

ВЛИЯНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ НА СТАТИКУ И ДИНАМИКУ ЭЛЕМЕНТОВ ГТД

Проведено аналіз впливу відцентрових сил на особливості деформацій монокристалічних охолоджуємих та компресорних лопаток ГТД та коливань компресорних лопаток. Розглянуто дію локальних ударних навантажень на елементи корпусу ГТД. Використано тривимірні скінчено-елементні моделі.

Ключові слова: відцентрові сили, лопатки, монокристалічний матеріал, локальний удар, коливання, статика

Проведен анализ влияния центробежных сил на особенности деформаций монокристаллических охлаждаемых и компрессорных лопаток ГТД и колебаний компрессорных лопаток. Рассмотрено воздействие локальных ударных нагрузок на элементы корпуса ГТД. Использованы трехмерные конечно-элементные модели

Ключевые слова: центробежные силы, лопатки, монокристаллический материал, локальный удар, колебания, статика

Ю. С. Воробьев

Доктор технических наук, профессор, заведующий отделом*
E-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua

Н. Ю. Овчарова

Инженер I категории*
E-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua

К. Д. Тыртышников

Аспирант

Кафедра газогидромеханики и теплообмена
Национальный технический университет «Харьковский
политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002
E-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua

*Отдел нестационарных механических процессов

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН
Украины
ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046

1. Введение и постановка задачи

В современных ГТД лопатки являются одними из наиболее ответственных и напряженных элементов. Центробежные силы оказывают существенное влияние на их статику и динамику. В работах [1–7] рассматривались колебания охлаждаемых и неохлаждаемых лопаток турбин и рабочих колес. При этом учитывались свойства монокристаллических сплавов [2–5]. Колебания компрессорных лопаток также представляют большой интерес. Во всех случаях следует учитывать воздействие центробежных сил, которые вызывают повышение собственных частот лопаток, а также их удлинение и раскрутку. Следует учесть, что колебания лопаток происходит относительно их статически деформированного состояния. Поэтому рассматриваются статические деформации лопаток, а затем колебания компрессорных лопаток.

Представляет интерес также задача об ударе фрагментов лопаток и посторонних предметов на элементы корпуса ГТД под действием центробежных сил.

Во всех случаях для анализа напряженно-деформированного состояния объектов используются трехмерные конечно-элементные модели, учитывающие сложную геометрическую форму и свойства материалов. Используются конечные элементы, функции формы которых обеспечивают непрерывное изменение напряжений даже при больших градиентах их изменения.

2. Анализ численных результатов

Рассматривались статическая деформация и колебания лопаток 4-х венцов ГТД. Лопатки первой ступени компрессора являются наименее жесткими и имеют наибольшие статические деформации. На рис. 1а приведены результаты расчета перемещений лопатки под действием центробежных сил, которые показывают раскрутку лопатки. Наибольшие перемещения достигают 0,03 – 0,04 м. На рис. 1б показаны распределения интенсивности напряжений при действии центробежных сил, наибольшие у которых не превышают 600 МПа. Видно, что в компрессорных лопатках наибольшие напряжения достигаются не только вблизи корневое сечения.

Величины перемещений и максимальных напряжений в лопатках последующих ступеней последовательно убывают в связи с ростом их жесткостей. Далее рассматриваются колебания компрессорных лопаток относительно их статически деформированного состояния. Только первые три формы колебаний лопатки первой ступени компрессора можно рассматривать как изгибно-крутильные. Четвертая форма колебаний имеет более сложный вид и две узловые линии вдоль радиуса (рис. 2а).

Последующие формы колебаний усложняются. В лопатках второй ступени компрессора появление двух и более продольных узловых линий начинается с VI формы, а третьей и четвертой – с VIII и IX форм. Мак-

симальные напряжения при этом перемещаются в периферийную часть лопатки (рис. 2б)

За счет центробежных сил существенно повышается собственные частоты лопаток, особенно низших форм (табл. 1). А собственные формы и распределения относительных напряжений практически не меняются.

