

УДК 629.7.036:539.4

Канд. техн. наук Р. П. Придорожный¹, канд. техн. наук А. В. Шереметьев¹,
д-р техн. наук А. П. Зиньковский²

¹ ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс» г. Запорожье

² Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, г. Киев

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН В ТЕЧЕНИЕ НАРАБОТКИ

В статье проведено сравнение результатов расчетов теплового и напряженного состояний попарнобандажированных охлаждаемых рабочих лопаток турбин, полученных с помощью 2D и 3D расчетных моделей с учетом процессов ползучести материала. Анализ результатов расчетов в 3D постановке позволил более точно оценить изменение напряженного состояния исследуемых лопаток в течение наработки.

Ключевые слова: охлаждаемые рабочие лопатки турбин, наработка, ползучесть, расчетная модель, тепловое состояние, напряженное состояние.

Введение и постановка задачи

Условия работы современных авиационных двигателей предусматривают нагрев их отдельных деталей и целых узлов до значительных температур. Поэтому проектирование современных охлаждаемых рабочих лопаток турбин с расчетом на высокие температуры потребовало разработки не только новых материалов, обладающих высоким сопротивлением статическим и динамическим нагрузкам при высоких температурах, но и разработки новых методов расчета и оценки прочности, учитывающих такое явление, как ползучесть [1].

В последнее время наряду с двухмерными (2D) расчетными моделями, применяемыми при проектировании охлаждаемых рабочих лопаток турбин, широкое распространение получили трехмерные (3D) модели, что в сочетании с современными методами расчета и анализа обтекания, теплообмена и прочности позволило значительно уменьшить затраты и сократить сроки внедрения новых конструкций [2].

Однако, ввиду сложности процессов, происходящих в материале при повышенных температурах и нестационарности нагружения, задача повышения точности и достоверности при определении напряженного состояния и оценки прочности рабочих лопаток турбин продолжает оставаться актуальной и в настоящее время.

Таким образом, анализ изменения напряженного состояния конструкции охлаждаемых рабочих лопаток турбины высокого давления с учетом процессов ползучести материала является целью данной работы.

Объект исследования и его расчетные модели

В соответствии с поставленной целью были разработаны расчетные 2D и 3D модели охла-

даемых рабочих лопаток ТВД (турбины высокого давления) двигателя АИ-222-25.

Рабочие лопатки ТВД – охлаждаемые с конвективно-пленочной системой охлаждения и хвостовиком в виде половины елочки, вставляются по две лопатки в один замковый паз диска с натягом в паре по плоскостям стыков бандажных полок (рис. 1). Изготавливаются из материала ЖС26-ВИ.

Разработанные 2D модели рассматриваемой рабочей лопатки представлены в виде плоских моделей расчетных сечений (рис. 2). При этом на область расчетного сечения нанесена 2D триангуляционная конечноэлементная сетка с линейными элементами, с помощью которой были проведены тепловой и прочностной расчеты с учетом особенностей механических свойств и процессов ползучести материала.

С учетом циклосимметрии рабочего колеса турбины высокого давления 3D модель представлена в виде сектора диска с двумя спаренными лопатками (рис. 3). Такая модель позволяет провести тепловой и прочностной расчеты, учесть условия взаимодействия лопаток по контактирующим поверхностям бандажных полок и замкового соединения, а также особенности механических свойств материала и процессов ползучести материала. При этом для создания конечноэлементной сетки использовались объемные квадратичные элементы.

Следует отметить, что в разработанных расчетных моделях исследуемых рабочих лопаток отсутствуют перфорационные отверстия на входной кромке лопатки, поскольку учет этих отверстий в рамках поставленной задачи потребовал бы существенного возрастания размерности задачи, что явно превышает возможности имеющегося в наличии компьютерного оборудования. Тем

