

УДК 629.7.036:539.4

Р. П. ПРИДОРЖНЫЙ<sup>1</sup>, А. В. ШЕРЕМЕТЬЕВ<sup>1</sup>, А. П. ЗИНЬКОВСКИЙ<sup>2</sup><sup>1</sup> ГП «Ивченко–Прогресс», Украина<sup>2</sup> Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Украина

### ВЛИЯНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ МАТЕРИАЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ БАНДАЖНОЙ СВЯЗИ СИЛЬНОЗАКРУЧЕННЫХ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН

В работе приведены результаты расчетного исследования влияния ползучести материала на напряженно-деформированное состояние сильнозакрученных бандажированных рабочих лопаток турбин, характеризующихся большим углом естественной закрутки концевое сечения по отношению к корневому. Установлено, что активация процессов ползучести материала лопаток в условиях эксплуатации приводит к потере натяга по бандажным полкам, возникновению остаточного разворота и изменению напряженности лопаток. Показано, что использование Z-образных бандажных полок в сильнозакрученных рабочих лопатках позволяет, несмотря на значительную величину остаточного разворота пера и снижение уровня контактных напряжений в бандажной связи, достичь требуемого их ресурса.

**Ключевые слова:** бандажированная рабочая лопатка, конечноэлементная модель, ползучесть материала, вычислительный эксперимент, перераспределение напряжений, остаточный разворот, контактные напряжения, потеря натяга.

#### Введение и постановка задачи

Полочное бандажирование лопаток рабочих колес турбин является одним из наиболее эффективных способов существенного снижения вибронапряженности лопаточного аппарата на рабочих режимах современных авиационных газотурбинных двигателей (АГТД). Для этого используют как различные типы бандажных полок – беззиговые (рис. 1, а) и Z-образные (рис. 1, б), так и способы бандажирования лопаток – кольцевое, пакетное и попарное, которые имеют границы применения, преимущества и недостатки [1]. При этом следует отметить, что наличие бандажной связи приводит, как правило, к росту интенсивности напряжений в лопатках. Поэтому при проектировании рабочих колес турбин возникает необходимость обоснования выбора того или иного типа полок и способа бандажирования лопаток. Решение этой задачи невозможно без использования современных методов компьютерного моделирования исследуемых объектов, позволяющих наиболее достоверно описать условия взаимодействия контактных поверхностей бандажных полок рабочих лопаток с учетом характерных для них конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов.

Целью данной работы является расчетное исследование влияния ползучести материала на характеристики бандажной связи рабочих лопаток турбин с сильной закруткой

