

Ю.С. ВОРОБЬЕВ, Р. ЖАНДКОВСКИ, Н.Ю. ОВЧАРОВА, Т.Ю. БЕРЛИЗОВА

ТЕРМОНАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ОХЛАЖДАЕМОЙ ЛОПАТКИ С УЧЕТОМ АКСИАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ОСЕЙ

Исследуется термонапряженное состояние монокристаллической лопатки с вихревой и частично пленочной системами охлаждения. Задача решается в трехмерной постановке с использованием метода конечных элементов. Известно, что ориентация кристаллографических осей оказывает существенное влияние на распределение полей напряжений. Когда меняется ориентация кристаллографических осей, происходит перераспределение всех напряжений и изменение всей картины напряженно-деформированного состояния лопатки. Данная работа является продолжением серии работ авторов, в которых рассматривается влияние отклонение азимутальной ориентации кристаллографических осей на термонапряженное состояние монокристаллической охлаждаемой лопатки. Поэтому в данной работе проведено исследование влияния аксиальной ориентации кристаллографических осей, на распределение термоупругих напряжений по объему лопатки. Численные исследования позволили показать изменение максимальных температурных напряжений при повороте кристаллографических осей в плоскости yz вокруг оси x и в плоскости xz вокруг оси y . Из соображений обеспечения прочности лопатки целесообразно ограничить пространственный поворот кристаллографической оси $[001]$ в пределах $12^\circ - 15^\circ$. Эти ограничения аналогичны необходимости обеспечения разброса собственных частот лопатки в пределах $8 - 10\%$. Исследование позволило выявить влияние изменения аксиальной ориентации кристаллографических осей на напряженно-деформированное состояние лопатки. Выполнено обобщение результатов предыдущих исследований на ограничения отклонений кристаллографических осей. Общая картина напряженно-деформированного состояния циклически повторяется при повороте кристаллографических осей на 90° . Места локализации термоупругих напряжений часто совпадают с местами локализации вибрационных напряжений, что создает дополнительную опасность.

Ключевые слова: охлаждаемая лопатка, термоупругие напряжения, кристаллографические оси, аксиальная ориентация, трехмерные модели, метод конечных элементов.

Ю С. ВОРОБІЙОВ, Р. ЖАНДКОВСЬКІ, Н. Ю. ОВЧАРОВА, Т. Ю. БЕРЛІЗОВА

ТЕРМОНАПРУЖЕНИЙ СТАН МОНОКРИСТАЛІЧНОЇ ОХОЛОДЖУВАНОЇ ЛОПАТКИ З УРАХУВАННЯМ АКСІАЛЬНОЇ ОРІЄНТАЦІЇ КРИСТАЛОГРАФІЧНИХ ОСЕЙ

Досліджується термопружний стан монокристалічної лопатки з вихровою і частково плівковою системами охолодження. Задача вирішується в тривимірній постановці з використанням методу скінченних елементів. Відомо, що орієнтація кристаллографічних осей істотно впливає на розподіл полів напружень. Коли змінюється орієнтація кристаллографічних осей, відбувається перерозподіл всіх напружень і зміна всієї картини напружено-деформованого стану лопатки. Дана робота є продовженням серії робіт авторів, в яких розглядається вплив відхилення азимутальної орієнтації кристаллографічних осей на термопружний стан монокристалічної охолоджуваної лопатки. Тому в даній роботі проведено дослідження вплив аксиальної орієнтації кристаллографічних осей на розподіл термопружних напружень в об'ємі лопатки. Чисельні дослідження дозволили показати зміну максимальних температурних напружень при повороті кристаллографічних осей в площині yz навколо осі x і в площині xz навколо осі y . З міркувань забезпечення міцності лопатки доцільно обмежити просторовий поворот кристаллографічної осі $[001]$ в межах $12^\circ - 15^\circ$. Ці обмеження аналогічні необхідності забезпечення розкиду власних частот лопатки в межах $8 - 10\%$. Дослідження дозволило виявити вплив зміни аксиальної орієнтації кристаллографічних осей на напружено-деформований стан лопатки. Виконано узагальнення результатів попередніх досліджень на обмеження відхилень кристаллографічних осей. Загальна картина напружено деформованого стану циклічно повторюється при повороті кристаллографічних осей на 90° . Місця локалізації термопружних напружень часто збігаються з місцями локалізації вібраційних напружень, що створює додаткову небезпеку.

