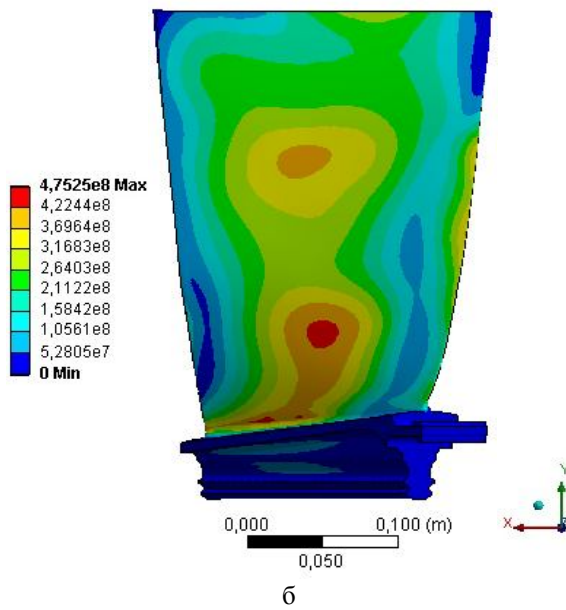
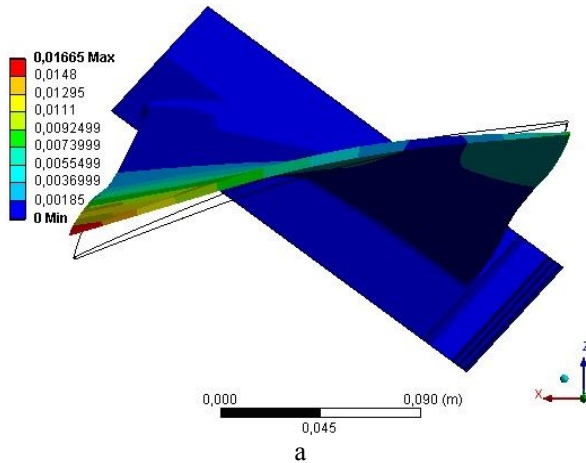


Рис. 1. Поля перемещений (а) и интенсивностей напряжений (б) в лопатке I ступени компрессора

Деформации лопаток компрессора под действием центробежных сил происходят в упругой стадии, но их необходимо учитывать при анализе колебаний лопаток в поле центробежных сил.

В лопатках II, III и IV ступеней величины перемещений и интенсивностей напряжений заметно ниже, чем для лопаток I ступени, а зона наибольших напряжений лежит вблизи корневого сечения (рис. 2).

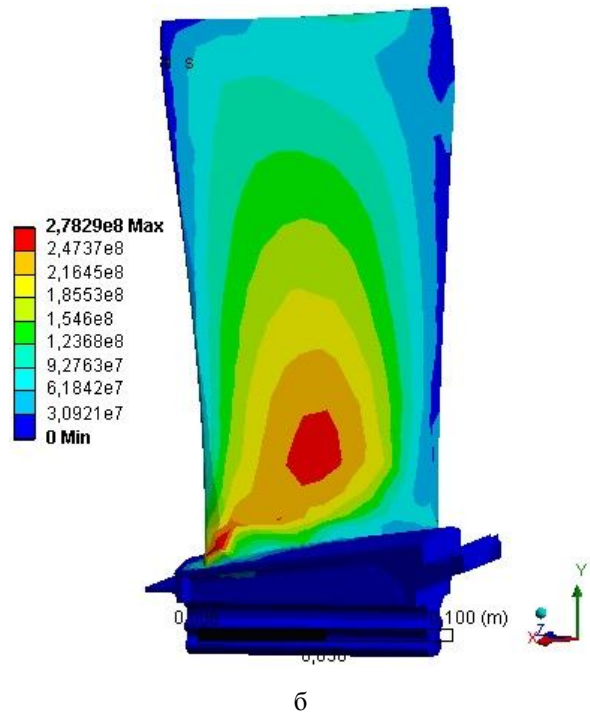
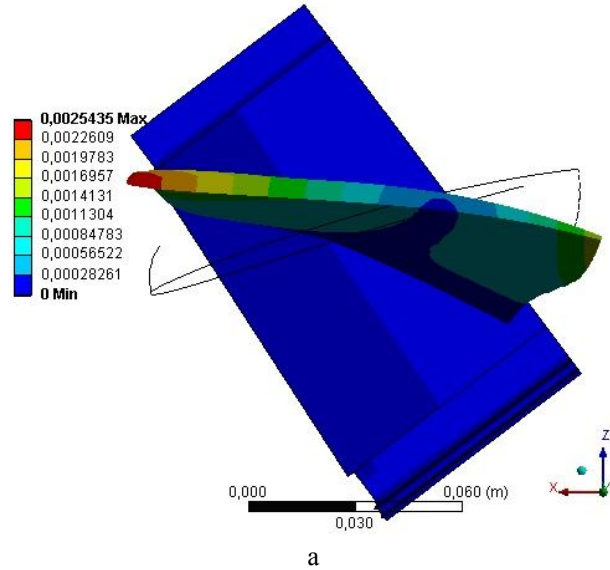


