

УДК 629.7.036:539.4

Р.П. ПРИДОРЖНЫЙ¹, А.В. ШЕРЕМЕТЬЕВ¹, А.П. ЗИНЬКОВСКИЙ²

¹ГП ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко, Запорожье, Украина

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

ВЛИЯНИЕ МОНТАЖНОГО НАТЯГА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТУРБИНОЙ ЛОПАТКИ И ПОТЕРЮ НАТЯГА ПО ПОЛКАМ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В работе с помощью метода конечных элементов проведено исследование влияние монтажного натяга по контактными поверхностям бандажных полок на напряженно-деформированное состояние турбинной лопатки и потерю натяга по полкам в процессе эксплуатации. Показана возможность выбора оптимального монтажного натяга на стадии проектирования и доводки двигателя.

монтажный натяг, лопатка турбины, контактные поверхности, конечно-элементная модель, напряженно-деформированное состояние, бандажная полка, потеря натяга, остаточный разворот

Введение

Проблема обеспечения надежности и долговечности газотурбинных двигателей (ГТД) является одной из актуальнейших проблем современного двигателестроения [1]. Надежность и долговечность ГТД во многом зависит от обеспечения прочности лопаток турбин, работающих при комплексном воздействии статических, динамических и термических нагрузок. В связи с ростом параметров современных двигателей (степени повышения давления, оборотов вращения роторов и температуры газа) возрастает и напряженность рабочих лопаток. Применение бандажированных рабочих лопаток турбин позволяет повысить экономичность турбомашин, уменьшить массу ротора, снизить вибронпряженность лопаток, а следовательно увеличить надежность и ресурс их работы.

Формулирование проблемы. Анализ состояния лопаток после эксплуатации ГТД показывает, что в ряде случаев наблюдается интенсивная выработка контактных поверхностей бандажных полок. Однако в настоящее время отсутствуют достаточно достоверные методики прогнозирования надежной работы бандажных полок в течение требуемого ресурса двигателя [2]. Эффективность бандажирования,

как средства снижения вибрационной напряженности рабочих лопаток достигается при гарантированном прижатии контактных поверхностей полок, при этом важно установить оптимальную величину прижатия бандажных полок. Его оптимальная величина определяется исходя из следующих факторов:

- обеспечение минимального уровня вибронпряженности лопаток при резонансных колебаниях;
- выработка контактных поверхностей бандажных полок;
- допустимый уровень статических напряжений в лопатке, обеспечивающий требуемый ресурс лопатки;
- остаточный разворот лопаток и падение натяга по контактными граням бандажных полок от возникающих в процессе эксплуатации деформаций ползучести.

Порой очень трудно на стадии проектирования найти ту оптимальную величину натяга, которая обеспечит допустимый уровень статических напряжений, минимальную выработку контактных поверхностей бандажных полок, максимальную деформирующую способность лопаточного венца и соответственно минимальную вибронпряженность лопаток. Поэтому зачастую величина прижатия по

контактным граням бандажных полок (натяг) выбирается исходя из опыта создания, доводки и эксплуатации подобных конструкций лопаток [3]. Данные тензометрирования лопаток подобных конструкций при проектировании и доводке свидетельствуют о возможности обеспечения вибрационной прочности лопаток за счет выбора необходимого значения натяга. Однако в течение эксплуатации, ввиду работы лопаток при достаточно высоких температурах происходит остаточный разворот лопаток вследствие процесса ползучести материала лопаток, приводящий к потере натяга. В тоже время при колебаниях лопаток происходит взаимное перемещение контактных поверхностей бандажных полок и их износ, а, следовательно, уменьшается натяг.

Результаты проведенного исследования износа поверхностей контакта бандажных полок показали, что с увеличением натяга износ контактных поверхностей бандажных полок существенно уменьшается, с другой стороны увеличение натяга может привести к повышению напряженности лопатки, появлению остаточных напряжений [4], остаточному развороту и потере натяга.

2. Методы решения

В настоящей работе рассмотрено влияние величины первоначального натяга на динамику изменения напряженности рабочей лопатки турбины, величину остаточного разворота и остаточных напряжений, потерю натяга по контактными граням бандажных полок вследствие возникающих в процессе эксплуатации деформаций ползучести. Трехмерная модель лопатки с сектором диска (рис. 1) и МКЭ позволяют моделировать контактное взаимодействие бандажных полок между собой (с учетом предварительного натяга) и в замковом соединении, рассчитывать усилия в зонах контакта и определять напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции в любой момент времени.

