

УДК 620.178.5:620.19

К. В. САВЧЕНКО, Я. Д. КРУГЛИЙ, А. П. ЗИНЬКОВСКИЙ, И. Г. ТОКАРЬ

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

ВЛИЯНИЕ ТИПА БАНДАЖНЫХ ПОЛОК НА СТАТИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛОПАТОЧНЫХ ВЕНЦОВ

Приведены результаты вычислительных экспериментов по определению влияния типов бандажных полок на характеристики статического напряженного состояния рабочих лопаток турбины с учетом действия температурно-силовых факторов и их сравнение с известными данными исследований. Показано, что такие характеристики статического напряженного состояния, как максимальное контактное давление, интенсивность напряжений в бандажной полке и пере лопатки существенно зависят от ориентации контактных поверхностей полок, которая определяется углом их наклона к плоскости вращения рабочего колеса.

Ключевые слова: турбинная лопатка, бандажная связь, ориентация контактных поверхностей, статическое напряженное состояние, контактное давление, интенсивность напряжений.

Введение

В конструкциях современных турбомашин широко используется полочное бандажирование рабочих колес для повышения их надежности и работоспособности, так как оно является эффективным конструктивно-технологическим решением для снижения уровня резонансных напряжений рабочих лопаток, что достигается за счет объединения лопаток в замкнутую на круг систему или пакеты.

Анализ исследований по определению влияния конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов на характеристики напряженного состояния рабочих лопаток турбин с различными типами бандажных полок [1–3] показывает, что в настоящее время отсутствуют обобщающие закономерности влияния их особенностей, в первую очередь, угла наклона α контактных поверхностей к плоскости вращения рабочего колеса, как показано на рис. 1, где F – равнодействующая нормальных сил, действующих по контактным поверхностям.

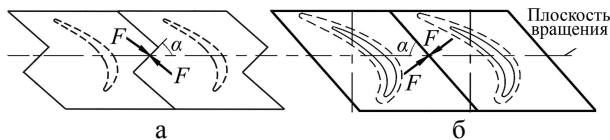


Рис. 1. Схема взаимодействия Z-образных (а) и беззиговых (б) бандажных полок

Учитывая изложенное, целью данной работы является расчетное определение влияния угла наклона α контактных поверхностей на статическое напряженное состояние рабочих лопаток, имеющих Z-образные и беззиговые бандажные полки, с учетом действия температурно-силовых факторов, характерных для их эксплуатации.

1. Объект исследования и его моделирование

Для проведения вычислительных экспериментов были выбраны два венца, лопатки которых характеризуются Z-образной и беззиговой бандажными полками соответственно. Фрагмент исследуемых венцов представлен на рис. 2.

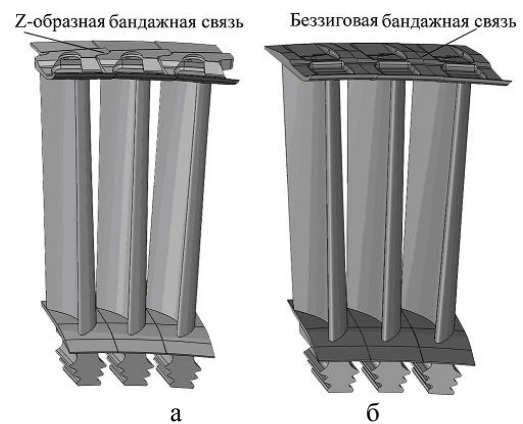


Рис. 2. Фрагмент исследуемых лопаточных венцов с Z-образной (а) и беззиговой (б) бандажными полками

Для создания конечноэлементной (КЭ) модели лопатки использовался объемный 8-узловой конечный элемент SOLID 45, который обеспечивает достаточную точность результатов расчетов и высокую скорость их проведения [4].

Рассматриваемые лопаточные венцы представляют собой системы с циклической симметрией, связь лопаток которых в предположении абсолютной жесткости диска обуславливается их контактным взаимодействием по бандажным полкам. В

этом случае при проведении вычислительных экспериментов можно ограничиться рассмотрением одного периода венца с соответствующими граничными условиями [5].

Моделирование контактного взаимодействия лопаток по бандажным полкам осуществлялось с использованием процедуры, основные положения которой описаны в [4, 6].

2. Результаты вычислительных экспериментов

Был проведен комплекс вычислительных экспериментов по определению влияния угла наклона α (в диапазоне его изменения $45^\circ \dots 65^\circ$) контактных поверхностей бандажных полок на характеристики статического напряженного состояния, в качестве которых были выбраны контактное давление P_{max} по бандажным полкам и интенсивность напряжений σ_i в полке и пере лопатки, которая определяется по формуле

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1}, \quad (1)$$

где σ_n ($n = 1, 2, 3$) – главные напряжения.