Рис. 2. Статические перемещения (а) и распределения интенсивностей напряжений (б) в лопатке II ступени компрессора

2. Анализ колебаний лопаток компрессора

Анализировались колебания лопаток четырех ступеней компрессора при отсутствии вращения ротора и в поле центробежных сил. Колебания в последнем случае происходят вокруг деформированного положения лопаток. Собственные частоты лопаток для 10 первых форм колебаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

Собственные частоты лопаток компрессора ГТД

№ формы колебаний	1 ступень		2 ступень		3 ступень		4 ступень	
	$\omega = 0$ рад/с	$\omega = 837$ рад/с	$\omega = 0$ рад/с	$\omega = 837$ рад/с	$\omega = 0$ рад/с	$\omega = 837$ рад/с	$\omega = 0$ рад/с	$\omega = 837$ рад/с
1	132	216	226,04	308,34	264	368	323,21	402,35
2	347	436	766,7	802,02	1012	1091	1193,3	1261,1
3	551	611	932,37	968,68	1311	1341	1508,3	1536,9
4	768	794	1485,4	1538,1	2144	2185	2454,9	2492,5
5	856	980	2236,7	2264,3	2962	3037	3397,0	3452,5
6	1203	1296	2768,1	2836,9	3340	3402	3840,6	3911,1
7	1586	1604	3035,2	3046,5	5121	5184	5644,6	5700,4
8	1612	1702	3752,1	3790,7	5571	5635	6046,3	6066,7
9	1801	1897	4586,5	4655,1	6252	6274	6690,8	6770,9
10	1939	2024	5091,5	5100,0	7383	7420	8368,6	8429,6

Видно, что вращение ротора оказывает наибольшее влияние на низшие частоты колебаний и значительно меньше на высшие.

Для наименее жесткой лопатки I ступени только три первые формы колебаний можно рассматривать как преимущественно изгибно-крутильные.

Четвертая форма колебаний имеет две узловые линии вдоль длины лопатки, что свидетельствует о деформации на периферии ее сечений в своей плоскости (рис. 3, а).

Наибольшие относительные напряжения наблюдаются на периферии пера лопатки (рис. 3, б).

Появление «оболочечных» форм колебаний и деформации сечений в своей плоскости наблюдается у лопаток II ступени, начиная с 7 формы колебаний, у лопаток III ступени, начиная с 9 формы, у лопаток IV ступени – с 8 формы.

Формы колебаний практически не изменяются при учете вращения лопаток. Центробежные силы также слабо влияют на распределение интенсивностей напряжений. Для наименее жесткой лопатки I ступени при колебаниях по 7 форме можно заметить изменение поля распределения интенсивностей относительных напряжений, особенно в верхней трети пера (рис. 4).