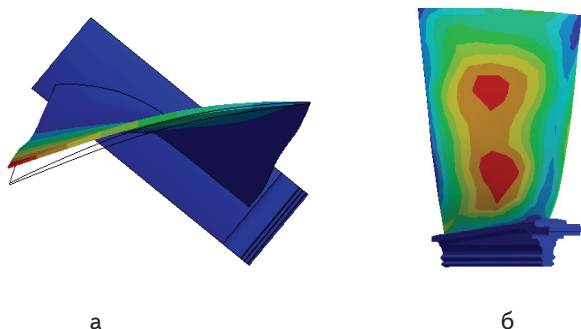


Рис. 1. Перемещения (а) и распределения интенсивности напряжений (б) в лопатке первой ступени под действием центробежных сил

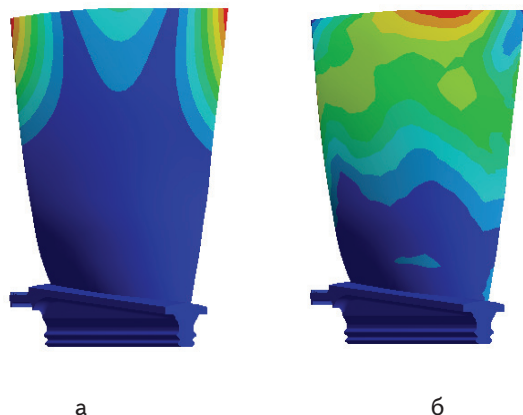


Рис. 2. Четвертая форма колебаний (а) и распределение интенсивностей относительных напряжений (б) лопатки первой ступени

Охлаждаемые монокристаллические лопатки со сложной системой внутренних каналов обладает значительной жесткостью, и центробежные силы оказывают слабое влияние на их частоты [5]. Радиальные перемещения на периферии лопаток следует учитывать, так как при этом уменьшается зазоры в лабиринтных уплотнениях (рис. 3а). Наибольшие значения интенсивности относительных напряжений наблюдаются в ножке лопатки (рис. 3б), а также в охлаждаемых каналах вблизи корневого сечения (рис. 3в).

Под действием центробежных сил отделившиеся фрагменты лопаток и другие предметы могут развивать значительные радиальные скорости. В результате происходит локальный удар по внутренней поверхности корпуса двигателя [8–10]. При этом необходимо учитывать динамические свойства материала [9]. Рассмотрено воздействие фрагмента массой 0,1 кг по однослойным и двухслойным (с накладкой) элементам корпуса ГТД. При скоростях удара до 400 м/с деформации происходят в упругой стадии, а при скоростях до 1000 м/с происходит упругопластическое деформирование и в

ряде случаев пробивание элемента корпуса. На рис. 4 представлена деформация и цветом распределение упругопластических деформаций в области удара для фрагмента корпуса с накладкой. Видна локализация напряжений.

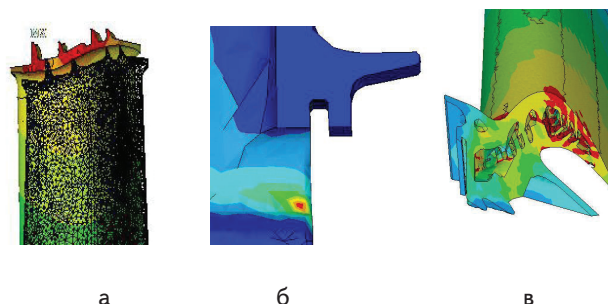


Рис. 3. Радиальные перемещения на периферии охлаждаемой лопатки (а) и локализация интенсивности напряжений в ножке (б) и на поверхности охлаждающих каналов (в)

Таблица 1

Влияние вращения на частоты колебаний компрессорных лопаток

№ п/п	Частоты 1 ступени, ГЦ			Частоты 2 ступени, ГЦ		Частоты 3 ступени, ГЦ	
	$\omega=0$ рад/с	$\omega=837$ рад/с	экспериментальные	$\omega=0$ рад/с	$\omega=837$ рад/с	$\omega=0$ рад/с	$\omega=837$ рад/с
1	137,37	242,68	170-184	236,26	329,53	250,15	355,82
2	374,67	407,07	367-388	816,67	855,1	962,11	1046,4
3	595,22	607,59	680-732	1007,8	1075,4	1269,7	1303,9
4	660,8	781,42	900-925	1749,1	1795,2	2129	2170,6
5	914,62	928,47	988-1020	2289,7	2326,6	2841,7	2923,3
6	1187,3	1265,7	1190-1210	2860,7	2928,1	3215,8	3275,9
7	1608,1	1663,4	1440-1480	3050,3	3079,8	4940	5013,2
8	1715,2	1727,7	1670-1840	3790,6	3846,4	5410,8	5491,6