В соответствии с постановкой задачи, расчеты проводились при следующих значениях температурно-силовых факторов: температура газового потока $T = 20^\circ\text{C}$ и 905°C ; скорость вращения рабочего колеса, как характеристика центробежных сил – $\omega = 0, 3790, 5180$ и 5850 об/мин [7].

Первоначально, для определения влияния температурно-силовых факторов, характерных для условий эксплуатации рассматриваемых лопаточных венцов, вычислительные эксперименты проводились при температуре $T = 20^\circ\text{C}$. В этом случае были выбраны следующие значения физико-механических характеристик материала: модуль упругости 1-го рода $E = 1,9 \cdot 10^{11}$ Па; плотность – 8570 кг/м³; коэффициент Пуассона – $0,3$.

На основании полученных результатов расчетов были построены диаграммы максимальных значений выбранных характеристик напряженного состояния в зависимости от величины угла наклона α контактных поверхностей, которые приведены на рис. 3.

Анализ представленных расчетных данных показывает следующее. Во-первых, значения контактного давления и интенсивности напряжений в полке возрастают во всем диапазоне изменения угла наклона α . При этом интенсивность напряжений в пере лопатки с беззиговой бандажной полкой возрастает, а с Z-образной – уменьшается с увеличением угла наклона их контактных поверхностей. Во-вторых, для лопаток с Z-образной бандажной полкой характерны более высокие значения характеристик стати-

ческой напряженности по сравнению с лопатками, обладающими беззиговой бандажной полкой. В-третьих, с увеличением скорости вращения рабочего колеса происходит рост значений контактного давления и интенсивности напряжений во всем диапазоне изменения угла наклона для обоих типов рассматриваемых полок.

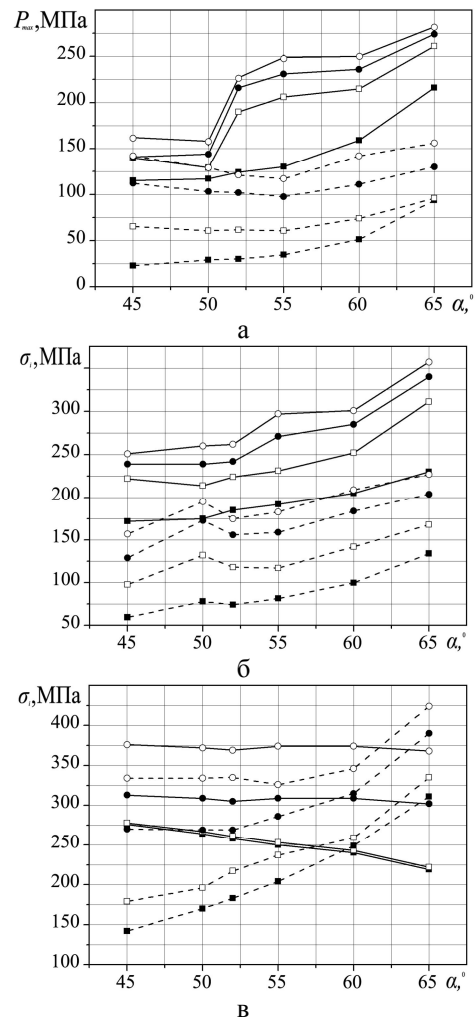


Рис. 3. Диаграммы максимальных значений контактных давлений (а) и интенсивности напряжений в бандажной полке (б) и пере (в) лопатки в зависимости от величины угла наклона α контактных поверхностей к плоскости вращения рабочего колеса для венцов с Z-образной (сплошная линия) и беззиговой (штриховая) бандажными полками для $\omega = 0$ об/мин (■); 3790 об/мин (□); 5180 об/мин (●) и 5850 об/мин (○) при $T = 20^\circ\text{C}$

Расчеты при $T = 905^\circ\text{C}$ выполнялись в предположении, что температура равномерно распределена по длине лопатки, а модуль упругости материала в этих условиях $E_T = 1,05 \cdot 10^{11}$ Па.

На основании полученных данных вычислительных экспериментов были построены диаграммы максимальных значений контактного давления и

интенсивности напряжений от угла наклона контактных поверхностей, которые приведены на рис. 4. Видно, что учет температуры повышает значения рассматриваемых характеристик напряженного состояния для беззиговых бандажных полок и снижает для Z-образных по отношению к таковым, полученным при $T = 20^\circ\text{C}$.