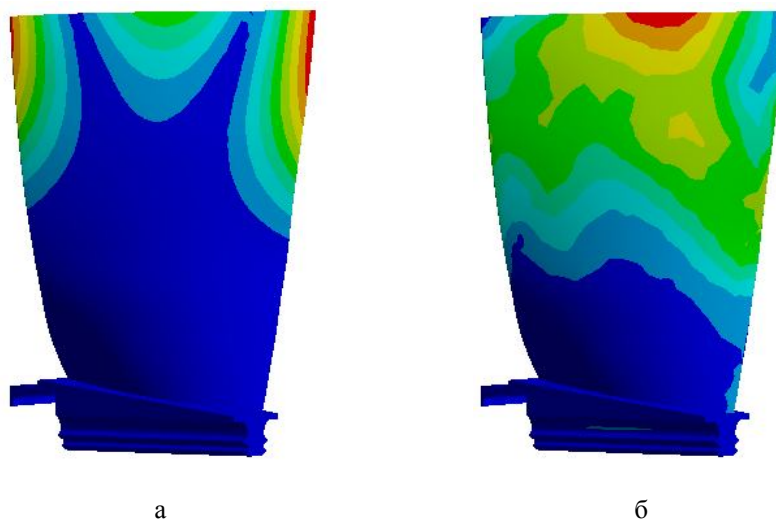


Рис. 3. Четвертая форма колебаний (а) и распределение интенсивностей напряжений (б) в лопатке I ступени компрессора

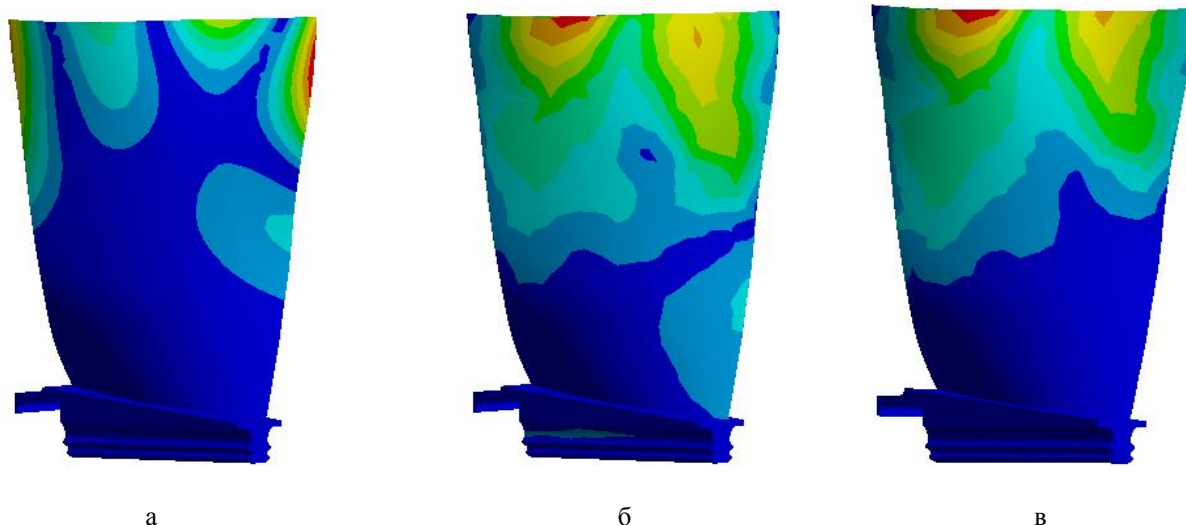


Рис. 4. Седьмая форма колебаний (а) и распределение интенсивностей напряжений без учета вращения (б) и с учетом вращения (в) в лопатке I ступени компрессора

Выводы

При анализе статической деформации и колебаний компрессорных лопаток целесообразно использовать трехмерные конечноэлементные модели.

Следует учитывать, что колебания лопаток в поле центробежных сил происходит вокруг их статического деформированного состояния.

При колебаниях тонких компрессорных лопаток появляются сложные «оболочечные» формы колебаний и наибольшие относительные напряжения смещаются к периферии лопаток.

Анализ колебаний лопаток четырех ступеней компрессора показывает смещение спектра собственных частот в область более высоких частот по мере роста жесткости лопаток (от I до IV ступени), сложность форм колебаний и полей распределения интенсивностей относительных напряжений и влияние вращения в основном на собственные частоты.

