

УДК 629.7.036:539.4

Р.П. ПРИДОРЖНЫЙ¹, В.М. МЕРКУЛОВ¹, А.П. ЗИНЬКОВСКИЙ²¹*ГП ЗМКБ «Прогресс» им. академика А.Г. Ивченко, Запорожье, Украина*²*Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина*

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БАНДАЖИРОВАННЫХ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН АГТД С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И НАРАБОТКИ

В работе проведено расчетное исследование влияния температуры и наработки на напряженно-деформированное состояние бандажированных рабочих лопаток турбин. Установлено, что активация процессов ползучести материала лопаток в условиях эксплуатации приводит к потере натяга по бандажным полкам, возникновению остаточного разворота и изменению напряженности лопаток. На основании результатов проведенных вычислительных экспериментов показано, что использование беззиговых бандажных полок позволяет значительно уменьшить напряженность рабочих лопаток турбин и достичь требуемого их ресурса.

Ключевые слова: бандажированная рабочая лопатка, конечноэлементная модель, ползучесть материала, потеря натяга, остаточный разворот, перераспределение напряжений.

Введение и постановка задачи

Требование значительного увеличения ресурса современных авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) при постоянном росте их параметров обуславливает необходимость повышения надежности и работоспособности таких высоконагруженных и ответственных конструктивных элементов как рабочие лопатки турбин. В настоящее время в авиационном двигателестроении эффективным способом решения этой задачи является кольцевое бандажирование лопаток. Объединение лопаток с помощью бандажных полок в сплошное кольцо или пакеты позволяет снизить их вибронпряженность при одновременном повышении экономичности двигателя и, в конечном итоге, его ресурса.

В практике проектирования рабочих лопаток турбин наиболее широкое применение получили так называемые Z-образные, а в последнее время беззиговые бандажные полки [1]. Особенности применения указанных типов бандажных полок, а также влияние их основных параметров на напряженность рабочих лопаток турбин подробно представлены в работах [1 – 3]. Анализ полученных результатов исследований показывает, что беззиговые бандажные полки по сравнению с Z-образными, как правило, более технологичны при изготовлении и ремонте, не имеют концентраторов напряжений в местах контакта, а контактные напряжения распределяются более равномерно по поверхности соприкосновения за счет большей ее величины, хотя их применение может быть связано с определенными ограничения-

ми и трудностями для достижения необходимых параметров рабочего колеса в эксплуатации. Кроме того, как следует из представленных в [4, 5] данных, независимо от типа бандажных полок, в условиях действия высоких температур, обуславливающих ползучесть материала, и большой наработки в ряде случаев наблюдается заметное изменение геометрии рабочих лопаток, потеря натяга по контактным поверхностям полок и их интенсивная выработка. В связи с изложенным, проблема выбора типа полок и обеспечения надежного функционирования бандажной связи рабочих лопаток турбин исходя из тенденций в развитии авиационного двигателестроения становится все более актуальной, что обуславливает необходимость проведения дальнейших исследований в этом направлении. Поэтому целью данной работы является расчетное определение влияния температуры и наработки на напряженно-деформированное состояние бандажированных рабочих лопаток турбин.

1. Объекты исследования и их расчетные модели

В качестве объектов исследования были выбраны рабочие лопатки первой ступени турбины вентилятора, в конструкциях которых допускается возможность применения как Z-образных, так и беззиговых бандажных полок. Вид рассматриваемых лопаток представлен на рис. 1. Для таких лопаток, изготавливаемых из сплава ЖС6У, в эксплуатационных условиях установившегося взлетного режима

характерно температурное состояние (рис. 2), которое с учетом действующих нагрузок обуславливает активизацию процессов ползучести материала, как одной из основных причин потери натяга по контактными поверхностям бандажных полок, возникновение остаточного разворота, а также перераспределение напряжений в пере лопаток [4, 5].