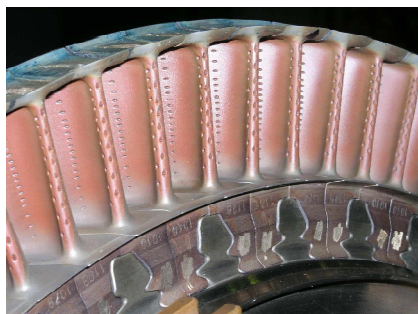


Рис. 1. Рабочее колесо ТВД двигателя АИ-222-25

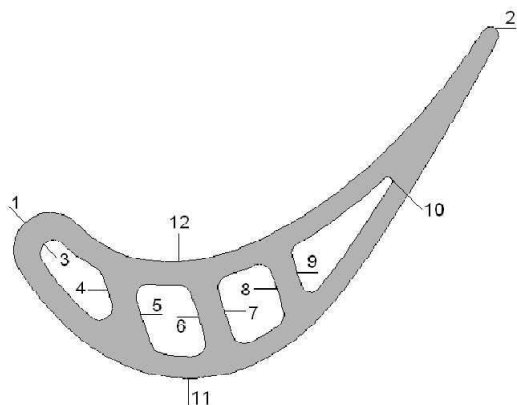


Рис. 2. 2D расчетная модель рабочей лопатки ТВД

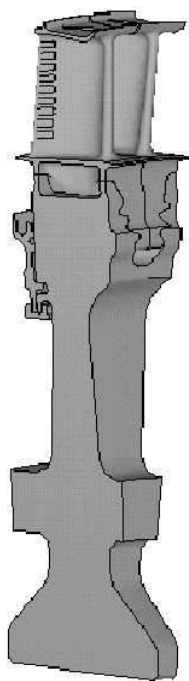


Рис. 3. 3D расчетная модель рабочего колеса ТВД

не менее, влияние перфорационных отверстий на тепловое состояние лопатки было учтено при проведении тепловых расчетов.

На сегодняшний день задача обтекания и теплообмена в охлаждаемых лопатках является наи-

более сложной при формировании расчетных нагрузок, поскольку требует комплексного анализа обтекания лопатки горячим газом, течения охлаждающего воздуха по внутренним каналам лопатки, взаимодействия высокотемпературного внешнего газового потока с холодными струями воздуха, выдуваемого из лопаток, а также теплообмена между газовой средой и металлом лопатки. Поэтому в настоящее время возникают определенные трудности при компьютерном моделировании процессов газодинамики и теплообмена. В связи с этим распределение температур в рассматриваемых моделях было получено эмпирическим путем с использованием экспериментальных данных, а определение НДС производилось без учета газодинамических нагрузок. В рамках решаемой задачи и с точки зрения сравнимости результатов расчетов в 2D и 3D постановке это вполне допустимо. Это объясняется тем, что для рассматриваемых лопаток максимальный уровень напряжений, возникающих от действия газодинамических нагрузок, увеличиваясь от периферийного к корневому сечению, наблюдается в зонах лопатки, которые в меньшей степени определяют ресурс лопатки и не превышает 40 МПа, что значительно ниже уровня напряжений, действующих в зонах лопатки, которые, как правило, определяют ее надежность и долговечность.

Результаты расчетов и анализ НДС

Все расчеты теплового и напряженного состояния исследуемых лопаток проводились для параметров наиболее теплонапряженного установившегося максимального взлетного режима при $T_2 = 1540$ К.

Поскольку расчетное температурное состояние спаренных лопаток в рассматриваемых сечениях отличается незначительно, то в дальнейшем рассматривается только одна из спаренных лопаток.

Сравнительный анализ результатов расчетов, представленных в характерных точках среднего и корневого сечений исследуемых рабочих лопаток, полученных решением тепловой задачи в 2D и 3D постановке (рис. 4), показывает, что наиболее существенное отличие температур, полученных в 3D расчете, по сравнению с результатами 2D расчета, наблюдается на входной кромке и корыте в области расположения перфорационных отверстий, а также на выходной кромке в районе щелевых отверстий.

Причина расхождения температур в 2D и 3D постановке состоит в том, что в построенной модели отсутствуют отверстия перфорации. Это не позволило только за счет изменения граничных условий теплообмена корректно смоделировать тепловое состояние в данных местах. Кроме того,

при разбивке модели лопатки на достаточно большое количество фрагментов, происходило усреднение граничных условий, что привело к невозможности определения локальных перегревов. В остальных характерных точках отличие в температурах незначительно.

На основании результатов тепловых расчетов были проведены вычислительные эксперименты, в ходе которых было определено НДС исследуемых моделей лопаток в двухмерной и трехмерной постановке.

Расчеты на прочность проводились как с учетом упругопластических деформаций, возникающих вследствие действия высоких центробежных нагрузок и неоднородного распределения температур в лопатке, так и с учетом процессов ползучести материала на параметры установившегося максимального взлетного режима двигателя, на котором, как показывает опыт, в большей степени и происходит накопление деформаций ползучести в процессе выработки ресурса [3].

