

**Ю. С. ВОРОБЬЕВ, О. В. МАХНЕНКО, Н. Ю. ОВЧАРОВА, Т. Ю. БЕРЛИЗОВА,
П. Н. КУЛАКОВ**

ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЛОПАТОЧНОГО АППАРАТА ТУРБОМАШИН

АННОТАЦИЯ Рассматриваются особенности температурного, термоупругого и вибрационного состояния охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) из монокристаллических материалов с учётом ориентации кристаллографических осей. Проведён анализ концентрации напряжений в зоне эрозионных повреждений лопаток из титанового сплава для последних ступеней паровых турбин. Исследуются особенности скоростного деформирования элементов корпусов ГТД при ударных нагрузках. Показано, что использование новых материалов существенно расширяет возможности турбомашин.

Ключевые слова: турбомашини, лопатки, материалы, термоупругость, колебания, удар, метод конечных элементов (МКЭ).

**Iu. VOROBIEV, O. MAKHNENKO, N. OVCHAROVA, T. BERLIZOVA,
P. KULAKOV**

PROBLEMS OF NEW MATERIALS FOR TURBOMACHINE BLADING

ABSTRACT Increasing the unit and the power density and efficiency of turbomachines leads to increased intensity of thermal and mechanical loads on the blading. In this regard, there is need for new materials. Purpose of work is analysis of problems of the blading strength under different loads. The features of the thermal, thermoelastic and vibration state of the cooled blades of gas turbine engine from single-crystal materials are considered by finite element method. The influence of the axial orientation of the crystallographic axes in the thermoelastic state and parameters of blade vibrations are investigated. The use of titanium alloys allows to increase the length of the blades of the last stages of turbines for nuclear power plants, but these blades work in an environment of wet steam and prone to erosion. The analysis of stress concentration in the area of erosion damage of the blades from a titanium alloy for the last stages of a powerful steam turbine was carried out. Blading and corps of the gas turbine engine experiencing impact load during exploitation. Elements of corps are often made from composite materials. The features of high-rate deformation elements corps of the gas turbine engine under impact loads are investigated. The use of new materials are significantly extends the capabilities of turbomachines, but requires special research of strength, thermal elasticity, vibrations and high-rate deformation of the elements for appropriate structures.

Key words: turbomachine, blades, materials, thermoelasticity, vibrations, impact, FEM.

Введение

Лопаточный аппарат паровых и газовых турбин является их наиболее напряжённой и ответственной системой. Современная тенденция к увеличению единичной и удельной мощности турбоагрегатов приводит к росту параметров рабочего тела и, как следствие, к более интенсивным температурным статическим и динамическим нагрузкам. Требования к повышению экономичности и удельной мощности турбомашин при одновременном увеличении их надёжности и долговечности являются противоречивыми. В первую очередь это относится к лопаточному аппарату турбомашин. Наиболее высокие температуры воздействуют на лопатки первых ступеней газотурбинных двигателей (ГТД). Поэтому именно здесь используются жаропрочные монокристаллические сплавы. Возможности жаропрочных материалов отстают от потребностей современного газотурбостроения [1, 2]. Поэтому используется различные системы охлаждения лопаток в виде внутренних каналов и отверстий малого диаметра, причём форма внутренних каналов может быть как прямой, так и весьма сложной в случае вихревой системы охла-

ждения. Все это приводит к возникновению концентрации и локализации напряжений, а неравномерность температурных полей вызывает значительные температурные напряжения. Кроме того монокристаллические сплавы обладают неоднородностью механических свойств, которая зависит от ориентации кристаллографических осей (КГО). В результате возникают сложные задачи колебаний лопаток из монокристаллических сплавов. Стремление повысить единичную мощность паровых турбин приводит к увеличению длины лопаток последних ступеней, что можно достичь, используя титановые сплавы. В настоящее время созданы лопатки из титановых сплавов длиной 1200 мм при скорости вращения ротора 3000 об/мин. Титановые сплавы также широко используются для лопаток компрессоров ГТД и вентиляторных лопаток двухконтурных ГТД. В этих случаях необходимо учитывать повреждения и забоины в лопатках на входе ГТД и эрозионные повреждения в лопатках последних ступеней мощных паровых турбин. Кроме лопаток ударным воздействиям подвержены элементы корпусов ГТД. Здесь часто используются композитные материалы, которые сочетают свойства ограниченно-