Ключові слова: охолоджувана лопатка, термопружні напруження, кристаллографічні осі, аксиальна орієнтація, тривимірні моделі, метод скінченних елементів.

YU. VOROBIEV, R. RZADKOWSKI, N. OVCHAROVA, T. BERLIZOVA

THERMO-STRESSED STATE OF A SINGLE-CRYSTAL COOLED BLADE TAKING INTO ACCOUNT THE AXIAL ORIENTATION OF THE CRYSTALLOGRAPHIC AXES

The thermo-stressed state of a single-crystal blade with vortex and partially film cooling systems is studied. The problem is solved in a three-dimensional formulation using the finite element method. It is known that the orientation of the crystallographic axes exerts a significant influence on the distribution of the stress fields. When the orientation of crystallographic axes changes, the redistribution all of stress is occur and changing the whole picture of stress-strain state of the blade. This work is a continuation of a series of papers by the authors in which the effect of the deviation of the azimuth orientation of the crystallographic axes on the thermo-stressed state of a single-crystal cooled blade is considered. Therefore, in this paper the influence of the axial orientation of the crystallographic axes on the distribution of thermoelastic stresses in the volume of the blade is investigated. Numerical studies have made it possible to show the change in the maximum temperature stresses during the rotation of the crystallographic axes in the yz plane around the x axis

© Ю.С. Воробьев, Р. Жандковски, Н.Ю. Овчарова, Т.Ю. Берлизова, 2018

and in the xz plane around the y axis. For reasons of ensuring the strength of the blade, it is advisable to limit the spatial rotation of the crystallographic axis $[001]$ within $12^\circ - 15^\circ$. These limitations are similar to the need to ensure the spread of the natural frequencies of the blade in the range of 8 to 10%. The study made it possible to reveal the effect of a change in the axial orientation of the crystallographic axes on the stress-strain state of the blade. A generalization of the results of previous studies to the limitations of the deviations of the crystallographic axes is performed. The general picture of a stress-strain state is cyclically repeated when the crystallographic axes are rotated by 90° . Places of localization of thermoelastic stresses often coincide with places of localization of vibration stresses, which creates an additional danger.

Keywords: cooled blade, thermoelastic stresses, crystallographic axes, axial orientation, three-dimensional models, finite element method.

Введение и постановка задачи. Лопатки первых ступеней газотурбинных двигателей (ГТД) работают в условиях высоких температур. Несмотря на использование современных жаропрочных сплавов, необходима система охлаждения, которая существенно усложняет конструкцию лопатки и вызывает концентрацию напряжений. Наибольшее распространение получили монокристаллические жаропрочные сплавы. Лопатки сложной формы изготавливаются с помощью точного литья. Сложный технологический процесс охлаждения литья обеспечивает направленную кристаллизацию материала лопатки. Структура таких сплавов представляет гранецентрированную кубическую решетку [1, 2]. В таких монокристаллах имеется ряд кристаллографических направлений. Обычно выделяют три взаимортогональные кристаллографические оси (КГО) $[001]$, $[010]$, $[100]$. Кристаллографическая ориентация материала лопаток существенно влияет на их механические характеристики. Влиянию ориентации КГО на термоупругие и вибрационные свойства посвящен ряд работ. В большинстве работ рассматриваются лопатки с прямыми охлаждающими каналами, расположенными вдоль продольной оси лопатки. Так в работах [3-5] рассматривается влияние изменения ориентации КГО на термоупругое состояние лопаток, а в работе [6] на их вибрационное состояние. В работе [6] показано влияние ориентации КГО на предел выносливости монокристаллических охлаждаемых лопаток также с прямыми охлаждающими каналами.