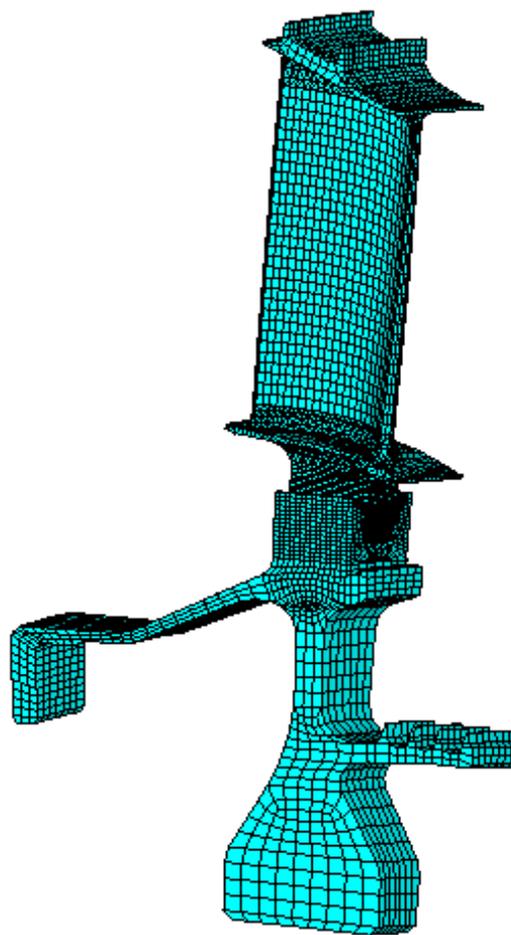


Рис. 1. Конечно-элементная модель лопатки с сектором диска

Учитывая циклосимметричность конструкции, моделировалась только одна контактная пара – трехмерная модель лопатки с сектором диска, а зоны контакта моделировались с помощью контактных элементов. Закрепление в осевом направлении производилось по заднему фланцу. Расчеты производились с учетом распределения температур и центробежных нагрузок. Построенная модель позволяет производить расчеты с учетом пластичности и ползучести материала. Учитывая, что накопление деформаций ползучести происходит главным образом на взлетном режиме, расчеты производились на режиме «взлет».

3. Решение проблемы

Конструкцией бандажированной неохлаждаемой лопатки турбины предусмотрено, что при монтаже

лопаток в диск возникает предварительный натяг по поверхностям контакта бандажных полок за счет упругой закрутки пера. За счет изменения размеров бандажной полки проведены расчеты с различной величиной натяга $\Delta = 0,1; 0,2; 0,3$ мм по контактным поверхностям бандажных полок.

Распределение максимальных значений контактных напряжений от предварительной закрутки лопатки при монтаже рабочего колеса в зависимости от величины натяга носит практически линейный характер (рис.2) и при величине предварительного натяга $\Delta = 0,3$ составляет $P = 20,36$ МПа. Под термином «контактные напряжения» понимается их максимальное значение.

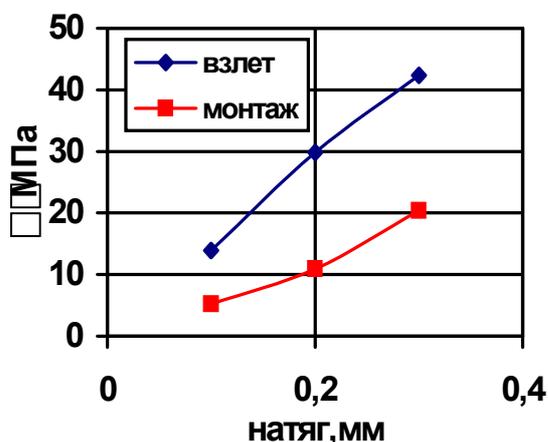


Рис. 2. Контактные напряжения при монтаже рабочего колеса и на режиме «взлет» в зависимости от величины монтажного натяга

При выходе на режим «взлет» происходит, как прогрев пера лопатки, так и ее полки. При этом увеличиваются размеры полки и шаг между полками. Кроме того, возникает крутящий момент от раскрутки периферийного сечения лопатки относительно корневого сечения, обусловленный действием центробежных и газовых сил. Результаты расчета контактных напряжений на режиме "взлет" в зависимости от величины монтажного натяга приведены на рис. 2.

На основании результатов расчета можно сделать вывод, что при выходе на режим «взлет» величина контактных напряжений увеличивается, и ха-

рактер изменения величины контактных напряжений в зависимости от величины монтажного натяга остается тем же.

