

УДК 629.7.036:539.4

В.М. МЕРКУЛОВ¹, Р.П. ПРИДОРЖНЫЙ¹, А.П. ЗИНЬКОВСКИЙ²¹ГП ЗМКБ “Прогресс” им. академика А.Г. Ивченко, Запорожье, Украина²Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев

О ВЛИЯНИИ БАНДАЖНОЙ СВЯЗИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН

В работе с помощью метода конечных элементов проведено исследование влияния кручения, создаваемого Z-образными и беззиговыми бандажными полками, на напряженно-деформированное состояние пера рабочей лопатки турбины. Получены распределения напряжений, которые возникают в пере лопатки при использовании этих типов бандажных полок. На основании анализа результатов проведенных вычислительных экспериментов указываются основные закономерности напряженно-деформированного состояния пера при его закрутке. Отмечена необходимость учета выявленных особенностей при проектировании рабочих лопаток турбин.

Ключевые слова: рабочая лопатка, бандажная полка, угол закрутки пера, конечноэлементная модель, напряженно-деформированное состояние.

Введение и постановка задачи

Постоянно растущие требования к увеличению ресурса и надежности ГТД обуславливают необходимость дальнейшей оптимизации конструкции таких высоконагруженных деталей как рабочие лопатки турбин.

Для современных энергетических установок и в частности авиационных двигателей с целью повышения вибропрочности и экономичности широко применяются рабочие лопатки с бандажными полками. В практике проектирования рабочих лопаток турбин наиболее широкое применение получили Z-образные, а в последнее время беззиговые бандажные полки которые более технологичны и обеспечивают большую надежность [1]. Кроме того, бандажные связи оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние пера лопаток.

В первую очередь они создают дополнительную центробежную нагрузку, действующую на перо лопатки. Для избежания перегрузки концевых сечений бандажные полки хорошо центрируют относительно пера и переход полки в перо делают плавным.

Во-вторых, связанность лопаток на круг обеспечивается за счет упругой закрутки пера. Известно, что основным параметром, характеризующим уровень кольцевой бандажной связи, является сила контактного давления между полками. Она сильно влияет на вибрационную прочность рабочего колеса и износ контактных поверхностей в процессе длительной эксплуатации. Сила контактного давления создается крутящим моментом, действующим на

бандажную полку вследствие упругой закрутки пера лопатки. Часто при оптимизации силы контактного давления возникает необходимость увеличения угла закрутки. Известно, что крутящий момент, приложенный к бандажной полке, вызывает в пере лопатки не только касательные, но и нормальные напряжения [2]. Напряжения, вызванные крутящим моментом, могут привести к тому, что сечение пера, расположенное под полкой, становится опасным.

Бандажная связь, образованная беззиговыми бандажными полками, создается за счет упругой закрутки пера, однако направление закрутки противоположно по отношению к лопаткам с Z-образными полками. На рис. 1 приведено направление закрутки пера для Z-образных и беззиговых полок.

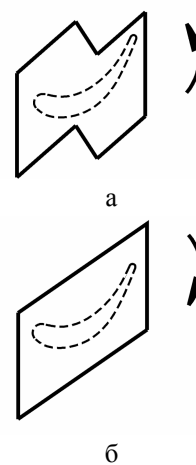


Рис. 1. Схема закрутки пера рабочей лопатки турбины с Z-образной (а) и беззиговой (б) бандажной полкой

Влияние направления закрутки пера на его жесткость при кручении и напряженное состояние мало изучены.

Поэтому целью данной работы является расчетное определение влияния Z-образных и беззиговых полок на напряженно-деформированное состояние пера при его кручении.

1. Объекты исследования и их расчетные модели

В качестве объекта исследования была выбрана рабочая лопатка первой ступени турбины вентилятора авиационного двигателя, которая имеет, как и большое количество других применяемых лопаток, малый угол естественной закрутки пера. Это позволяет применять в их конструкции, как Z-образные, так и беззиговые бандажные полки [3]. Исследуемая лопатка имеет Z-образную полку, изготавливается из жаропрочного никелевого сплава ЖС6У-ВИ, имеет длину пера 154мм, максимальную толщину профиля и хорду в среднем сечении пера 3,6мм и 37,9мм соответственно. Угол естественной закрутки концевой сечения пера по отношению к корневому сечению составляет $8^{\circ}44'$.