го веса и противостояния ударным воздействиям. Для эффективного использования новых материалов в элементах турбомашин, необходимо рас-

смотреть ряд задач в области термоупругости, колебаний и скоростного деформирования.

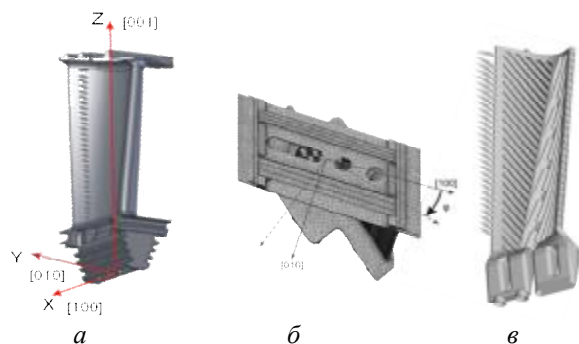


Рис. 1 – Охлаждаемая монокристаллическая лопатка: а – общий вид с обозначением КГО; б – направление поворота КГО; в – система внутренних охлаждающих каналов в виде вихревой матрицы

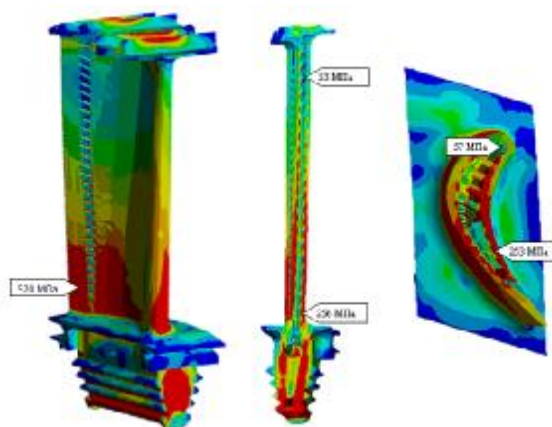


Рис. 2 – Распределение интенсивностей напряжений на поверхности и в сечениях рабочей лопатки под действием центробежных сил и температурного поля

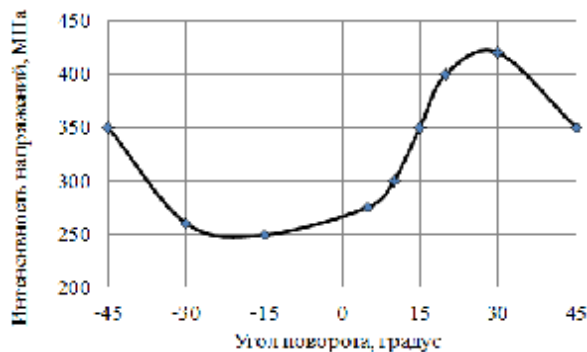


Рис. 3 – Изменение наибольших интенсивностей напряжений в лопатке при повороте КГО [100], [010] вокруг оси [001]

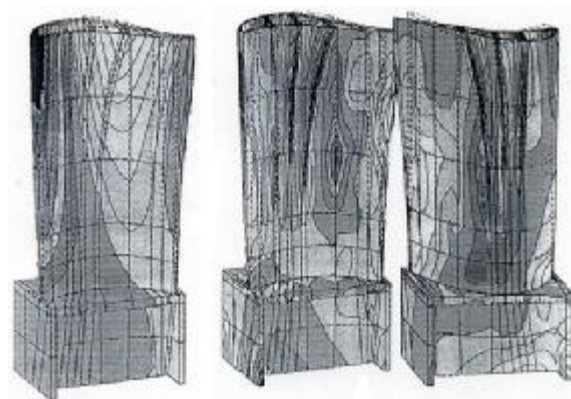


Рис. 4 – Колебания охлаждаемой лопатки: а – поля перемещений; б – поля напряжений