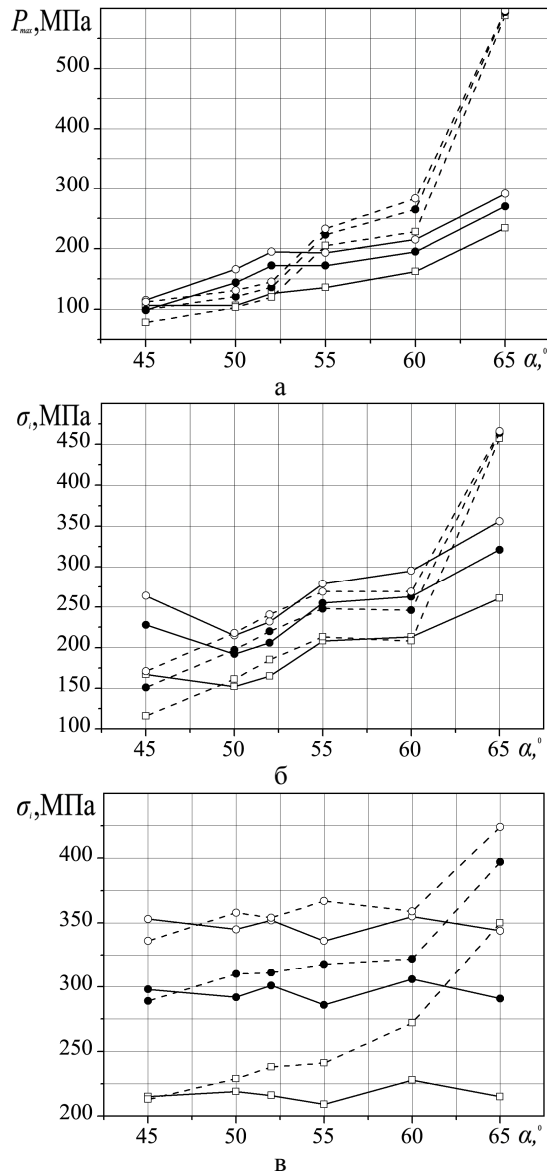


Рис. 4. Диаграммы максимальных значений контактных давлений (а) и интенсивности напряжений в бандажной полке (б) и пере (в) лопатки в зависимости от величины угла наклона α контактных поверхностей к плоскости вращения рабочего колеса для венцов с Z-образной (сплошная линия) и беззиговой (штриховая) бандажными полками для $\omega = 3790$ об/мин (\square); 5180 об/мин (\bullet) и 5850 об/мин (\circ) при $T = 905^\circ\text{C}$

Для подтверждения достоверности результатов выполненных исследований было проведено их

сравнение с известными из литературы [2, 3]. На рис. 5 приведены диаграммы максимальных значений относительных контактного давления \bar{P}_{\max} (штриховая линия) и нормальной силы \bar{F}_{\max} (сплошная) в рассматриваемых бандажных соединениях, полученных в данной работе и [2, 3] соответственно. Видно, что имеет место качественное совпадение их изменения с возрастанием угла наклона контактных поверхностей бандажных полок.

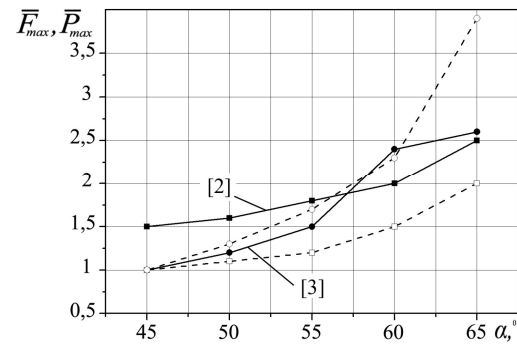


Рис. 5. Диаграмма максимальных относительных значений нормальной силы (сплошная линия) и контактного давления (штриховая) в бандажном соединении в зависимости от величины угла наклона α контактных поверхностей Z-образной (\blacksquare , \square) и беззиговой (\bullet , \circ) полок

Выводы

На основании результатов выполненных вычислительных экспериментов и проведенного их сравнения с известными данными исследований можно сделать следующие выводы:

1. Независимо от типа бандажной связи и учета поля центробежных сил и температуры значения контактного давления и интенсивности напряжений в полке возрастают с увеличением угла наклона контактных поверхностей бандажных полок. При этом интенсивность напряжений в пере лопатки с беззиговой бандажной полкой возрастает, а с Z-образной – уменьшается.

2. Учет поля центробежных сил приводит к росту значений рассматриваемых характеристик напряженного состояния во всем диапазоне изменения угла наклона контактных поверхностей. Однако учет температуры повышает значения рассматриваемых характеристик напряженного состояния для беззиговых бандажных полок и снижает для Z-образных.