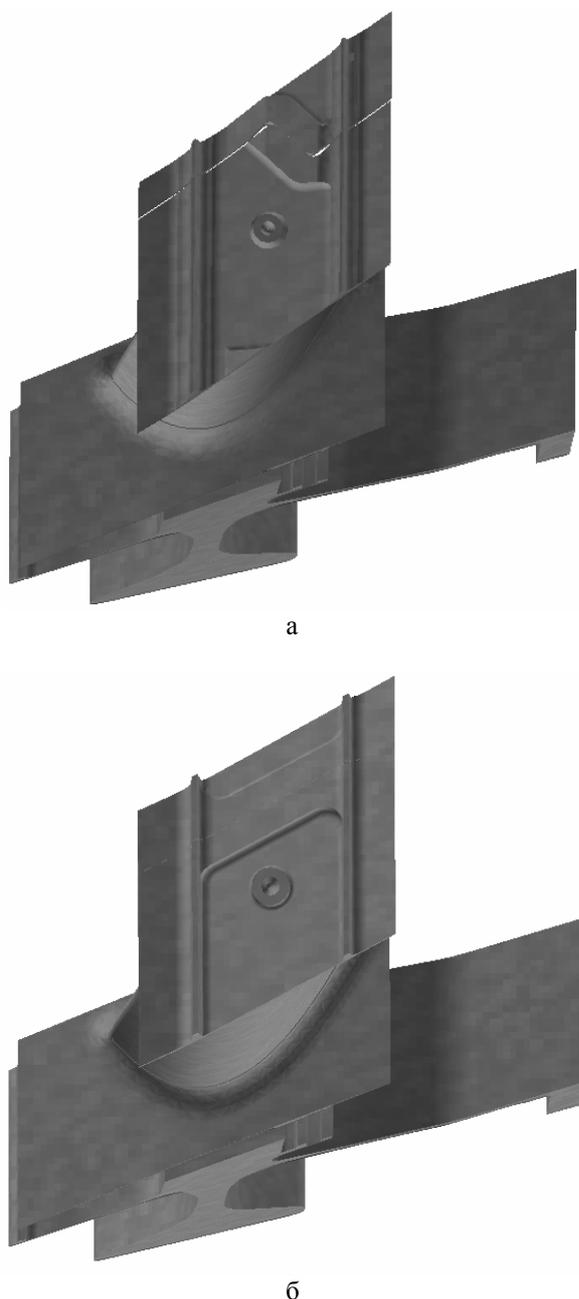


Рис. 1. Модели рабочих лопаток первой ступени турбины вентилятора с Z-образной (а) и беззиговой (б) бандажными полками

Для проведения вычислительных экспериментов в соответствии с постановкой задачи были разработаны трехмерные конечноэлементные модели лопаток, которые позволяют учитывать условия их

взаимодействия по контактирующим поверхностям рассматриваемых типов бандажных полок и особенности механических свойств материала с учетом влияния температуры

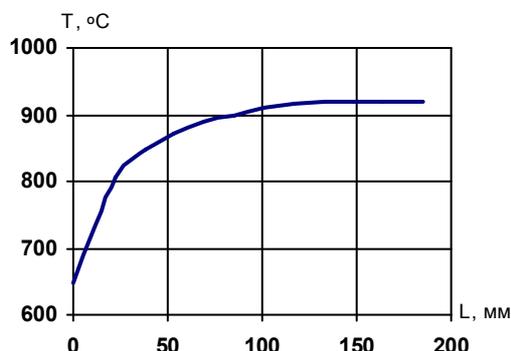


Рис. 2. Зависимость изменения температуры T по длине лопатки L в условиях установившегося взлетного режима

При этом для создания конечноэлементной сетки использовался объемный шестигранный квадратичный элемент, который содержит 20 узлов и является наиболее эффективным для моделирования сложных криволинейных поверхностей, резких изменений формы и зоны концентрации напряжений. Правомочность его использования подтверждается, во-первых, лучшей приспособленностью для использования в нерегулярных сетках, так как поддерживает четырехгранные, призматические и пирамидальные вырожденные формы. Во-вторых, позволяет учитывать характерные для современных рабочих лопаток АГТД как геометрическую, так и физическую нелинейности. В соответствии с решаемой в работе задачей, при задании параметров конечного элемента предполагается, что свойства соответствующего ему материала заданы.

2. Результаты исследований

Все расчеты проводились для параметров установившегося взлетного режима двигателя на котором в большей степени и происходит накопление деформаций ползучести в процессе выработки ресурса. Из-за отсутствия данных о характеристиках циклической ползучести сплава ЖС6У в рассматриваемых условиях эксплуатации, для проведения вычислительных экспериментов были взяты указанные характеристики, соответствующие стационарному нагружению стандартных образцов [5]. В рамках решаемой задачи с точки зрения сравнимости результатов расчетов это вполне допустимо, поскольку материал выбранных лопаток одинаковый, эксплуатируются они в одних и тех же условиях, а их температурное состояние практически не зависит от

типа бандажной полки.