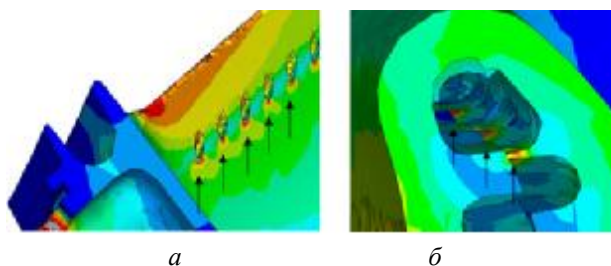


Рис. 5 – Зоны локализации напряжений: а – при первой форме колебаний (633,2 Гц); б – при третьей форме колебаний (2626 Гц)

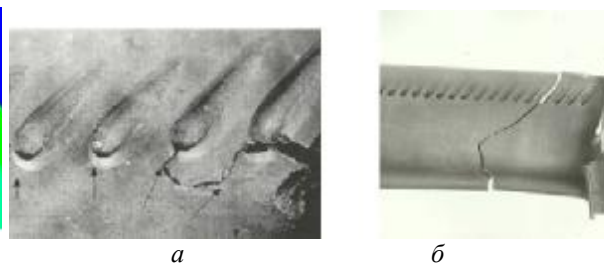


Рис. 6 – Результаты экспериментальных исследований: а – зоны зарождения трещин; б – характерные разрушения лопатки



Рис. 7 – Эрозионные повреждения на входной кромке лопатки

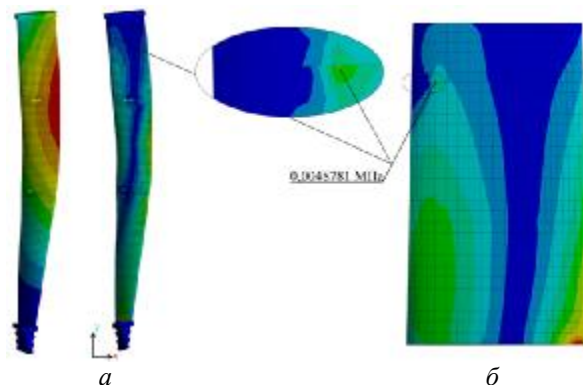


Рис. 8 – Колебания лопатки с эрозионными повреждениями:
а – поля перемещений; б – поля напряжений с выделением зоны повреждения

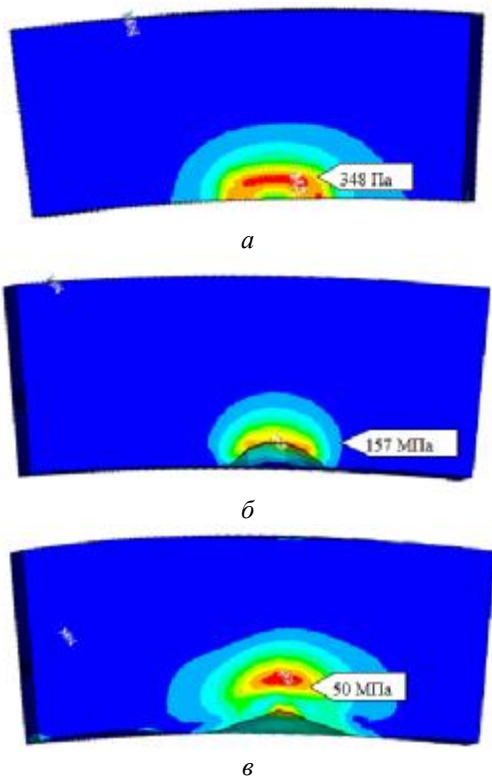


Рис. 9 – Распределение эквивалентных напряжений в сечении в зоне удара в моменты времени:
а – $t = 0,001$ с; б – $t = 0,01$ с; в – $t = 0,1$ с