3. Z-образная бандажная полка в целом обуславливает повышение статической напряженности лопаток по сравнению с таковой в лопатках с беззиговой полкой.

4. Получено качественное совпадение резуль-

татов выполненных расчетов с известными данными исследований, что свидетельствует о достоверности разработанных КЭ моделей рабочих колес и сделанных на основе проведенных вычислительных экспериментов выводов о влиянии угла наклона контактных поверхностей бандажных полок на характеристики статического напряженного состояния лопаток.

Литература

1. *Research on structural design and optimization of the turbine blade shroud [Text] / Jiang Fan, Le Han, Rongqiao Wang, Xiuli Shen [et al.] // Proc. of ASME Gas Turbine India Conference. – New York, 2012. – P. 657-663.*

2. *О влиянии параметров бандажирования на надежность и ресурс рабочих лопаток турбин [Текст] / В. М. Меркулов, Ю. В. Якушев, Н. Н. Федорченко [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10 (67). – С. 167–171.*

3. *On nonlinear forced vibration of shrouded tur-*

bine blades [Text] / J. Szwedowicz, R. Visser, W. Sextro [et al.] // Journal of turbomachinery. – 2008. – Vol. 130, № 1. – P. 11–18.

4. *Зиньковский, А. П. Влияние нарушений идентичности контактного взаимодействия бандажных полок на характеристики статического и динамического напряженного состояния лопаточных венцов [Текст] / А. П. Зиньковский, Я. Д. Круглий // Проблемы прочности. – 2012. – № 2. – С. 44–60.*

5. *Иванов, В. П. Колебания рабочих колес турбомашин [Текст] / В. П. Иванов. – М. : Машиностроение, 1983. – 224 с.*

6. *Влияние ориентации контактных поверхностей бандажных полок на статическое напряженное состояние рабочих лопаток турбин [Текст] / К. В. Савченко, А. П. Зиньковский, И. Г. Токарь [и др.] // Проблемы прочности. – 2014. – № 4. – С. 62–72.*

7. *Меркулов, В. М. К выбору параметров бандажной связи рабочих лопаток турбин с беззиговыми полками [Текст] / В. М. Меркулов, С. С. Трипольский, Ю. В. Якушев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 9(45). – С. 48–51.*

Поступила в редакцию 3.06.2015, рассмотрена на редколлегии 22.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр. Б. С. Карпинос, Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев.

ВПЛИВ ТИПУ БАНДАЖНИХ ПОЛИЦЬ НА СТАТИЧНИЙ НАПРУЖЕНИЙ СТАН ЛОПАТКОВИХ ВІНЦІВ

К. В. Савченко, Я. Д. Круглий, А. П. Зиньковський, І. Г. Токар

Наведено результати чисельних досліджень з визначення впливу типу бандажних полиць на характеристики статичного напруженого стану робочих лопаток турбін з врахуванням дії температурно-силових факторів і їх порівняння з відомими даними досліджень. Показано, що такі характеристики статичного напруженого стану, як максимальний контактний тиск, інтенсивність напружень в бандажній полиці та пері лопатки істотно залежить від орієнтації контактних поверхонь полиць, що визначається кутом їх нахилу до площини обертання робочого колеса.

Ключові слова: турбінна лопатка, бандажний зв'язок, орієнтація контактних поверхонь, статичний напружений стан, контактний тиск, інтенсивність напружень.

INFLUENCE OF THE TYPE OF SHROUDS ON THE STATIC STRESS STATE OF BLADE RINGS

K. V. Savchenko, Ya. D. Kruglii, A. P. Zinkovskii, I. G. Tokar'

The paper presents the results of computational experiments on the determination of the influence of the type of shrouds on the static stress state characteristics of the turbine rotor blades with a consideration of the action of centrifugal gravity forces and high temperatures of the gas flow and their comparison with the known data research. The results of investigations show that the static stress state characteristics, such as the contact pressure and the stress intensity strongly depend on the inclination angle value of the shroud contact surfaces relative to the plane of rotor wheel rotation.

Keywords: turbine blade, shrouding, orientation of the contact surfaces, static stress state, contact pressure, stress intensity.

Савченко Кирилл Валентинович – аспирант, Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, e-mail: c.savchenko@hotmail.com.

Круглий Яна Дмитриевна – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, e-mail: yanademuz@gmail.com.

Зиньковский Анатолий Павлович – д-р техн. наук, проф., зав. отделом, Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, e-mail: zinkovskii@ipp.kiev.ua.

Токарь Иван Гордеевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, e-mail: tokar@ipp.kiev.ua.