Литература

1. Биргер, И.А. Динамика авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр. - М.: Машиностроение, 1981. - 48 с.
2. Анализ локализации напряжений при колебаниях лопаточного аппарата турбомашин

[Текст] / Ю.С. Воробьев, К.Ю. Дьяконенко и др. // Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования: Труды ЦКТИ. - СПб., 2009. - Вып. 296. - С. 282-306.

3. Life calculation of first stage compressor blade of a trainer aircraft [Text] / J.S. Rao, Narayan Rangarajan, Rejin Ratnakar, R. Rzakowski, M. Solinski, I. Vorobiev // ASME Turbo Expo 2012, June 11-15, Copenhagen, Denmark. - P. 1 - 8.

4. Vibration stress localization in turbomachine blading [Text] / Yu.S. Vorobyov, V.N. Romanenko, M.A. Storozhenko, O.V. Tyshkovets, K.Yu. Dyakonenko // Proceedings of the 3rd Korea-Ukraine Gas Turbine Technology Symposium (Korea Institute of Machinery & Materials). - Korea, Daejeon, 20-23 November 2006. - P. 1-9.

5. Vibration characteristics of cooled single-crystal gas turbine blades [Text] / Yu.S. Vorobyov, K.Yu. Dyakonenko, S.B. Kulishov, A.N. Skritskij, R. Rzakowski // VETOMAC VIII International Conference On Vibration Engineering And Technology of Machinery Gdansk, Poland, 3-5 september 2012. - 2012. - P. 324-331.

6. Ножницкий, Ю.А. О прочностной надежности монокристаллических рабочих лопаток высокотемпературных турбин перспективных ГТД [Текст] / Ю.А. Ножницкий, Е.Р. Голубовский // Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования: Труды ЦКТИ. - Вып. 296. - СПб., 2009. - С. 74-82.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр. К.В. Аврамов, Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков.

АНАЛІЗ КОЛИВАНЬ ЛОПАТКОВОГО АПАРАТУ КОМПРЕСОРА ГТД

Ю.С. Воробйов, В.М. Романенко, К.Д. Тиртишніков, С.Б. Кулішов, О.М. Скрицький

Проведено аналіз особливостей статичних деформацій і коливань лопаток чотирьох ступенів компресора газотурбінного двигуна. Враховувався вплив відцентрових сил, властивості матеріалу і умови закріплення лопаток. Використані тривимірні скінченно-елементні моделі і метод скінченних елементів. Показано вплив відцентрових сил і особливостей геометрії лопаток на статичні деформації, спектр власних частот, форми коливань, розподіл і локалізацію відносних інтенсивностей напружень чотирьох ступенів компресора газотурбінного двигуна.

Ключові слова: компресорні лопатки, коливання, газотурбінні двигуни, статика, відцентрові сили, розподіл напружень.

ANALYSIS OF VIBRATIONS OF GAS TURBINE COMPRESSOR BLADING

Iu.S. Vorobiev, V.N. Romanenko, K.D. Tirtishnikov, S.B. Kulishov, A.N. Skrickiy

The analysis of peculiarities of static deformations and vibrations of blades of four stages of gas turbine engines compressor is considered. Influence of centrifugal forces, properties of material and terms of fixing of blades was taken into account. Three-dimensional finite-element models of blades and method of finite elements are used. Effect of centrifugal forces on static deformations, nature frequencies, modes of vibration, distributes and localization of relative stresses intensities of deformations of four stages of gas turbine engines compresso.

Keywords: Compressor blades, vibrations, statics, centrifugal forces, stresses intensity distribution.

Воробьев Юрий Сергеевич – д-р техн. наук, проф., Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua.

Романенко Валентина Николаевна – главный инженер-исследователь отдела нестационарных механических процессов Института проблем машиностроения НАН Украины, Харьков, Украина.

Тыртышников Константин Дмитриевич – аспирант каф. динамики и прочности машин Национального технического университета «Харьковский политехнический университет, Харьков, Украина.

Кулишов Сергей Борисович – зам. Генерального конструктора по новой технике ГП НТКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина.

Скрицкий Александр Николаевич – начальник отдела динамики и прочности ГП НТКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев, Украина, e-mail: spe@machprojekt.nikolaev.ua.