В рамках работы расчеты НДС исследуемых моделей лопаток были выполнены на основании данных о процессах ползучести материала лопаток, полученных по результатам испытаний стандартных образцов по определению пределов ползучести материала [4].

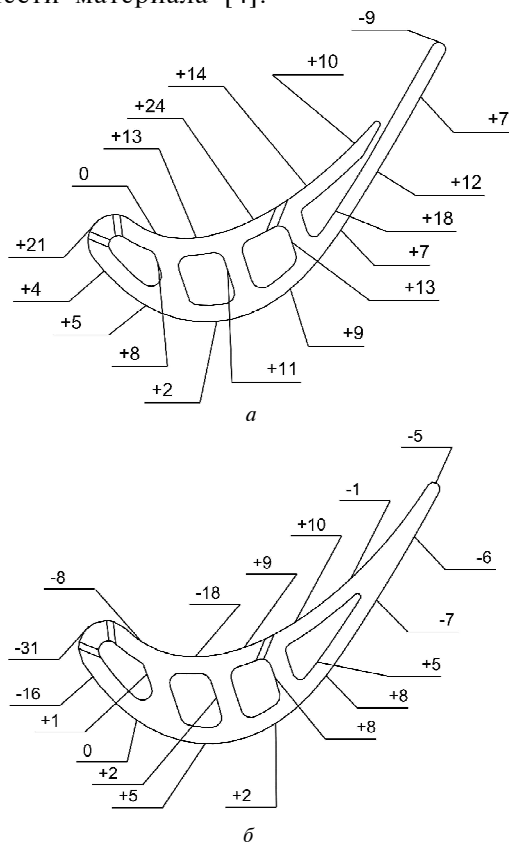


Рис. 4. Разница между температурами, полученными решением тепловой задачи в 3D и в 2D постановке в характерных точках среднего (а) и корневого (б) сечений рабочей лопатки ТВД

Предварительный анализ результатов расчетов рабочего колеса турбины высокого давления с двумя спаренными рабочими лопатками, полученный решением прочностной задачи в 3D постановке с учетом ползучести материала показал, что накопление деформаций ползучести в большей степени происходит в периферийном сечении, бандажной полке, на выходной кромке пера и в районе щелевых отверстий (рис. 5), где главным образом и происходит релаксация напряжений.

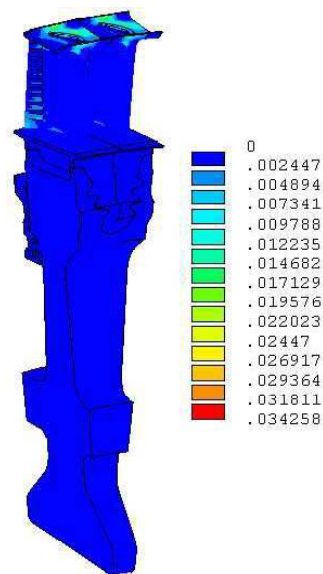


Рис. 5. Распределение эквивалентных деформаций ползучести в рабочих лопатках ТВД

Первоначально на основании результатов проведенных вычислительных экспериментов было проведено сравнение НДС исследуемых рабочих лопаток как в среднем, так и корневом сечениях, полученное с помощью 2D и 3D моделей с учетом и без учета процессов ползучести.

Анализ результатов расчетов показал, что существуют некоторые отличия как в распределении напряжений, так и в их фактической величине между результатами расчетов, полученными с помощью 2D и 3D моделей. Сравнение расчетных величин как нормальных, так и эквивалентных напряжений в каждой конкретной характерной точке, полученных с помощью расчетной 3D модели показывает, что уровень нормальных напряжений может существенно отличаться от уровня эквивалентных напряжений, что объясняется сложностью конструкции и нагружения исследуемых рабочих лопаток, а также говорит о необходимости учета всех компонент тензора напряжений при оценке ее НДС. Поэтому анализ напряженного состояния исследуемых рабочих лопаток в данной работе проводился на основе распределения эквивалентных напряжений (таблица 1).