Численные исследования. В работах авторов статьи рассматривается монокристаллическая охлаждаемая лопатка, с вихревой системой охлаждения, с

использованием трехмерных моделей и метода конечных элементов. Рис. 1 дает представление о конструкции лопатки, системе охлаждающих каналов, расположении КГО относительно гранецентрированной кубической решетки материала.

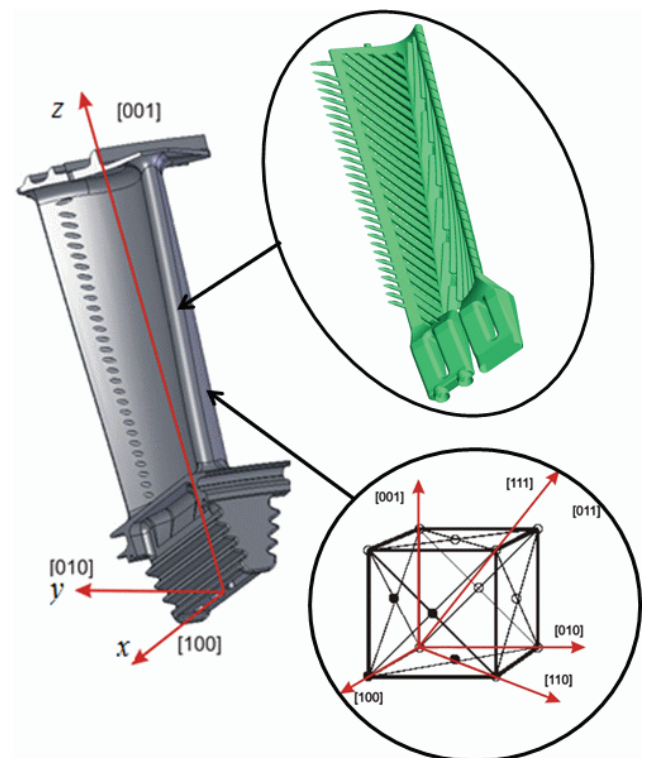


Рисунок 1 – Охлаждаемая лопатка, ее система охлаждения и расположение КГО относительно гранецентрированной кубической решетки материала

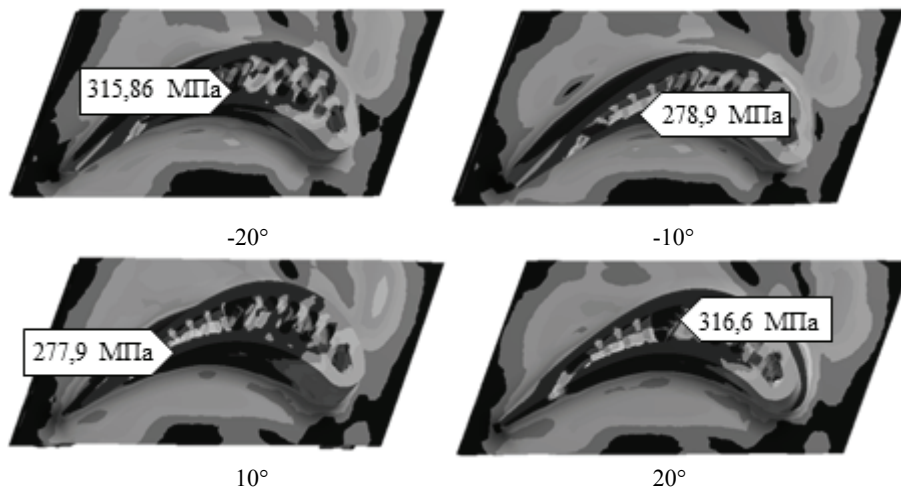


Рисунок 2 – Изменение полей интенсивностей напряжений в поперечных сечениях лопатки при повороте кристаллографических осей на -20° , -10° , 10° , 20° вокруг оси x

Работы [7, 8] посвящены анализу влияния и изменения азимутальной ориентации КГО на термоупругое состояние лопатки и выявления концентрации напряжений. Поэтому в данной работе рассмотрено влияние изменения аксиальной ориентации кристаллографических осей на термонапряженное состояние лопатки.