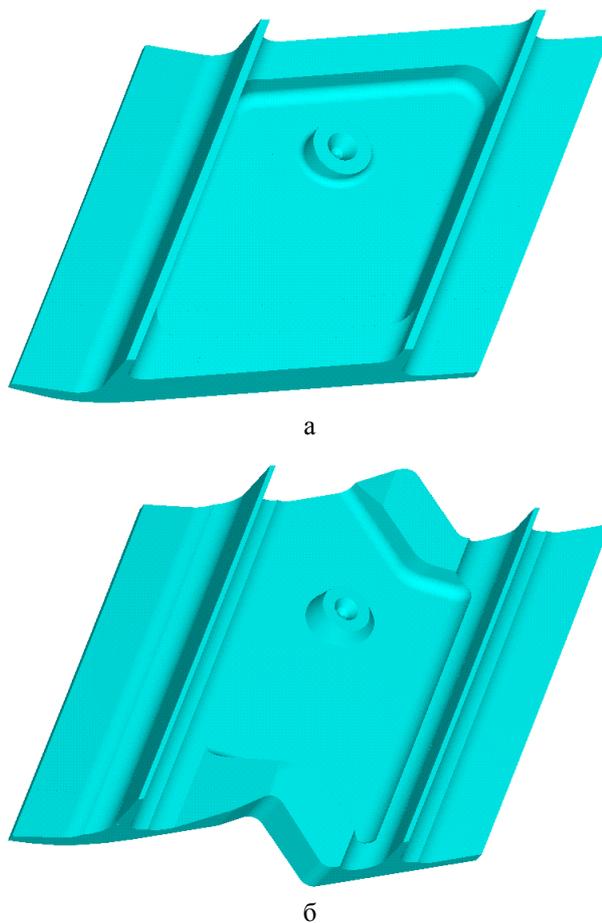


Рис. 1. Беззиговые (а) и Z-образные (б) бандажные полки

## 1. Объект исследования и его расчетная модель

В качестве объектов исследования были выбраны неохлаждаемые лопатки свободной турбины (СТ) малоразмерного АГТД (рис. 2). Исследуемые лопатки изготавливаются из жаропрочного никелевого сплава ЖС26-ВИ. Характерной их конструктивной особенностью является большой угол естественной закрутки концевой сечению по отношению к корневому, что обусловлено газодинамическими соображениями проектирования. Вследствие этого на рабочих режимах двигателя из-за высоких оборотов вращения ротора СТ ( $n = 39000$  об/мин) угол раскрутки пера лопатки в поле центробежных сил составляет более одного градуса. Как показывает опыт проектирования подобных конструкций, при таких условиях эксплуатации и малом отношении среднего диаметра рабочего колеса к высоте лопатки наиболее предпочтительным вариантом бандажной связи рассматриваемых лопаток являются Z-образные полки. Однако, в связи с их высокой жесткостью на кручение, недостатком такого типа бандажной полки является возникновение повышенных напряжений кручения даже при небольшой величине монтажного натяга.

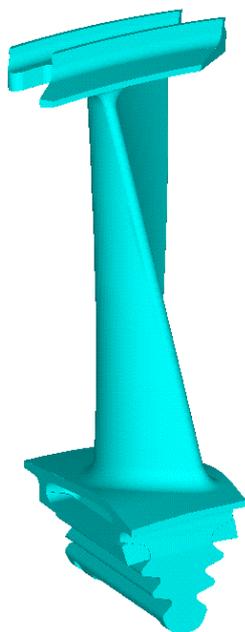


Рис. 2. Рабочая лопатка свободной турбины малоразмерного АГТД

С другой стороны, характерные для исследуемых лопаток высокие уровни температур и действующих нагрузок обуславливают развитие процессов ползучести их материала в течение наработки двигателя, что сопровождается накоплением остаточных пластических деформаций, значительным перераспределением напряжений и остаточным разворотом пера лопаток. Как следствие, в процессе наработки изменяются также и условия их сопряжения по бандажным полкам, что проявляется в уменьшении контактных напряжений. Анализ представленных в [2] результатов исследований показывает, что если максимальный уровень таких напряжений в лопатке с беззиговой бандажной полкой практически не изменяется в процессе наработки, то в случае Z-образной полки имеет место заметное их снижение (см. рис. 3, а). Это свидетельствует о том, что для лопаток с рассматриваемой полкой происходит более существенное падение натяга по контактным поверхностям с увеличением наработки. Этот вывод подтверждается также результатами расчета остаточного разворота пера исследуемых лопаток (см. рис. 3, б), откуда следует, что более интенсивное его возрастание наблюдается в случае наличия Z-образной бандажной полкой.

Таким образом, допустимый уровень напряжений в лопатках СТ и требуемый их ресурс возможны путем обеспечения кольцевой бандажной связи только за счет раскрутки пера в поле центробежных сил. Поэтому сборка рабочего колеса производится с нулевым монтажным углом закрутки бандажных полок.

Для проведения вычислительных экспериментов в соответствии с постановкой задачи и учитывая циклическую симметрию рабочего колеса СТ была разработана трехмерная конечноэлементная модель лопатки с сектором диска (рис. 4). Предложенная в работе трехмерная конечноэлементная модель позволяет не только учитывать форму конструкции рабочего колеса и отдельных его элементов, податливость их соединения друг с другом, условия взаимодействия по контактирующим поверхностям бандажных полок и замкового соединения, особенности деформирования и механических свойств материала с учетом влияния температуры, но и самым естественным образом моделировать все особенности нагружения рабочих лопаток: центробежные нагрузки, вызванные вращением рабочего колеса турбины; распределения давления газа по поверхности и температур в конструкции.