Таблица 1 – Значения эквивалентных напряжений в характерных точках среднего и корневого сечений рабочей лопатки ТВД, полученные решением прочностной задачи в 2D и 3D постановке

среднее сечение				корневое сечение			
без ползучести		с ползучестью		без ползучести		с ползучестью	
2D	3D	2D	3D	2D	3D	2D	3D
входная кромка							
2,43	7,32	6,93	8,42	-1,32	12,03	3,77	12,65
выходная кромка							
6,00	17,33	6,55	12,42	13,22	29,78	8,68	12,76
спинка							
4,27	12,49	-0,04	11,30	12,12	25,90	4,76	23,29
корыто							
24,58	28,81	25,77	27,01	24,82	30,06	29,40	29,21
первый (со стороны входной кромки) охлаждающий канал							
20,79	29,21	21,34	27,16	16,57	35,94	18,98	34,78
34,27	35,32	34,38	33,42	44,32	32,45	44,39	31,44
второй (со стороны входной кромки) охлаждающий канал							
33,63	35,13	34,07	32,97	42,24	25,64	42,77	25,06
40,47	37,55	42,24	35,60	39,41	31,09	41,55	29,33
третий (со стороны входной кромки) охлаждающий канал							
39,42	36,73	41,80	35,13	37,25	31,96	41,10	32,54
31,73	28,93	33,29	29,00	33,60	17,47	40,31	17,74
четвертый (со стороны входной кромки) охлаждающий канал							
32,32	28,44	33,21	28,69	37,35	24,58	43,46	26,54
23,31	34,80	20,78	26,10	28,47	31,87	24,76	27,44

Как видно из таблицы, в случае действия высоких температур и нагрузок одним из основных повреждающих факторов становится фактор времени и развивающаяся во времени ползучесть материала приводит с течением времени к значительному перераспределению напряжений в течение эксплуатации. При этом температурные напряжения, как внутренне уравновешенные, уменьшаются во всем объеме, стремясь постепенно к полному исчезновению, а напряжения от внешних нагрузок уменьшаются в наиболее нагретых объемах и по условиям равновесия возрастают в менее нагретых. Анализ состояния лопаток после эксплуатации показывает, что следствием развивающихся во времени деформаций ползучести также является существенное изменение формы лопатки и высокие остаточные напряжения, что может явиться причиной образования статических или усталостных трещин в процессе эксплуатации [5].

Представленные результаты расчетов показали, что в целом закономерности между результатами расчетов, полученными с помощью 2D и 3D моделей, установленные на основании анализа НДС лопаток в упругопластической постановке и с учетом ползучести материала сохраняются. Как правило, уровень напряжений в 3D постановке превышает уровень напряжений в 2D постановке на входной и выходной кромке, корыте и спинке лопатки, а уровень напряжений на перегородках между охлаждающими каналами лопатки ниже.

На основании представленных данных следует отметить, что картина перераспределения на-

пряжений в расчетных сечениях вследствие действия процессов ползучести материала имеет некоторые особенности:

- В среднем сечении уровень напряжений в характерных точках, расположенных в охлаждающих каналах, на входной и выходной кромке в 2D постановке возрастает. В тоже время, в 3D постановке уровень напряжений возрастает только в характерных точках третьего и четвертого каналов, а также на входной кромке.

- В корневом сечении в 2D постановке уровень напряжений в характерных точках, расположенных на входной кромке, в первом, втором и третьем охлаждающих каналах возрастает, а в четвертом канале и на выходной кромке уменьшается. В 3D постановке наблюдается аналогичная картина.

- Наиболее существенное изменение уровня напряжений, как в среднем, так и в корневом сечениях, наблюдается в характерных точках, расположенных на выходной кромке рабочих лопаток. При этом наиболее значительная релаксация напряжений наблюдается в 3D постановке.

Проведенный анализ результатов расчетов с учетом ползучести материала показал, что в зонах действия высоких температур и нагрузок одним из главных следствий неравномерного нагрева является перераспределение напряжений вследствие развития процессов ползучести материала.

Кроме того, проведенные расчеты с учетом ползучести материала позволили уточнить НДС исследуемых рабочих лопаток и оценить динамику его изменения в течение их наработки.

Далее более подробно рассмотрены наиболее напряженные с точки зрения прочности зоны лопатки, определяющие ее работоспособность и надежность.

Рассмотрена динамика перераспределения напряжений в уголках щелевых отверстий лопатки в процессе наработки. На рис. 6 представлены зависимости изменения эквивалентных напряжений в уголках щелевых отверстий периферийного, среднего и корневого сечений рабочей лопатки в процессе наработки. Как видно из представленных данных, в уголках щелевых отверстий вследствие действия процессов ползучести происходит уменьшение уровня напряжений и чем ближе к периферийному сечению, тем значительней это уменьшение. При этом наиболее напряженными зонами являются уголки щелевых отверстий в корневом сечении пера лопатки.