На рис. 2 приведено изменение распределения термоупругих напряжений в наиболее напряженных поперечных сечениях лопатки при повороте КГО в плоскости yz вокруг оси x .

На рис. 3 показаны зависимости распределения интенсивности напряжений в наиболее напряженных продольных сечениях лопатки при изменении азимутальной ориентации (поворот кристаллографических осей в плоскости xz вокруг оси y , что соответствует кристаллографической оси [010]).

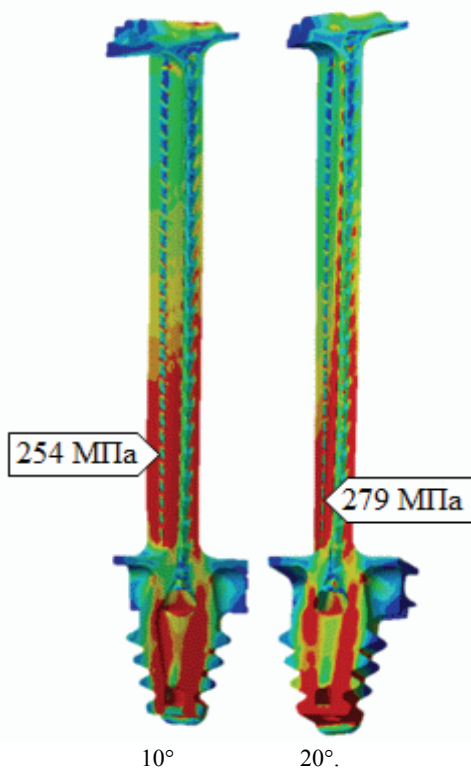


Рисунок 3 – Изменение полей интенсивностей напряжений в продольных сечениях лопатки при повороте кристаллографических осей на 10° , 20° вокруг оси y

На рис. 4 приведены изменения распределения напряжений в продольных сечениях лопатки, но в другой проекции при изменении КГО на углы -10° и 10° относительно оси y .

На основании результатов исследований, часть которых представлена на рис. 2 – 4, можно выявить влияние отклонения кристаллографических осей от азимутальной ориентации.

На рис. 5 представлено изменение максимальных интенсивностей напряжений при повороте КГО вокруг оси x .

На рис. 6 показано влияние максимальных интенсивностей напряжений при повороте кристаллографических осей вокруг оси y . На графиках видно, что напряженно-деформированное состояние при изменении аксиальной ориентации кристаллографических осей носит периодический характер.

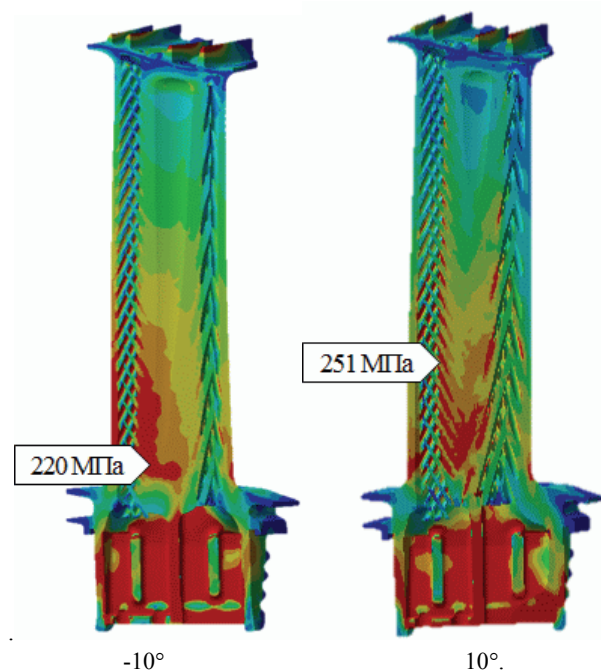


Рисунок 4 – Изменение полей интенсивностей напряжений в продольных сечениях лопатки при повороте кристаллографических осей на -10° , 10° вокруг оси y