По результатам выполненных расчетов были определены зависимости изменения максимальных деформаций ползучести от времени наработки двигателя в характерных сечениях пера лопаток, которые приведены на рис. 3. Как видно из представленных результатов расчетов, во-первых, высокий уровень температур и нагрузок, характерный для рассматриваемого режима эксплуатации, обуславливает возникновение и развитие с наработкой двигателя деформаций ползучести в материале лопаток. Во-вторых, величина накопленных деформаций ползучести возрастает от корневого к периферийному сечению пера. Такой результат закономерен, поскольку даже несмотря на высокий уровень напряжений в корневом сечении, уровень температур в нем значительно ниже, чем в среднем и периферийном сечениях (см. рис. 2). В-третьих, более интенсивное накопление деформаций ползучести имеет место в лопатке с Z-образной бандажной полкой.

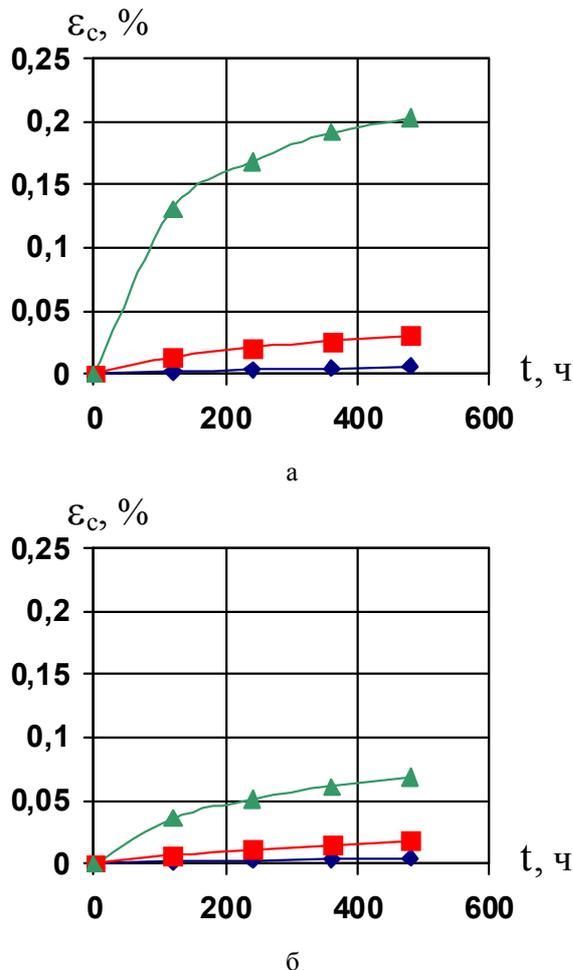


Рис. 3. Зависимости изменения максимальных деформаций ползучести в лопатках с Z-образной (а) и беззиговой (б) бандажными полками от времени наработки двигателя на взлетном режиме в корневом (♦), среднем (■) и периферийном (▲) сечениях пера

Для установления причин такого изменения максимальных деформаций в зависимости от условий эксплуатации и вида бандажной полки были проведены расчеты по определению напряженного состояния лопаток в рассматриваемых сечениях их пера, результаты которых представлены на рис. 4.