Развивающаяся во времени ползучесть материала протекает при высоких температурах и нагрузках и с течением времени приводит к развороту сечений лопатки и, как следствие, уменьшению контактных напряжений на торцах бандажных полок. Вследствие этого происходит изменение НДС лопатки и величины контактных напряжений в процессе выработки ресурса двигателя.

Из рис.3 следует, что с течением времени происходит уменьшение контактных напряжений, однако скорость изменения величины контактных напряжений будет тем выше, чем больше монтажный натяг. Поэтому в случае форсирования двигателя по тяге, когда повышается температура газа перед турбиной, возможна такая ситуация, что увеличение монтажного натяга может привести к тому, что на определенной стадии эксплуатации величина контактных напряжений может стать меньше, чем при более низком монтажном натяге.

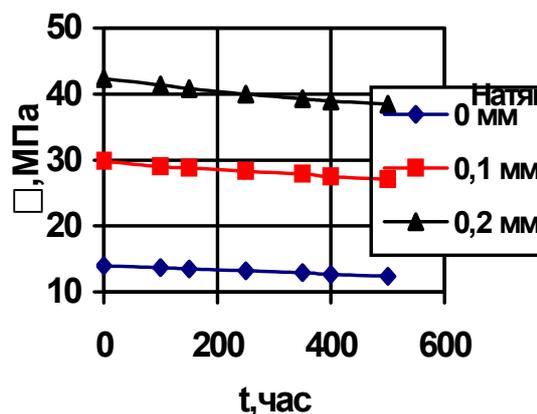


Рис. 3. Изменение контактных напряжений на режиме «взлет» в зависимости от времени работы на взлетном режиме

Как уже отмечалось, величина монтажного натяга оказывает существенное влияние не только на НДС лопатки, но и на его характер изменения в процессе эксплуатации двигателя.

На рис. 4 – 6 показана динамика изменения напряженно-деформированного состояния лопатки в наиболее напряженных точках периферийного, среднего и корневого сечений.

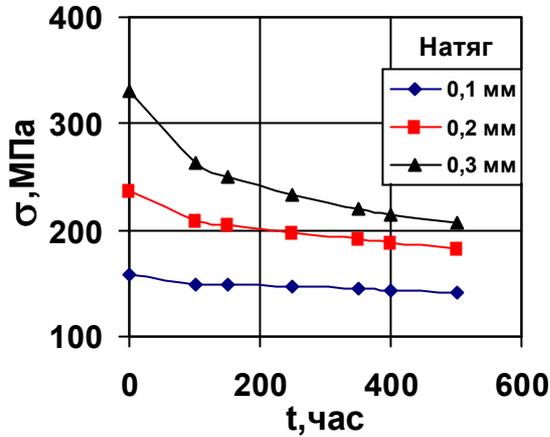


Рис. 4. Изменение максимальных главных напряжений на входной кромке периферийного сечения на режиме «взлет» в зависимости от времени работы на взлетном режиме

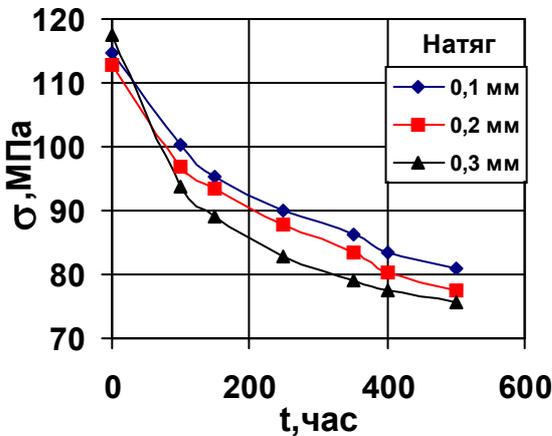


Рис. 5. Изменение максимальных главных напряжений на спинке среднего сечения на режиме «взлет» в зависимости от времени работы на взлетном режиме

На основании результатов расчета можно выделить следующие характерные особенности изменения напряженно-деформированного состояния пера лопатки:

- характер влияния монтажного натяга на напряженность входной кромки периферийного сечения и ее динамику изменения аналогичен его влия-

нию на величину контактных напряжений в бандажной связи;

- величина напряжений на спинке среднего сечения в начале ресурса мало зависит от величины монтажного натяга, однако в процессе эксплуатации это влияние резко увеличивается, что объясняется высокими температурами в среднем сечении и развивающимися во времени деформациями ползучести (рис. 7), максимум которых приходится на спинку среднего сечения;

- влияние монтажного натяга на напряженность корневого сечения незначительно.