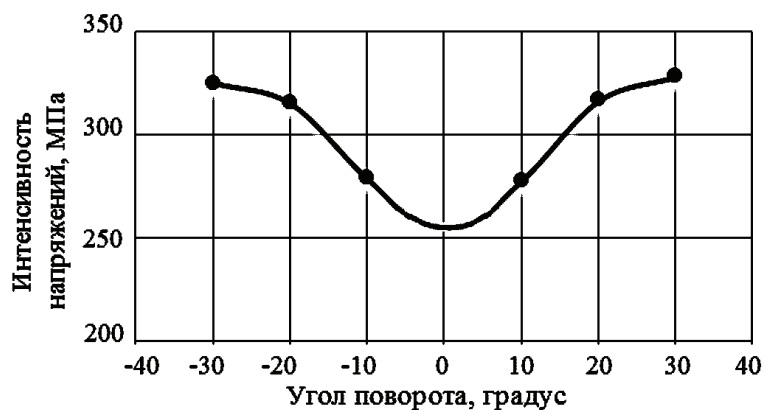


Рисунок 5 – Изменение максимальных интенсивностей напряжений при повороте кристаллографических осей вокруг оси x

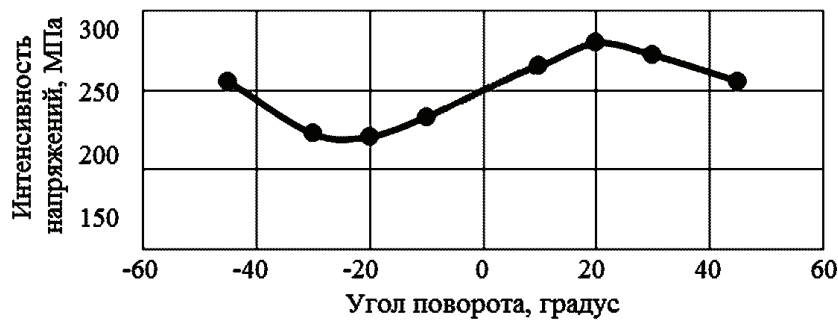


Рисунок 6 – Изменение максимальных интенсивностей напряжений при повороте кристаллографических осей вокруг оси y

Подобные исследования позволяют выявить влияние изменения ориентации кристаллографических осей на напряженно-деформированное состояние лопатки. При повороте кристаллографических осей происходит перераспределение всех напряжений. В лопатках с вихревой системой охлаждения перераспределение напряжений является весьма сложным, так как геометрическая форма каналов меняется от сечения к сечению. На распределение напряженно-деформированного состояния влияют также изменение температурного поля и начальная неоднородность материала. Из соображений обеспечения прочности лопатки [3 - 6] целесообразно ограничить изменение ориентации КГО при изготовлении лопатки, что приведет к ограничению роста максимальных термоупругих напряжений. В работах [7, 8] показано, что изменение азимутальной ориентации КГО определяется условием ограничения на значения изменения угла φ на 12° - 13° (рис. 7).

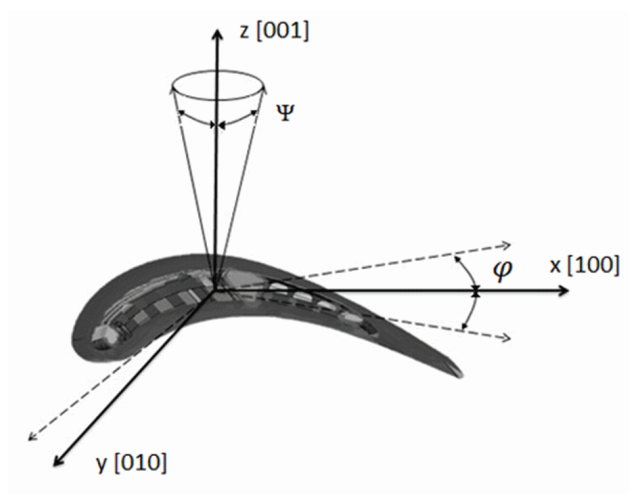


Рисунок 7 – Ограничения поворота кристаллографических осей

Для аксиальной ориентации КГО имеются ограничения на поворот кристаллографической оси [001] на угол ψ , который составляет 12° - 15° . При этом отклонение оси [001] от оси z не должны выходить за пределы конуса с углом ψ (рис. 7).