Для проведения вычислительных экспериментов в соответствии с постановкой задачи была разработана трехмерная конечноэлементная модель лопатки. Вид геометрической модели рассматриваемой лопатки представлен на рис. 2.



Рис. 2. Геометрическая модель рабочей лопатки 1 ступени ТВ

При этом для создания конечноэлементной сетки использовался объемный шестигранный квадратичный элемент, который содержит 20 узлов. Данный элемент является наиболее эффективным для построения конечноэлементной сетки конструкций, имеющих сложные криволинейные поверхности, резкие изменения формы и зоны концентрации напряжений. В соответствии с решаемой в работе задачей, при задании параметров конечного элемента предполагается, что свойства соответствующего ему материала заданы.

2. Результаты исследований

Лопатка первой ступени ТВ при расчетном исследовании напряженно-деформированного состояния закреплялась за замок и нагружалась только крутящим моментом, создаваемым за счет приложения к контактным поверхностям бандажной полки равномерно распределенной нагрузки. Закрутка пера в разные стороны, необходимая при применении Z-образных и беззиговых бандажных полок, обеспечивалась путем соответствующего задания направления действия нагрузки. Было принято, что положительные значения углов поворота бандажной полки соответствуют Z-образной полке, а отрицательные – беззиговой полке.

В начале исследований подбиралось значение нагрузки, которая бы обеспечила существующий при сборке колеса с Z-образными полками монтажный угол закрутки бандажной полки $\varphi_m = 4^{\circ}$.

Затем к бандажной полке прикладывались крутящие моменты больше и меньше существующего, изменялось направление закрутки, и определялись углы ее закрутки.

Было установлено, что угол упругой закрутки бандажной полки и связанного с ней концевой сечения пера находится в линейной зависимости от прикладываемой равномерной нагрузки к контактными поверхностям бандажной полки (или эквивалентного ей крутящего момента). При изменении направления закрутки характер зависимости не изменялся.

Этим исследованием была подтверждена правомерность использованной в [3] зависимости для лопаток с Z-образными и беззиговыми бандажными полками

$$M = G \cdot \varphi,$$

где M – крутящий момент, действующий на бандажную полку вследствие упругой закрутки пера лопатки; G – коэффициент жесткости пера лопатки на кручение; φ – угол поворота полки.

При каждом приложении крутящего момента анализировалось напряженно-деформированное состояние пера. Отмечено, что наибольшие значения нормальных и касательных напряжений достигаются в сечении расположенном под бандажной полкой, что вызвано стесненным кручением [4]. Для более подробного изучения характера этого явления были выбраны точки расположенные по контуру концевой сечения, расположение которых показано на рис. 3. На рис. 4, 5 показано распределение напряжений σ_z , τ_{zx} для положительного значения угла поворота бандажной полки $\varphi_m = 4^{\circ}$, а на рис. 6, 7 распределение этих же напряжений для отрицательного значения угла $\varphi_m = -4^{\circ}$.

Эквивалентные напряжения $\sigma_3 \times 10^{-1}$ МПа по перу при углах поворота бандажной полки $\varphi_m = 4^\circ$ и $\varphi_m = -4^\circ$ показаны на рис. 8.

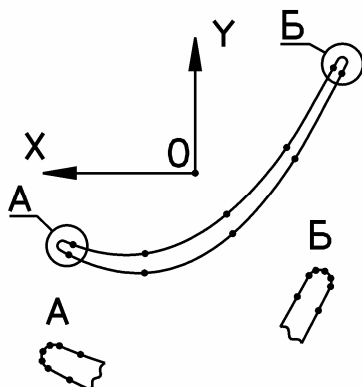


Рис. 3. Концевое сечение пера лопатки с точками, выбранными для анализа

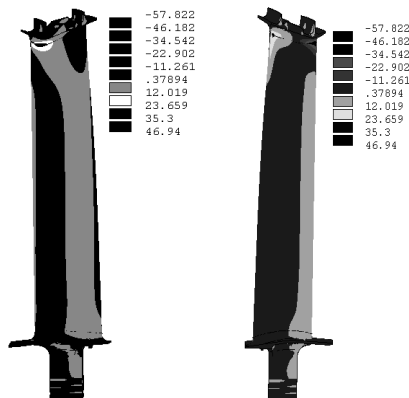


Рис. 4. Нормальные напряжения $\sigma_z \times 10^{-1}$ МПа по перу для значения угла поворота бандажной полки $\varphi_m = 4^\circ$