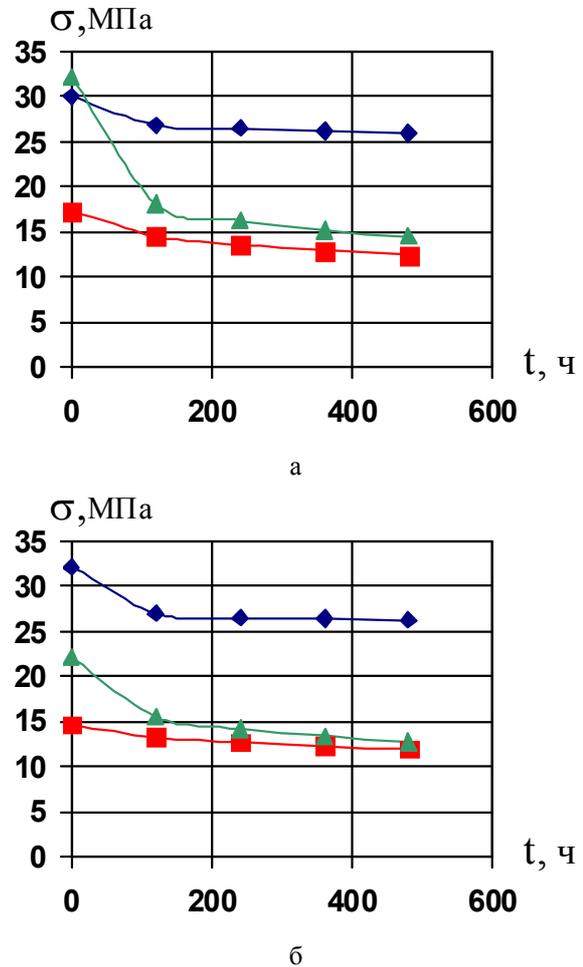


Рис. 4. Зависимости изменения максимальных эквивалентных напряжений в лопатках Z-образной (а) и беззиговой (б) бандажными полками от времени наработки двигателя на взлетном режиме в корневом (♦), среднем (■) и периферийном (▲) сечениях пера

Наглядно видно, что при отсутствии наработки для лопатки с Z-образной бандажной полкой характерен более высокий уровень напряжений, особенно в периферийном сечении пера. Это объясняется следующим образом. Для обеспечения необходимого в эксплуатации натяга по контактным поверхностям монтажный угол закрутки лопатки с Z-образной бандажной полкой почти в полтора раза выше, чем для лопатки с беззиговой полкой. Именно это обстоятельство обуславливает, вследствие возникновения при закрутке пера крутящего момента, более высокий уровень статической напряженности рас-

смаатриваемой лопатки, что и приводит к более интенсивному развитию процессов ползучести материала. Однако в процессе наработки происходит перераспределение напряжений, в результате которого уровень напряжений в выбранных сечениях пера лопаток снижается и в дальнейшем выравнивается независимо от типа бандажной полки.

С другой стороны, как показывает опыт эксплуатации двигателей и результаты расчетных исследований [5], развитие процессов ползучести материала лопаток может приводить к потере натяга по контактным поверхностям бандажных полок и увеличению их выработки в процессе наработки, что, как известно, обуславливает повышение вибронапряженности лопаток и, как следствие, уменьшению их ресурса и двигателя в целом. Это подтверждается зависимостями изменения максимальных контактных напряжений по бандажным полкам и остаточного разворота пера исследуемых лопатках от времени наработки двигателя, которые приведены на рис. 5.

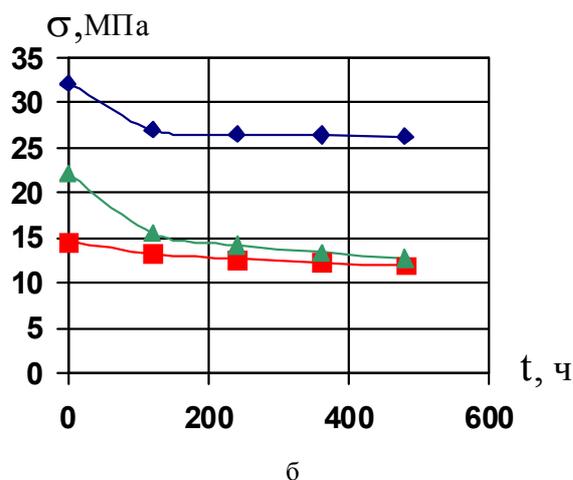
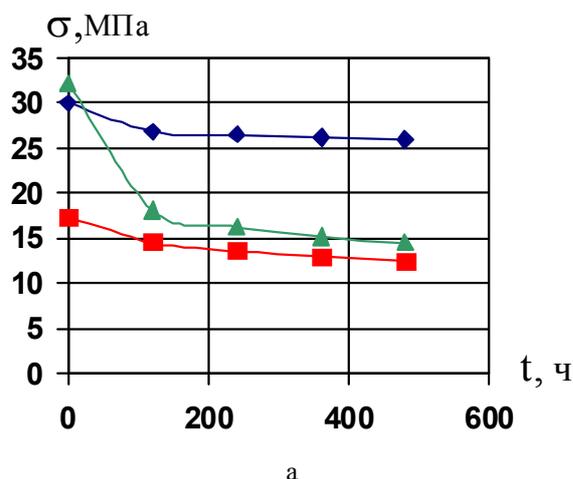


Рис. 5. Зависимости изменения максимальных контактных напряжений по бандажным полкам (а) и остаточного разворота пера (б) от времени наработки двигателя на взлетном режиме в лопатках с Z-образной (♦) и беззиговой (■) бандажными полками

Анализ представленных результатов показывает, что если максимальный уровень контактных напряжений в лопатке с беззиговой бандажной полкой практически не изменяется в процессе наработки, то в случае Z-образной полки имеет место заметное его снижение. Это свидетельствует о том, что для лопаток с такой полкой происходит более существенное падение натяга по контактным поверхностям с увеличением наработки. Кроме того, этот факт подтверждается также результатами расчета остаточного разворота пера исследуемых лопаток (рис. 5, б), откуда следует, что более интенсивное его возрастание наблюдается для лопатки с Z-образной бандажной полкой, различие в его величине для исследуемых лопаток при выбранном времени наработки двигателя может превышать в три раза.