Аналогичные ограничения на поворот КГО рекомендуются в работах [4, 5] для монокристаллических лопаток с другой конфигурацией охлаждающих каналов. Кроме того, поворот КГО вызывает отклоне-

ние собственных частот лопаток. Чтобы изменения собственных частот лопатки находились в границах допустимого разброса (8 – 10%) необходимы ограничения на отклонения кристаллографических осей [6, 9]. Эти ограничения аналогичны ограничениям на поворот КГО связанным с термоупругими напряжениями.

Выводы. При изменении ориентации кристаллографических осей происходит перераспределение всех напряжений и изменение всей картины НДС лопатки.

Общая картина напряженно деформированное состояние циклически повторяется при повороте кристаллографических осей на 90° (от -45° до $+45^\circ$). При этом максимальные напряжения значительно изменяются. В связи с этим необходимо вводить ограничения на отклонения кристаллографических осей при изготовлении лопатки.

В предыдущих работах [7, 8] выявлено изменение азимутальной ориентации КГО, которое определяется условием ограничения на значения изменения угла φ на 12° - 13° . В данной работе исследовано влияние отклонения аксиальной ориентации кристаллографических осей в охлаждаемой монокристаллической лопатке. Для аксиальной ориентации КГО рекомендуются ограничения на поворот кристаллографической оси [001] на угол ψ , который составляет 12° - 15° . Выполнено обобщение результатов предыдущих исследований на ограничения отклонений кристаллографических осей.

Места локализации термоупругих напряжений часто совпадают с местами локализации вибрационных напряжений [6, 9], что создает дополнительную опасность. Поэтому для оценки прочностной надежности охлаждаемых монокристаллических лопаток необходимо проводить комплексный анализ их динамического напряженного состояния при колебаниях и статического термоупругого состояния.

Список литературы

1. Ножницкий Ю.А. О прочностной надежности монокристаллических рабочих лопаток высокотемпературных турбин перспективных ГТД / Ю.А. Ножницкий, Е.Р. Голубовский // Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования. Тр. ЦКТИ. – СПб, 2009. – Вып. 296. – С. 74–82.
2. Шалин Р.Е. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов и др. – М.: Машиностроение, 1997 – 336 с.

3. Wolf D.S. Stress analysis of a fist turbin vane using 3-dimantional model with non-linear material behaviour subjected to transient temperatures / D.S. Wolf // AIAA Pap. – 1981 – № 1437. – 5 p.

4. Придорожный Р.П. Расчетное исследование объемного напряженно-деформированного состояния монокристаллической охлаждаемой лопатки турбины / Р.П. Придорожный // Авиационно-космическая техника и технология. – 2002. – Вып. 34. – С. 119-123.

5. Придорожный Р.П. Влияние кристаллографической ориентации на объемное напряженно-деформированное состояние монокристаллической неохлаждаемой лопатки турбины / Р.П. Придорожный, А.В. Шереметьев // Вестник двигателестроения. – 2003. – Вып. 1. – С. 47-51.

6. Придорожный Р.П. Влияние кристаллографической ориентации на спектр собственных колебаний и предел выносливости монокристаллических рабочих лопаток турбин / Р.П. Придорожный, А.В. Шереметьев, А.П. Зиньковский // Проблемы прочности. – 2008. – № 5. – С. 15-27.

7. Воробьев Ю.С. Напряженно деформированное состояние охлаждаемой монокристаллической лопатки ГТД в температурном поле с учетом влияния ориентации кристаллографических осей. / Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова, Р. Жондовски, Т.Ю. Берлизова // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2015. – № 4. – С. 15 - 19. – ISSN 2413-4554.

8. Воробьев Ю.С. Влияние азимутальной ориентации кристаллографических осей на термоупругое состояние лопатки ГТД с вихревой системой охлаждения. / Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова, Р. Жондовски, Т.Ю. Берлизова // Проблемы прочности. – К.: 2016. – № 3. – С. 15-24.