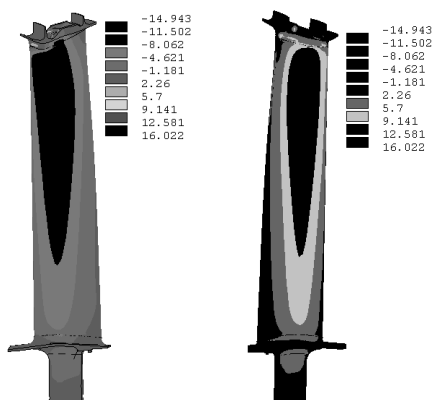


Рис. 5. Касательные напряжения $\tau_{zx} \times 10^{-1}$ МПа по перу при угле поворота бандажной полки $\varphi_m = 4^\circ$

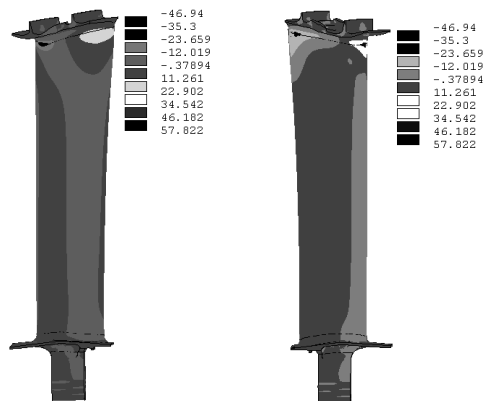


Рис. 6. Нормальные напряжения $\sigma_z \times 10^{-1}$ МПа по перу при угле поворота бандажной полки $\varphi_m = -4^\circ$

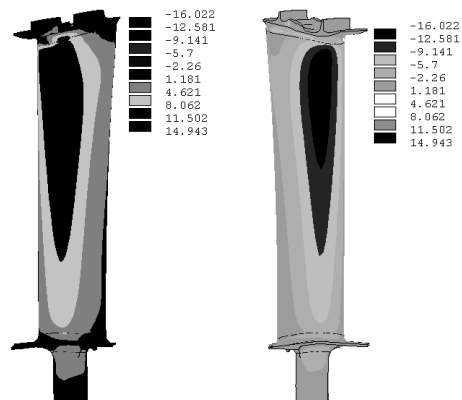


Рис. 7. Касательные напряжения $\tau_{zx} \times 10^{-1}$ МПа в перу при угле поворота бандажной полки $\varphi_m = -4^\circ$

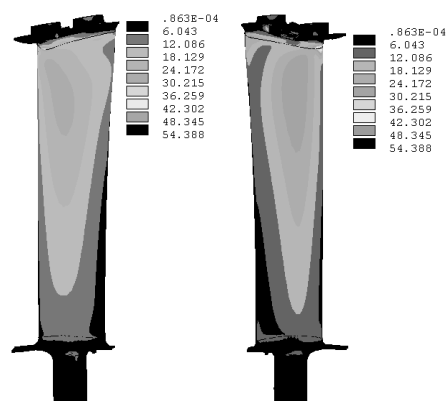


Рис. 8. Эквивалентные напряжения $\sigma_3 \times 10^{-1}$ МПа по перу при углах поворота бандажной полки $\varphi_m = 4^\circ$ и $\varphi_m = -4^\circ$

Также были построены эпюры напряжений по контуру корыта и спинки концевое сечения для противоположных углов закрутки пера, которые приведены на рис. 9.

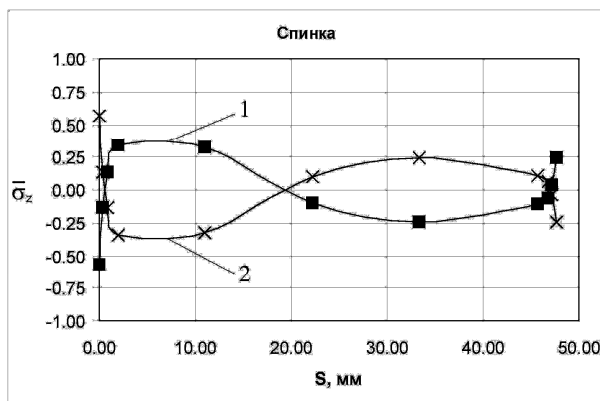
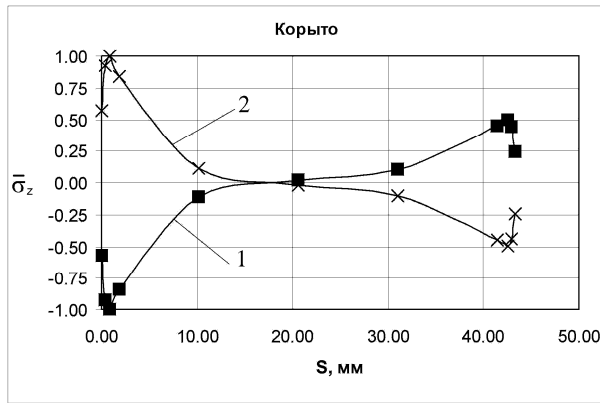