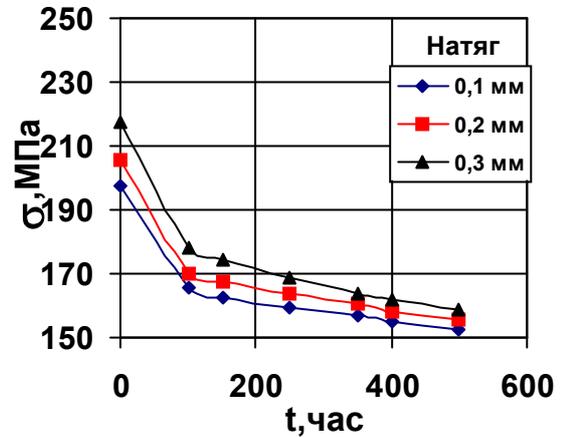


Рис. 6. Изменение максимальных главных напряжений на корыте корневого сечения на режиме «взлет» в зависимости от времени работы на взлетном режиме

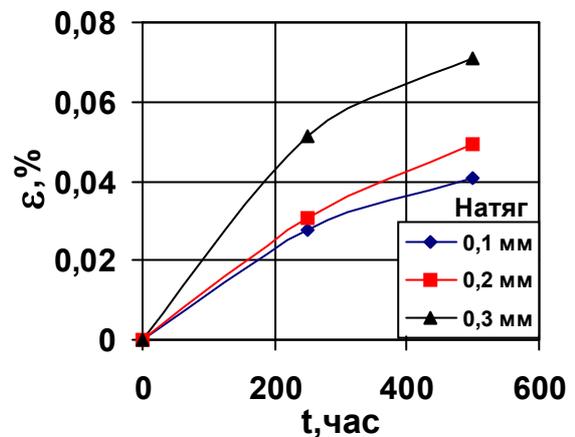


Рис. 7. Изменение максимальных главных деформаций ползучести в среднем сечении на режиме «взлет» в зависимости от времени работы на взлетном режиме

В хвостовике лопатки величина напряжений вначале эксплуатации существенно зависит от величины монтажного натяга, а далее в процессе работы двигателя это влияние практически исчезает за счет перераспределения напряжений в пере лопатки (рис. 8).

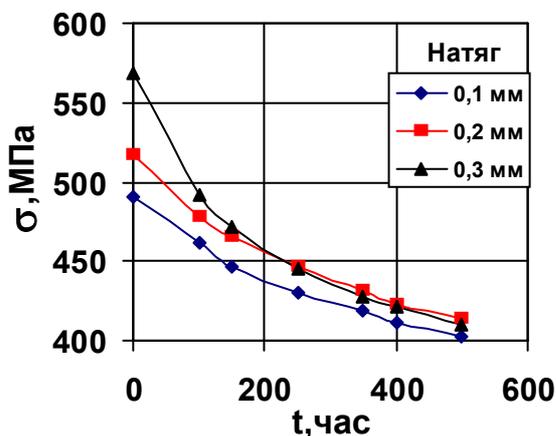


Рис. 8. Изменение максимальных главных напряжений в хвостовике лопатки на режиме «взлет» в зависимости от времени работы на взлетном режиме

Выводы

1. Величина монтажного натяга по контактным граням бандажных полок оказывает существенное влияние на величину контактных напряжений на рабочих режимах двигателя и НДС лопатки, и определяет характер их изменения в течение ресурса.

2. Процесс ползучести материала лопатки, возникающий вследствие высоких нагрузок и температур приводит к появлению остаточных напряжений и остаточного разворота, что приво-

дит к падению натяга по контактным граням бандажных полок.

3. Увеличение монтажного натяга может привести к значительному повышению напряженности лопатки, при этом будет существенно расти величина остаточного разворота и падать натяг, что сделает малоэффективным увеличение монтажного натяга.

4. Показана возможность выбора оптимального монтажного натяга на стадии проектирования и доводки двигателя, обеспечивающего требуемый ресурс рабочих лопаток.

Литература

1. Муравченко Ф.М. Актуальные проблемы динамики прочности и надежности авиадвигателей // Вібрації в техніці та технологіях. – 2004. – № 6 (38). – С. 2-4.
2. Писаренко Г.С., Воробьев Ю.С. Вопросы моделирования колебаний лопаток турбомашин // Проблемы прочности. – 2000. – № 5. – С. 122-126.
3. Меркулов В.М., Ильющенко Ф.Д. О выборе способа бандажирования рабочих лопаток турбин ГТД // Вестник двигателестроения. – 2005. – № 2. – С. 114-117.
4. Биргер И. А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 392 с.

Поступила в редакцию 1.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.