Рассмотрена динамика перераспределения напряжений в местах выхода щелевых отверстий из охлаждающего канала лопатки в процессе наработки. На рис. 7 представлены зависимости изменения эквивалентных напряжений в месте выхода щелевых отверстий из охлаждающего канала в периферийном, среднем и корневом сечениях рабочей лопатки в процессе наработки. Вследствие действия процессов ползучести происходит уменьшение уровня напряжений, и величина этого уменьшения возрастает от корневого к периферийному сечению. Как видно из представленных данных, в рассматриваемой зоне лопаток наиболее напряженными местами являются места выхода щелевых отверстий из охлаждающего канала в корневом сечении пера лопатки.

Рассмотрена динамика перераспределения напряжений на бандажной полке, в охлаждающем канале при переходе пера в бандажную полку, а также ножку хвостовика лопатки в процессе наработки (рис. 8). Как видно из представленных данных, в рассматриваемой зоне лопаток первоначально наиболее напряженными являются места перехода пера в бандажную полку и ножку хвостовика лопатки. Однако вследствие действия процессов ползучести материала происходит значительное уменьшение уровня напряжений в месте перехода пера в бандажную полку, при этом в месте перехода пера в ножку хвостовика уровень напряжений остается практически неизменным.

Таким образом, анализ НДС исследуемых рабочих лопаток показал, что наиболее напряженной зоной лопатки является корневое сечение.

Однако следует отметить, что данные по ползучести материалов даже при постоянных напряжениях и температурах характеризуются значительным разбросом, а тем более трудно получить достоверные данные при изменяющихся условиях нагружения, учитывая всю сложность про-

цессов, происходящих на рабочих режимах двигателя. Естественно, что при численном моделировании процессов ползучести в лопатке, позволяющих с достаточной достоверностью описать эти процессы, возникают определенные сложности. Тем не менее, полученные в ходе эксплуатации двигателей-прототипов экспериментальные данные позволяют прогнозировать процессы развития ползучести материала и изменение напряженного состояния исследуемых лопаток в ходе эксплуатации. Поэтому модель ползучести материала лопаток будет уточняться по итогам их эксплуатации и, как следствие, будет уточняться напряженное состояние конструкции.

В заключении следует отметить, что применение 3D моделей позволило существенно уточнить НДС рассматриваемой конструкции и определить наиболее напряженные зоны лопаток

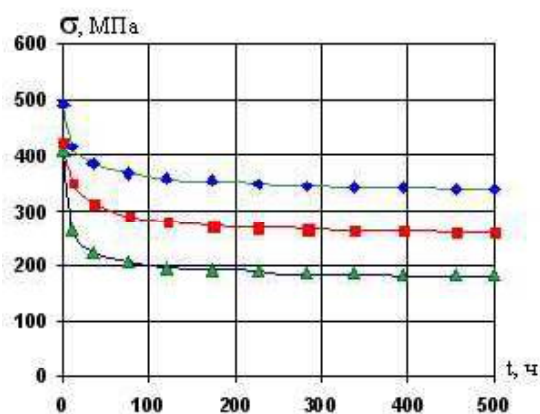


Рис. 6. Зависимости изменения эквивалентных напряжений в уголках щелевых отверстий в периферийном (▲), среднем (■) и корневом (◆) сечениях рабочей лопатки ТВД от времени наработки двигателя на взлетном режиме

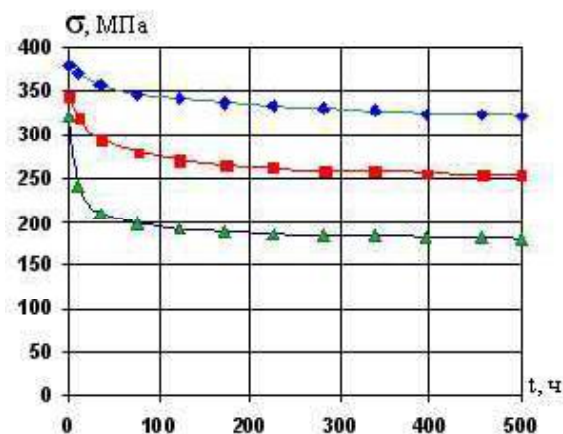


Рис. 7. Зависимости изменения эквивалентных напряжений в местах выхода щелевых отверстий из охлаждающего канала в периферийном (▲), среднем (■) и корневом (◆) сечениях рабочей лопатки ТВД от времени наработки двигателя на взлетном режиме