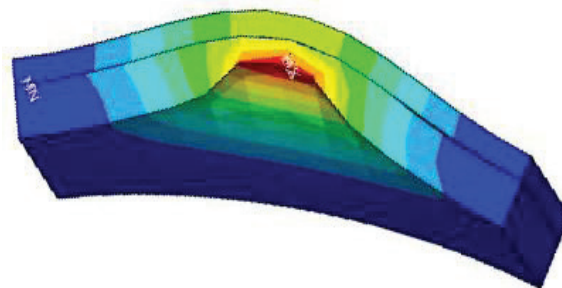


Рис. 4. Деформации и интенсивности напряжений в двухслойном элементе корпуса при скорости соударения 1000 м/с

3. Выводы

Центробежные силы приводят к деформированному состоянию лопаток, вокруг которого происходят их колебания. Для компрессорных лопаток основное значение имеет их раскрутка, а для охлаждаемых лопаток турбин с полками и лабиринтными уплотнениями – радиальные перемещения. Центробежные силы существенно влияют на величины собственных частот лопаток, особенно низших форм, и значительно меньше на формы колебаний и распределения относительных напряжений.

Отделившиеся фрагменты лопаток под действием центробежных сил совершают локальный удар по внутренней поверхности корпуса ГТД. При скоростях удара до 400 м/с локальные деформации происходят в упругой стадии, а при скоростях 1000 м/с – в упругопластической. При больших скоростях соударения возможно пробивание элемента корпуса.

Учет рассмотренных факторов позволяет выявить зоны повышенных напряжений и дать предложения по их снижению, что будет способствовать повышению прочности элементов ГТД.

Литература

1. Биргер, И. А. Динамика авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / И. А. Биргер, Б.Ф. Шорр - М.: Машиностроение, 1981, 48 с.
2. 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. – СПб, 2009. – Вып. 296. – С. 74-82.
3. Воробьев, Ю. С. 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.
4. Vorobiov, Yu. S Analysis of turbomachinery blading vibrations using new materials [Текст] / Yu. S. Vorobiov, M. Chugay, J.S. Rao, R. Rzakowski, S.B. Kulishov, A.N. Skritskij // VETOMAC VIII International Conference On Vibration Engineering And Technology of Machinery Gdansk, Poland. – 2012. – P. 315-324.
5. Vorobiov, Yu. S. Vibration characteristics of cooled single-crystal gas turbine blades [Текст] / Yu. S. Vorobiov, K.Yu. Dyakonenko, S.B. Kulishov, A.N. Skritskij, R. Rzakowski // VETOMAC VIII International Conference On Vibration Engineering And Technology of Machinery Gdansk, Poland. – 2012. – P.324-331.
6. Rao, J. S. Life calculation of first stage compressor blade of a trainer aircraft [Текст] / 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.
7. Vorobyov, Yu. S. Vibration stress localization in turbomachine blading [Текст] / 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.
8. Chernobryvko, M. V. Method to Analyze the Effect of the Shock-Wave Loading on Building Elements [Текст] / M. V. Chernobryvko, Yu. S. Vorobyov, L. Kruszka // International Journal of Protective Structures. – Vol. 3, № 2, 2012. – P. 141-146.
9. Meyers, M. Dynamics behavior of materials. New York: Wiley, 1994. – 283 p.
10. Воробьев, Ю. С. Локальное ударное воздействие на цилиндрические элементы конструкций [Текст] / Воробьев Ю.С., Овчарова Н.Ю. // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: НАКУ «ХАИ» – 2012. 11 (47). – С. 35 – 43.