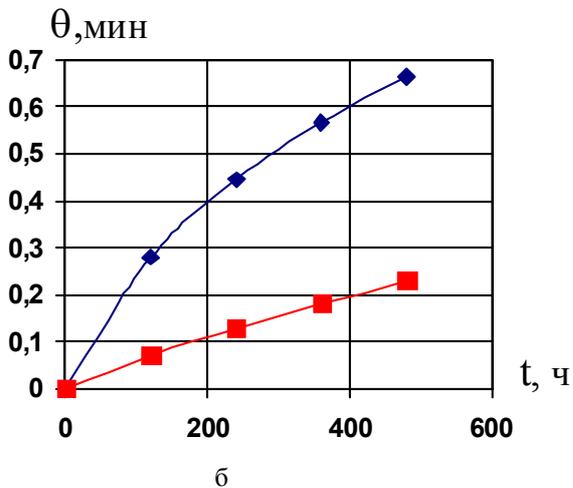
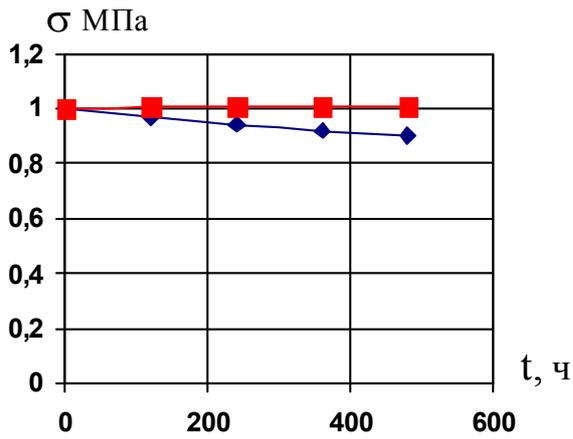


Рис. 3. Зависимости изменения максимальных контактных напряжений по бандажным полкам (а) и остаточного разворота пера (б) от времени наработки двигателя на взлетном режиме в лопатках с Z-образной (♦) и беззиговой (■) бандажными полками

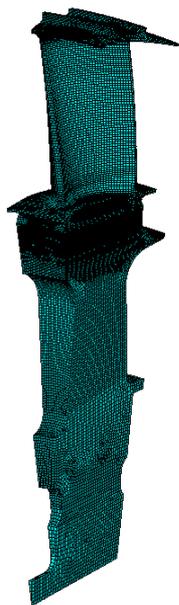


Рис. 4. Конечноэлементная модель лопатки с сектором диска

## 2. Результаты расчетов и анализ полученных результатов

Учитывая все вышеперечисленные обстоятельства, был проведен цикл вычислительных экспериментов по определению влияния ползучести материала на натяг по бандажным полкам и характеристики напряженно - деформированного состояния (НДС) исследуемых лопаток с учетом эксплуатационных режимов нагружения.

Все расчеты проводились для параметров взлетного режима двигателя, а характеристики НДС лопаток определялись для трех сечений пера – корневого, среднего и периферийного. Именно на этом режиме эксплуатации в большей степени происходит накопление деформаций ползучести в процессе выработки ресурса рабочих лопаток вследствие высоких уровней температур (рис. 5) и нагрузок (рис. 6).

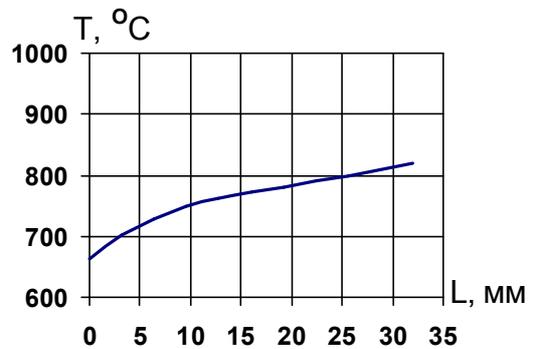


Рис. 5. Зависимость изменения температуры  $T$  по высоте  $L$  пера лопатки в условиях взлетного режима

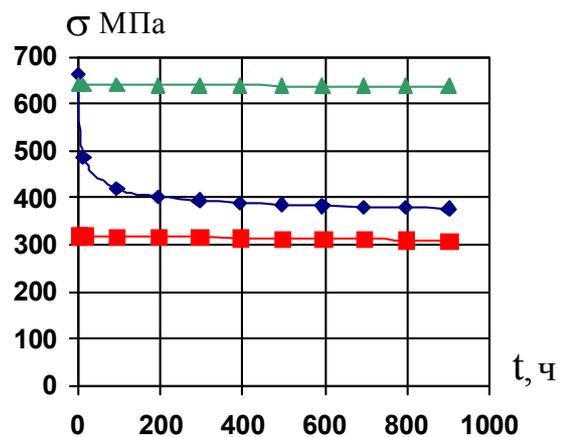


Рис. 6. Зависимости изменения максимальных эквивалентных напряжений от времени наработки двигателя на взлетном режиме в корневом (▲), среднем (■) и периферийном (♦) сечениях пера рабочей лопатки СТ

Для выполнения вычислительных экспериментов были взяты характеристики ползучести сплава ЖС26-ВИ, соответствующие стационарному нагружению стандартных образцов [3]. В рамках решаемой задачи это вполне допустимо, поскольку материал выбранных лопаток имеет высокую пластичность, и процессы ползучести материала мало зависят от циклического изменения режимов работы двигателя в эксплуатации [4].