Рис. 9. Изменение нормальных напряжений σ_z по периметру конечного сечения пера при углах поворота бандажной полки: 1 – $\varphi_m = 4^\circ$; 2 – $\varphi_m = -4^\circ$

По результатам анализа данных о напряженном состоянии в точках пера, полученных при моделировании различных по величине и направлению углах закрутки, можно выделить следующие характерные особенности напряженно-деформированного состояния пера лопатки:

1. Закрутка бандажной полки вызывает в пере лопатки не только касательные, но и нормальные напряжения.

2. Все компоненты напряжений, описывающие напряженное состояние в точке, изменяются линейно от величины угла упругой закрутки бандажной полки.

3. Изменение значений углов упругой закрутки бандажной полки по знаку приводит к изменению знака компонент напряжений в точках. В этом случае эквивалентные напряжения по четвертой теории прочности остаются неизменными. При этом нормальные напряжения растяжения изменяются на напряжения сжатия и наоборот.

4. По корыту и по спинке в зоне входной и выходной кромки создаются увеличенные нормальные напряжения. Знак напряжений по спинке и корыту противоположный и зависит от направления закрутки пера.

В ходе работы были проведены аналогичные исследования для ряда рабочих лопаток турбин имеющих значительный угол естественной закрутки пера. Установлено, что закономерности, полученные для рабочей лопатки первой ступени ТВ справедливы и для этих лопаток.

Заключение

В результате проведенных расчетных исследований методом конечных элементов были установлены закономерности влияния кручения, создаваемого Z-образным и беззиговыми бандажными полками на напряженно-деформированное состояние пера рабочих лопаток турбины. Полученные результаты использованы при оптимизации конструкции рабочих лопаток турбин с целью уменьшения их напряженности и, следовательно, достижения требуемого 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. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
3. 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. – № 9/35. – С. 86-89.
4. Пыхтин Ю.А. Напряженно деформированное состояние пера лопаток с бандажными полками / Ю.А. Пыхтин, А.М. Шалавин // Некоторые вопросы расчета и проектирования авиационных двигателей: Материалы научно-технической конференции. – Пермь: Пермский политехнический институт, 1968. – С. 52-64.
5. 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 // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 8. – С. 95-99.

Поступила в редакцию 1.06.2010

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

**ПРО ВПЛИВ БАНДАЖНОГО ЗВ'ЯЗКУ
НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН
РОБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБІН**

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

У роботі за допомогою методу кінцевих елементів проведено дослідження впливу крутіння, створюваного Z-подібними й беззіговими бандажними полками, на напружено-деформований стан пера робочої лопатки турбіни. Отримано розподіли напруг, які виникають у пері лопатки при використанні цих типів бандажних полок. На підставі аналізу результатів проведених обчислювальних експериментів вказано основні закономірності напружено-деформованого стану пера під час його закручення. Відзначено необхідність обліку виявлених особливостей при проектуванні робочих лопаток турбін.

Ключові слова: робоча лопатка, бандажна полка, кут закручення пера, кінцевоелементна модель, напружено-деформований стан.

**ABOUT EFFECTS OF SHROUD CONNECTION
ON STRESS - STRAIN STATE
OF TURBINE BLADES**

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

This article describes a study of effect of twisting generated by Z-shaped and non-beaded shrouds on a stress-strain state of a turbine blade airfoil by using FEM. Distributions of stresses occurred in a blade airfoil with using shrouds of the types have been obtained. Main mechanisms of stress-strain state of the airfoil at its twisting have been shown as based on the analysis of the results obtained in calculation experiments. A necessity for accounting the observed specific features while designing the turbine blades has been noted.

Key words: blade, shroud, airfoil twisting angle, finite-element model, stress-strain state.

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

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.

Зиньковский Анатолий 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.