Цель работы

Ответственные элементы современных турбомашин работают в условиях требующих применения новых материалов. Цель работы привести наиболее характерные примеры использования новых материалов для обеспечения эффективной работы элементов турбомашин и показать возникающие при этом проблемы.

Проблемы прочности охлаждаемых лопаток из монокристаллических сплавов

Задачи термоупругости и колебаний лопаток из монокристаллического материала являются одними из наиболее сложных. Монокристаллические сплавы обладают неоднородностью механических свойств, которые связаны с ориентацией КГО.

Задачи термоупругости и колебаний для охлаждаемых лопаток с прямой системой каналов рассмотрены в ряде работ [2–6].

В данном случае рассматривается распределение термоупругих напряжений в лопатке со сложной вихревой системой охлаждения и каналами для плёночного охлаждения. Общий вид лопатки и положения КГО представлены на рис. 1.

Распределения термоупругих напряжений на поверхности лопатки и в различных сечениях представлены на рис. 2.

Известно, что при изменении ориентации кристаллографических осей происходит перераспределение всех напряжений и изменение всей картины НДС лопатки [4–6]. Целесообразно построить некоторую кривую, которая отражает изменение наибольших интенсивностей напряжений независимо от места их расположения при изменении ориентации КГО (рис. 3).

При повороте КГО [100] и [010] вокруг оси [001], совпадающей с осью Z, наибольшие интенсивности напряжений изменяются периодически, повторяясь через 90°. Целесообразно ограничить повышение интенсивностей напряжений величиной 320 МПа (на 30 %), что соответствует повороту КГО на 12–15° [6].

Такие же ограничения на поворот кристаллографических осей рекомендуются для лопаток других конструкций [1, 4, 5], а также соответствуют условиям разброса собственных частот лопаток не более чем на 8–10 % [7].

При колебаниях охлаждаемых лопаток возникает значительная локализация напряжений, которая определяется формой каналов и температурными полями. Так на рис. 4 приведены одна из форм перемещений и распределение напряжений в лопатке с прямыми охлаждающими каналами [1].

Хорошо видно смещение максимальных напряжений от входной и выходной кромок к угловым зонам на поверхности охлаждаемых кана-

лов. Это объясняется тем, что вокруг охлаждающих каналов материал лопатки имеет более низкую температуру и более высокий модуль упругости, чем в наиболее нагретых зонах входной и выходной кромок. Ещё более сложное распределение напряжений наблюдается при колебаниях лопатки с вихревой системой охлаждения, представленной на рис. 1. Весьма характерным для таких лопаток является локализация напряжений на поверхности внутренних каналов вихревой матрицы и в зоне отверстий для выхода охлаждающего воздуха при плёночном охлаждении, где могут зарождаться трещины. В работе [2] на основе экспериментальных исследований показано, что магистральные трещины в монокристаллических лопатках распространяются вдоль КГО. Для образцов и лопаток с аксиальной ориентацией [001] они расположены под углами $35-45^\circ$ к оси Z . Исследования колебаний данной лопатки выявили места зарождения возможных трещин (рис. 5).

Результаты экспериментов выполненных на ГП НПКГ «Зоря» - «Машпроект» по разрушению лопаток подтверждают достоверность численных исследований локализации вибрационных напряжений (рис. 6) [7].

Видно развитие магистральной трещины под углом близким к 45° , что привело к разрушению лопатки.