По результатам выполненных расчетов были определены зависимости изменения максимальных деформаций ползучести от времени наработки двигателя в выбранных сечениях пера лопаток, которые приведены на рис. 7.

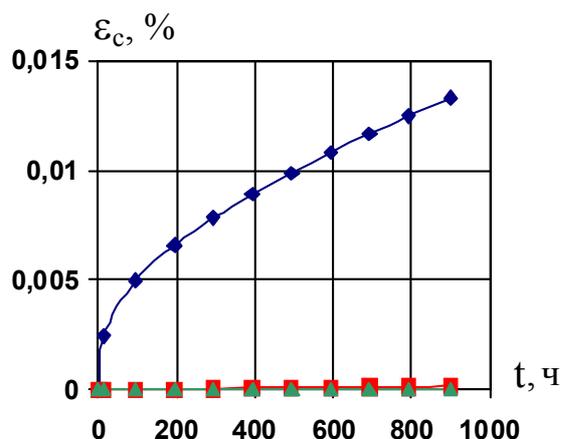


Рис. 7. Зависимости изменения максимальных эквивалентных деформаций ползучести от времени наработки двигателя на взлетном режиме в корневом (◆), среднем (■) и периферийном (▲) сечениях пера рабочей лопатки СТ

Из представленных результатов расчетов видно, что характерные для рассматриваемого режима эксплуатации двигателя уровни температур и нагрузок обуславливают с его наработкой возникновение и развитие деформаций ползучести в материале лопаток. Однако их величина в периферийном сечении пера значительно превышает таковые в двух других (корневом и среднем). Такой результат закономерен, поскольку в указанном сечении при отсутствии наработки кроме высокого уровня температур наблюдается и значительный уровень напряжений (см. рис. 6). Это объясняется возникновением большого крутящего момента, особенно в периферийном сечении, от раскрутки сильно закрученного пера лопатки СТ в поле центробежных сил, что и приводит в этом сечении к более интенсивному развитию процессов ползучести материала. Однако, в процессе наработки двигателя, как следует из приведенных на рис. 6 данных, происходит перераспределение напряжений, в результате которого уровень напряжений в выбранных сечениях пера лопаток снижа-

ется и в дальнейшем практически не изменяется.

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. Это, как известно, обуславливает повышение вибронпряженности 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 лопаток от времени наработки двигателя, которые приведены на рис. 8.

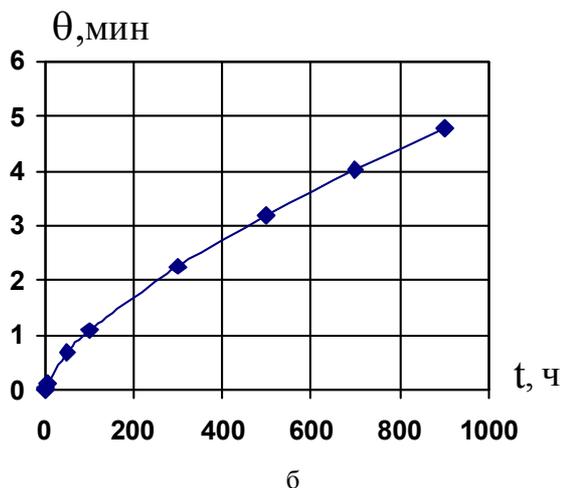
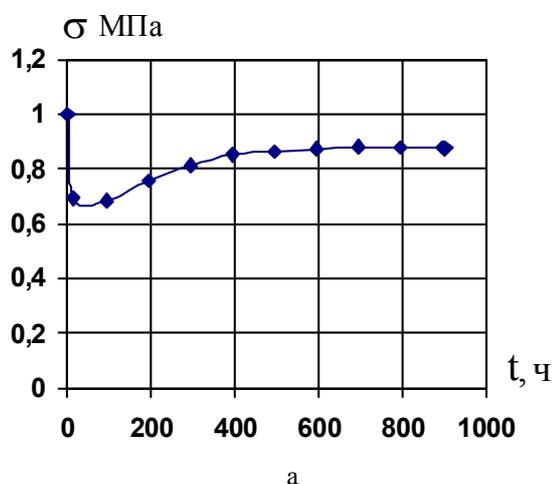