Заключение

На основании результатов проведенных вычислительных экспериментов по определению влияния температуры и наработки на напряженно-деформированное состояние бандажированных рабочих лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей можно сделать однозначный вывод, что использование беззиговых бандажных полок не только обеспечивает по сравнению с Z-образными полками более равномерное распределение контактных напряжений в условиях эксплуатации, характеризующихся действием высоких температур и значительной наработкой, но и позволяет значительно уменьшить напряженность рабочих лопаток турбин и, следовательно, достичь требуемого их ресурса.

Литература

1. Меркулов В.М. О выборе способа бандажирования рабочих лопаток турбин ГТД / В.М. Меркулов, Ф.Д. Ильющенко // Вестник двигателестроения. – 2005. – № 2. – С. 114-117.
2. Меркулов В.М. Разработка бандажированных рабочих лопаток турбин с учетом требований надежности и технологичности / В.М. Меркулов, Ф.Д. Ильющенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – Вып. 9/35. – С. 86-89.
3. Меркулов В.М. Разработка бандажированных рабочих лопаток турбин с учетом требований надежности и технологичности / В.М. Меркулов, С.С. Трипольский, Ю.В. Якушев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – Вып. 9/45. – С.48-51.
4. Придорожный Р.П. Использование метода конечных элементов для определения потери

натяга по контактним граням бандажних полок и остаточного разворота лопаток с учетом ползучести / Р.П. Придорожный // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2003. – Вип. 40/5. – С. 109-113.

5. Придорожный Р.П. Динамика изменения напряженности бандажних полок в условиях повышенных температур / Р.П. Придорожный, А.В. Шереметьев, А.Н. Артюшенко // *Вестник двигателестроения*. – 2004. – № 2. – С. 124-127.

Поступила в редакцию 27.05.2009

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

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНОГО СТАНУ БАНДАЖИРОВАНИХ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБІН АГТД З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ І НАРОБІТКУ

Р.П. Придорожний, В.М. Меркулов, А.П. Зінковський

У роботі проведено розрахункове дослідження впливу температури і наробітки на напружено-деформівний стан бандажированих робочих лопаток турбін. Встановлено, що активація процесів повзучості матеріалу лопаток в умовах експлуатації приведе до втрат натягу по бандажним полицям, виникненню залишкового розвороту і зміни напруженості лопаток. На основі проведених обчислювальних експериментів показано, що застосування беззигових бандажних полиць дозволяє значно зменшити напруженість робочих лопаток турбін і досягти необхідного їх ресурсу.

Ключові слова: бандажирована робоча лопатка, скінченноелементна модель, повзучість матеріалу, втрата натягу, залишковий розворот, перерозподіл напружень.

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE SHROUDED TURBINE ROTOR BLADES OF AGTE TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF TEMPERATURE AND OPERATING TIME

R.P. Pridorozhny, V.M. Merkulov, A.P. Zinkovskii

This paper presents the results of calculation investigation of influence of temperature and operating time on the stress-strain state of the shrouded turbine rotor blades. It is established, that activation of processes of creep of the material of blades under operating service loading conditions to tightness loss on shrouds, origin of the residual turn and change the intensity of blades. Based on the results of the computing experiments it is shown, that use straight-shrouds allows reducing considerably intensity of blades and obtaining their required service life.

Key words: shrouded rotor blade, finite-element model, creep of material, tightness loss, residual turn, redistribution of stresses.

Придорожний Роман Петрович – канд. техн. наук, инженер-конструктор 1 категории ГП ЗМКБ «Прогресс» им. академика А.Г. Ивченко, Запорожье, Украина, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com.

Меркулов Вячеслав Михайлович – начальник отдела турбин ГП ЗМКБ «Прогресс» им. академика А.Г. Ивченко, Запорожье, Украина, e-mail: 035041@ivchenko-progress.com.

Зинковський Анатолій Павлович – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом колебаний и вибрационной надежности Института проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина, e-mail: zinkovskii@ipp.kiev.ua.