Результаты численных исследований хорошо согласуются с экспериментальными и объясняют характер и места повреждений и разрушений лопаток, обнаруженные при лабораторных испытаниях лопаток на ГП НПКГ «Зоря» - «Машпроект».

Эрозионная прочность лопаток из титановых сплавов

Лопатки последних ступеней мощных паровых турбин часто работают во влажно паровой среде и подвержены эрозии [8]. В паровой турбине К-1000-60/3000 для атомной электростанции использовались лопатки последней ступени длиной 1200 мм из титанового сплава ТС5. При эксплуатации турбины на ОП «Хмельницкая АЭС» после отработки более 180 тыс. часов наблюдались заметные эрозионные повреждения (рис. 7).

Металлографический и фрактографический анализ показали, что механические свойства титанового сплава ТС5 лопаток в зоне эрозии в общем соответствуют нормативным значениям. Дegrадации механических свойств материала лопаток после 180 тыс. часов эксплуатации не наблюдается. Однако эрозионные повреждения вызывают появления зон локализации и концентрации напряжений. Эти повреждения приводят к изменению предела усталости материала и изменению остаточного ресурса. Эрозионные повреждения моделировались с помощью разреза с радиусом в вершине

0,5 мм, что соответствовало замерам, как и в лопатках из стальных сплавов [8].

Был проведён анализ вибрационных напряжений в лопатке без повреждений и с повреждениями при свободных колебаниях и при воздействии гармоник с частотой $nz = 2100$ Гц, где $z = 42$ – число лопаток направляющей ступени, а $n = 50$ Гц – частота вращения ротора. Величина возмущающей гармоник была выбрана условно. На рис. 8 представлены эквивалентные вибрационные напряжения в лопатке с повреждением при действии гармоник, которая вызвана направляющими лопатками.

В результате определены относительные изменения вибрационных напряжений в области эрозионных повреждений. Показано, что коэффициент концентрации вибрационных напряжений при повреждениях лежит в пределах $K = 1,8-2,5$. Это сопоставимо с коэффициентом концентрации напряжений при забоинах [9]. На основе литературных данных может быть определено снижение предела выносливости для лопаток из титановых сплавов в зависимости от относительных размеров повреждений [9].

Поведение элементов из композитных материалов при ударных нагрузках

Лопаточный аппарат и корпуса ГТД подвержены воздействию ударных нагрузок от посторонних предметов и фрагментов ротора двигателя. Ряд элементов корпусов изготавливается из композитных материалов. При локальных ударных нагрузках наибольшие перемещения и напряжения развиваются в ограниченных зонах и быстро убывают по пространственным координатам и во времени [10]. Эти особенности динамического НДС позволяют выделить соответствующую область элемента и провести для неё уточнённые расчёты с использованием более густой сетки. При скоростях ударника 300–400 м/с напряжения в элементах корпуса остаются в упругой области. При более высоких скоростях ударника до 1000 м/с возникают пластические деформации, а после разгрузки наблюдаются остаточные деформации (рис. 9).

На рис. 9 показаны поля эквивалентных динамических напряжений в сечении в зоне удара в разные моменты времени при воздействии ударника на цилиндрический элемент корпуса из композитного материала.

Видно развитие упругопластических напряжений, которые достигают максимума при $t = 0,01$ с и появление остаточных напряжений после разгрузки при $t = 0,1$ с. Зона развития интенсивных напряжений является весьма ограниченной.

Выводы

Использование монокристаллических материалов, титановых сплавов и композитных материалов позволяет существенно расширять возможности повышения единичной и удельной мощности турбомашин их экономичности и надёжности, но требует специальных исследований, связанных с особенностями их эксплуатации.