Рис. 8. Зависимости изменения максимальных контактных напряжений по бандажным полкам (а) и остаточного разворота пера (б) от времени наработки двигателя на взлетном режиме

Анализ представленных результатов показывает, что для исследуемой лопатки при отсутствии монтажного угла закрутки Z-образной бандажной полки имеет место заметное снижение уровня кон-

тактных напряжений начальный период эксплуатации (см. рис. 8, а), Это является следствием резкого снижения уровня напряжений в периферийном сечении пера лопатки вследствие ползучести материала (см. рис. 7). В дальнейшем, в процессе наработки, ползучесть материала лопатки приводят к более медленному возрастанию контактных напряжений и их стабилизации на определенном уровне. При этом они примерно на 12% ниже, чем в начальный период эксплуатации. Таким образом, для рассматриваемых лопаток характер изменения натяга по контактными поверхностям бандажных полок в течение наработки несколько отличается от характера изменения натяга для ранее исследованных лопаток с Z-образными бандажными полками (см. рис. 3, а). Однако его стабилизация происходит на практически одинаковом уровне. Это наблюдается на фоне более интенсивного возрастания остаточного разворота пера исследуемых лопаток (см. рис. 8, б) по сравнению с таковыми, результаты исследования которых приведены на рис. 3, б.

### Заключение

На основании результатов проведенных вычислительных экспериментов с учетом влияния температуры и наработки на напряженно-деформированное состояние рабочих лопаток свободной турбины малоразмерного АГТД с Z-образными бандажными полками, характеризующихся большим углом естественной закрутки концевой сечения по отношению к корневому, установлено, что несмотря на значительную величину остаточного разворота пера снижение уровня контактных напряжений в бандажной связи не превышает таковое для лопаток с рассматриваемым типом полки.

### Литература

1. Меркулов, В. М. О выборе способа бандажирования рабочих лопаток турбин ГТД [Текст] / В. М. Меркулов, Ф. Д. Ильющенко // Вестник двигателестроения. – 2005. – № 2. – С. 114-117.
2. Придорожный, Р. П. Анализ напряженно-деформированного состояния бандажированных рабочих лопаток турбин АГТД с учетом влияния температуры и наработки [Текст] / Р. П. Придорожный, В. М. Меркулов, А. П. Зиньковский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 9 (66). – С. 78 – 82.
3. Придорожный, Р. П. Использование метода конечных элементов для определения потери натяга по контактными граням бандажных полок и остаточного разворота лопаток с учетом ползучести [Текст] / Р. П. Придорожный // Авиационно-

космична техніка і технологія. – 2003. – №5 (40). – С. 106 – 110.

4. Сизова, Р. Н. Длительная прочность и ползучесть сплавов для лопаток и дисков турбин при сжатии и реверсивном нагружении [Текст] / Р. Н. Сизова, А. Г. Демидов, Н. И. Минова. – М. : ЦИАМ, 1989. – 55 с.

5. О влиянии ползучести материала на напряженно-деформированное состояние бандажированных рабочих лопаток турбин [Текст] / Р. П. Придорожный, А. П. Зиньковский, А. В. Шереметьев [и др.] // Прочность материалов и элементов конструкций : тр. Междунар. науч.-тех. конф. – К. : Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 348 – 353.