9. Vorobiov Iu.S. Vibration characteristics of cooled single-crystal gas turbine blades / Iu.S. Vorobiov at all / Journal of vibration engineering & technologies. – December 2014. – Vol. 2, No. 6. – P. 537-541.

References (transliterated)

1. Nozhnitskiy YU.A., Golubovski Ye.R O prochnostnoy nadezhnosti monokristallicheskih rabochikh lopatok vysoko-

temperaturnykh turbin perspektivnykh GTD. Prochnost' materialov i resurs elementov energooborudovaniya Tr. TSKTI, Sankt Petersburg: 2009. Vyp. 296. P. 74-82.

2. Shalin R.Ye., Svetlov I.L. at all Monokristally ni-kelevykh zharoprochnykh splavov. Moscow: Mashinostroyeniye, 1997. 336 p.

3. Wolf D. S. Stress analysis of a fist turbin vane using 3-dimantional model with non-linear material behaviour subjected to transient temperatures. AIAA Pap. 1981 No 1437. 5 p.

4. Pridorozhnyy R.P. Raschetnoye issledovaniye ob"yemnogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya monokristallicheskoy okhlazhdayemoy lopatki turbiny. Aviat-sionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya, 2002. Vol. 34. P. 119-123.

5. Pridorozhnyy R.P., Sheremet'yev A.V. Vliyaniye kristallograficheskoy oriyentatsii na ob"yemnoye napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye monokristallicheskoy neokhlazhdayemoy lopatki turbiny. Vestnik dvigatelestroyeniya. 2003. Vol.1. P. 47-51.

6. Pridorozhnyy R.P., Sheremet'yev A.V., Zin'kovskiy A.P. Vliyaniye kristallograficheskoy oriyentatsii na spektr sobstvennykh kolebaniy i predel vynoslivosti monokristallicheskih rabochikh lopatok turbin. Problemy prochnosti. 2008. No 5. P. 15-27.

7. Vorob'yev Yu.S., Ovcharova N.Yu., Zhondkovski R., Berlizova T.Yu. Napryazhenno deformirovannoye sostoyaniye okhlazhdayemoy monokristallicheskoy lopatki GTD v temperaturnom pole s uchetom vliyaniya oriyentatsii kristallograficheskikh osey. Kompessornoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. 2015. No 4. P. 15 - 19. ISSN 2413-4554.

8. Vorob'yev Yu.S., Ovcharova N.Yu., Zhondkovski R., Berlizova T.Yu. Vliyaniye azimutal'noy oriyentatsii kristallograficheskikh osey na termouprugoye sostoyaniye lopatki GTD s vikhrevoy sistemoy okhlazhdeniya. Problemy prochnosti. Kyiv: 2016. No 3. P. 15-24.

9. Vorobiov Iu.S. at all Vibration characteristics of cooled single-crystal gas turbine blades. Journal of vibration engineering & technologies. December 2014. Vol. 2, No. 6. P. 537-541.

Почтына (received) 26.09.2018.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Воробієв Юрій Сергійович (Воробьев Юрий Сергеевич, Vorobiov Yuriy) – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу надійності та вібраційної міцності, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Подгорного НАН України, Харків, Україна; e-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6595-476X>.

Жандковски Ромуальд (Жандковски Ромуальд, Rzadkowski Romuald) – доктор технічних наук, професор, завідувач відділом динаміки та аеропружності, Інститут проточних машин ПАН, м. Гданськ, Польща; e-mail: z3@imp.gda.pl, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0560-1222>.

Овчарова Наталія Юрійівна (Овчарова Наталья Юрьевна, Ovcharova Nataliia) – кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник відділу надійності та вібраційної міцності, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Подгорного НАН України, Харків, Україна

Берлізова Тетяна Юрійівна (Берлизова Татьяна Юрьевна, Berlizova Tetiana) – кандидат технічних наук, провідний інженер відділу гідроаеромеханіки енергетичних машин, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Подгорного НАН України, Харків, Україна