Список литературы

- 1 **Боровков, В. М.** Материалы и прочность оборудования ТЭС [Текст] / **В. М. Боровков, Л. Б. Гецов, Ю. С. Воробьев, А. Я. Копсов, С. В. Петин, Г. Д. Пигрова, А. И. Рыбников.** – Санкт Петербург : Изд-во СПбГПУ, 2008. – 612 с. – ISBN 978-5-7422-1887-6.
- 2 **Ножницкий, Ю. А.** О прочностной надёжности монокристаллических рабочих лопаток высокотемпературных турбин перспективных ГТД [Текст] / **Ю. А. Ножницкий, Е. Р. Голубовский** // Прочность материалов и ресурс элементов энергооборудования. Тр. ЦКТИ. – Вып. 296. – СПб, 2009. – С. 74–82. – ISSN 0321-3366.
- 3 **Шалин, Р. Е.** Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов [Текст] : моногр. / **Р. Е. Шалин, И. Л. Светлов, Е. Б. Качанов и др.** – М. : Машиностроение, 1997. – 336 с.
- 4 **Придорожный, Р. П.** Оценка влияния азимутальной ориентации на напряженность монокристаллической охлаждаемой лопатки в системе перфорационных отверстий [Текст] / **Р. П. Придорожный, А. В. Шереметьев, А. П. Зиньковский** // Вестник двигателестроения. – 2013. – № 1. – С. 53–57. – ISSN 1727-0219.
- 5 **Ebrahimia, F.** Effect of notch orientation on the evolution of plasticity in superalloy single crystals [Text] / **F. Ebrahimia, L. E. Foreroa, S. Siddiquib, N. Arakereb** // Mechanical and Aerospace Engineering / University of Florida, Gainesville, FL, United States. – May 2006.
- 6 **Воробьев, Ю. С.** Особенности температурного и термоупругого состояния монокристаллической охлаждаемой лопатки ГТД [Текст] / **Ю. С. Воробьев, Н. Ю. Овчарова, Т. Ю. Берлизова, С. Б. Кулишов, А. Н. Скрицкий** // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков : НАКУ «ХАИ» – 2014. – № 10(117). – С. 75–78. – ISSN 1727-7337.
- 7 **Vorobiov, Iu. S.** Vibration characteristics of cooled single-crystal gas turbine blades [Text] / **Iu. S. Vorobiov, K. Yu. Dyakonenko, S. B. Kulishov, A. N. Skritskij and R. Rzadkowski** // Journal of vibration engineering & technologies. – December 2014 – Vol. 2, No. 6., – P. 537–541. – ISSN 2321-3558.
- 8 **Петухов, А. Н.** Сопротивление усталости деталей ГТД [Текст] / **А. Н. Петухов.** – М. : Машиностроение. – 1993. – 232 с.
- 9 **Шубенко, А. Л.** Влияние эрозии на вибрационные характеристики рабочих лопаток влажно-паровых турбин [Текст] / **А. Л. Шубенко, А. Э. Ковальский, Ю. С. Воробьев, С. П. Конило, В. Н. Романенко** // Проблемы машиностроения. – 2003. – Т. 6, № 1. – С. 10–26.