### References

1. Merkulov, V. M., Il'yushchenko, F. D. O vybere sposoba bandazhivaniya rabochikh lopatok turbin GTD [Choice of turbine blades shrouding method]. Vestnik dvigatelestroeniya – Herald of aeroenginebuilding, 2005, no. 2, pp. 114-117. (In Russian).
2. Pridorozhnyi, R. P., Merkulov, V. M., Zin'kovskii, A. P. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya bandazhivannykh rabochikh lopatok turbin AGTD s uchetom vliyaniya temperatury i narabotki [Aero engines turbine blades stress-strain state analysis subjected to temperature and life-time influence]. Aviatcionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya, 2009, no. 9 (66), pp. 78 – 82. (In Russian).
3. Pridorozhnyi, R. P. Ispol'zovanie metoda konechnykh elementov dlya opredeleniya poteri natyaga po kontaktnym granyam bandazhnykh polok i ostatochnogo razvorota lopatok s uchetom polzuchesti [Finite element method in application to loss of tightness on span-shrouds contact sides subjected to creep]. Avitsiino-kosmichna tekhnika i tekhnologiya, 2003, no. 5 (40), pp. 109-113. (In Russian).
4. Sizova, R. N., Demidov, A. G., Minova, N. I. Dlitel'naya prochnost' i polzuchest' splavov dlya lopatok i diskov turbin pri szhatii i reversivnom nagruzhении. [Long-term strength and creep of turbine blade and disc alloys in compression and reversed loading] Moscow, TsIAM Publ., 1989, Inv.№11401. 55 p. (In Russian).
5. Pridorozhnyi, R. P., Zin'kovskii, A. P., Shermetyev, A. V., Merkulov, V. M. O vliyani polzuchesti materiala na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie bandazhivannykh rabochikh lopatok turbin. [Influence of creep on stress-strain state of shrouded turbine blades]. Prochnost' materialov i elementov konstruksii. Trudy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Prochnost' materialov i elementov konstruksii» [Proc. of int. scientific-techn. Conf. Strength of materials and structure elements], Kiev, 28-30 sentyabrya 2010 g., Otv. red. V. T. Troshchenko. Kiev, In-t problem prochnosti im. G. S. Pisarenko NAN Ukrainy, 2011, pp. 348 – 353. (In Russian).

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор Д. Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

**РОЗРАХУНКОВЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ АЗИМУТАЛЬНОЇ ОРІЄНТАЦІЇ  
НА НАПРУЖЕНІСТЬ МОНОКРИСТАЛІЧНИХ ОХОЛОДЖУВАНИХ  
РОБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБІН**

*Р. П. Придорожний, О. В. Шереметьєв, А. П. Зінковський*

У роботі представлені результати розрахункового дослідження впливу повзучості матеріалу на напружено-деформований стан сильно закручених бандажированих робочих лопаток турбін, що характеризуються великим кутом закрутки кінцевого перетину по відношенню до кореневого. 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 результатів проведених обчислювальних експериментів показано, що застосування Z-образних бандажних полиць в сильно закручених робочих лопатках дозволяє незважаючи на значну величину залишкового розвороту пера і зниження рівня контактних напружень в бандажному зв'язку досягти необхідного їх ресурсу.

**Ключові слова:** бандажована робоча лопатка, скінченноелементна модель, повзучість матеріалу, обчислювальний експеримент, перерозподіл напружень, залишковий розворот, контактні напруження, втрата натягу.

**INFLUENCE OF CREEP OF MATERIAL ON CHARACTERISTICS OF SHROUD CONNECTION  
OF THE STRONGLY SWIRLED TURBINE ROTOR BLADES**

*R. P. Pridorozhny, A. V. Sheremetyev, A. P. Zinkovskii*

This paper presents the results of calculation investigation of influence of creep of material on the stress-strain state of the strongly swirled turbine rotor blades, characterized by a large angle of natural twist of tip section of the root. 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 Z-shaped shroud shelves in strongly swirling blades allows despite the significant value of residual turn of the pen and reducing of level of contact stress in shroud connection to obtain their required service life.

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

**Придорожний Роман Петрович** – канд. техн. наук, ведучий інженер ГП «Івченко-Прогрес», Запоріжжє, Україна, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com.

**Шереметьєв Александр Викторович** – канд. техн. наук, зам. головного конструктора, начальник отдела ОПРИ ГП «Івченко-Прогрес», Запоріжжє, Україна, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com.

**Зінковський Анатолій Павлович** – д-р техн. наук, професор, зав. відділом коливаний і вібраційної надійності Інститута проблем прочності ім. Г. С. Писаренко НАН України, Київ, Україна, e-mail: zinkovskii@ipp.kiev.ua.

**Pridorozhny Roman Petrovich** – Cand. Sci. (Eng.), Lead Engineer Zaporozhye Machine-Building Design Bureau Progress State Enterprise named after Academician A. G. Ivchenko, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com.

**Sheremetyev Aleksandr Viktorovich** – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Top Designer Head of Department of OPRI Zaporozhye Machine-Building Design Bureau Progress State Enterprise named after Academician A. G. Ivchenko Zaporozhye, Ukraine, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com.

**Zinkovskii Anatoliy Pavlovych** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department of Oscillations and Vibration Reliability G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine, e-mail: zinkovskii@ipp.kiev.ua.