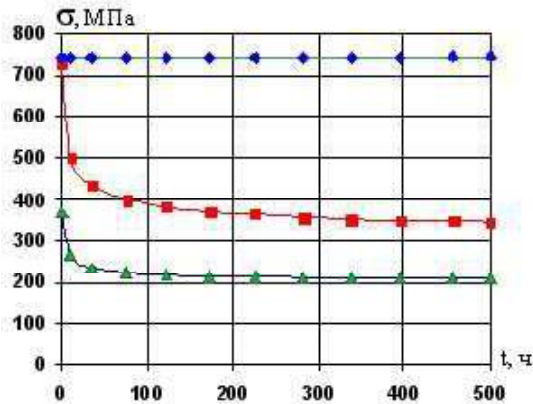


Рис. 8. Зависимости изменения эквивалентных напряжений на бандажной полке (\blacktriangle), в охлаждающем канале при переходе пера в бандажную полку (\blacksquare) и ножку хвостовика (\blacklozenge) рабочей лопатки ТВД от времени наработки двигателя на взлетном режиме

для возможной дальнейшей доводки существующей конструкции.

Заключение

На основании анализа результатов проведенных расчетных исследований по уточнению напряженного состояния конструкции охлаждаемых рабочих лопаток ТВД, используя 3D моделирование, а также сравнения и анализа результатов расчетов, полученных с помощью 2D и 3D моделей, можно сделать вывод, что для достоверной оценки напряженного состояния охлаждаемых рабочих лопаток турбин наиболее целесообразно использование конечноэлементных 3D расчетных моделей, учитывающих условия их

взаимодействия по контактирующим поверхностям и особенности механических свойств материала с учетом процессов ползучести материала.

Список литературы

1. Современные методы обеспечения прочностной надежности деталей авиационных двигателей / Под ред. Ю. А. Ножницкого, Б. Ф. Шорра, И. Н. Долгополова. — М. : ТОРУС ПРЕСС, 2010. — 456 с.
2. Расчет на прочность деталей машин : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. — [4-е изд.]. — М. : Машиностроение, 1993. — 640 с.
3. Придорожный Р.П. Влияние монтажного натяга на напряженно-деформированное состояние турбинной лопатки и потерю натяга по полкам в процессе эксплуатации / Р. П. Придорожный, А.В. Шереметьев, А.П. Зиньковский // Авиационно-космическая техника и технология. — 2006. — № 8 (34). — С. 95–99.
4. Придорожный Р. П. Анализ напряженно-деформированного состояния бандажированных рабочих лопаток турбин АГТД с учетом влияния температуры и наработки / Р. П. Придорожный, В. М. Меркулов, А. П. Зиньковский // Авиационно-космическая техника и технология. — 2009. — № 9 (66). — С.78–82.
5. Придорожный Р. П. Динамика изменения напряженности бандажных полок в условиях повышенных температур / Р. П. Придорожный, А. В. Шереметьев, А. Н. Арпошенко // Вестник двигателестроения. — 2004. — № 2. — С. 124–127.

Поступила в редакцию 18.05.2011

Придорожный Р.П., Шереметьев О.В., Зиньковский А.П. Аналіз змін напруженого стану охолоджуваних робочих лопаток турбін протягом напрацювання

У статті проведено порівняння результатів розрахунків теплового й напруженого станів попарнобандажованих охолоджуваних робочих лопаток турбін, отриманих за допомогою 2D і 3D розрахункових моделей з урахуванням процесів повзучості матеріалу. Аналіз результатів розрахунків в 3D постановці дозволив більш точно оцінити зміну напруженого стану досліджуваних лопаток протягом напрацювання.

Ключові слова: охолоджені робочі лопатки турбін, напрацювання, повзучість, розрахункова модель, тепловий стан, напружений стан.

Pridorozhniy R., Sheremetyev A., Zinkovskiy A. Analysis of change of the stress state of cooled turbine blades during operating time

In this paper comparison of results of calculations of the thermal and stress states of pairwise-shrouded cooled turbine blades received with the help of 2D and 3D computational models taking into account processes of creep of the material is conducted. The analysis of results of calculations in 3D statement has allowed to estimate more precisely change of the stress state of investigated blades during operating time.

Key words: cooled turbine blades, operating time, creep, computational model, thermal state, stress state.