- 10 **Vorobiov, Iu. S.** FEM Analysis of Cylindrical Structural Elements under Local Shock Loading [Text] / **Iu. S. Vorobiov, L. Kruszka, N. Y. Ovcharova** // Applied Mechanics and Materials Trans Tech Publications, Switzerland. – 2014. – Vol. 566. – P. 499–504. – ISSN 1662-7482. – doi: 10.4028.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Borovkov, V. M., Getsov, L. B., Vorobiov, Iu. S., Kopsov, A. Ya., Petinov, S. V., Pigrova, G. D. and Rybnikov, A. I.** (2008), *Materialy i prochnost' oborudovaniya TJeS [Materials and strength of TPP equipment]*, Publishing House Sankt Peterburg, St. Petersburg, Russia, ISBN 978-5-7422-1887-6/
- 2 **Nozhnitskiy, Yu. A and Golubovskiy, Ye. R.** (2009), ²O prochnostnoj nadezhnosti monokristallicheskih rabochih lopatok vysokotemperaturnyh turbin perspektivnyh GTD [About the strength reliability of single crystal rotor blades of the high-temperature turbine of perspective gas turbin engeen]², *Prochnost' materialov i resurs jelementov jenergooborudovaniya. Tr. CKTI [Strength of materials and resource elements of power. Tr. TSKTI]*, vol. 296, pp. 74–82, ISSN 0321-3366.
- 3 **Shalin, R. Ye., Svetlov, I. L., Kachanov, Ye. B. et al.** (1997), *Monokristally nikelovyh zharoprochnyh splavov: monogr [Single crystals of nickel superalloys]*, Mashinostroenie Engineering, Moscow, Russia.
- 4 **Pridorozhnyy R. P., Sheremet'yev, A. V. and Zin'kovskiy, A. P.** (2013), ²Ocenka vlijaniya azimutal'noj orientacii na naprjazhennost' monokristallicheskoj ohlazhdaemoj lopatki v sisteme perforacionnyh otverstij [Assessing the impact of the azimuthal orientation of the tensions cooled single crystal blades in a system of perforations]², *Vestnik dvigatelestroeniija [Journal of Engine building]*, no. 1, pp. 53–57, ISSN 1727-0219.
- 5 **Ebrahimia, F., Foreroa, L. E., Siddiquib, S. and Arakereb, N.** (2006), ²Effect of notch orientation on the evolution of plasticity in superalloy single crystals², *Mechanical and Aerospace Engineering, University of Florida, Gainesville, FL, United States, May 2006.*
- 6 **Vorobiov, Iu. S., Ovcharova, N. Iu., Berlizova, T. Iu., Kulishov, S. B. and Skritskiy, A. N.** (2014), ²Osobennosti temperaturного i termouprugogo sostojaniya monokristallicheskoj ohlazhdaemoj lopatki GTD [Features temperature and thermoelastic state-cooled single-crystal GTE blades]², *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija [Aerospace Engineering and Technology]*, no. 10(117), pp. 75–78, ISSN 1727-7337.
- 7 **Vorobiov, Iu. S., Dyakonenko, K. Yu., Kulishov, S. B., Skritskij A. N. and Rzadkowski R.** (2014), ²Vibration characteristics of cooled single-crystal gas turbine blades², *Journal of vibration engineering & technologies*, vol. 2, no. 6, December, pp. 537–541, ISSN 2321-3558.
- 8 **Petukhov, A. N.** (1993), *Soprotivlenie ustalosti detalej GTD [Resistance to fatigue GTE parts]*, Mashinostroenie [Engineering], Moscow, Russia.
- 9 **Shubenko, A. L., Koval'skiy, A. E., Vorobiov, Yu. S., Koniло, S. P., Romanenko, V. N.** (2003), ²Vlijanie jerozii na vibracionnye harakteristiki rabochih lopatok vlazhno-parovyh turbin [Effect of erosion on the vibration characteristics of rotor blades wet-steam turbines]²,

Problemy mashinostroenija [Engineering Problems],
vol. 6, no. 1, pp. 10–26.
10 **Vorobiov, Iu. S., Kruszka, L. and Ovcharova, N. Y.**
(2014), ²FEM Analysis of Cylindrical Structural Ele-

ments under Local Shock Loading², *Applied Mechanics and Materials Trans Tech Publications, Switzerland*,
vol. 566, pp. 499–504, ISSN 1662-7482, doi: 10.4028.

Сведения об авторах (About authors)

Воробьев Юрий Сергеевич – доктор технических наук, профессор, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина; e-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua

Vorobiev Iurii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Problems of Mechanical Engineering A.N. Podgorny NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine.

Махненко Олег Владимирович – доктор технических наук, профессор, Институт электросварки НАН Украины, Киев, Украина; e-mail: makhnenko@paton.kiev.ua

Makhnenko Oleg – Doctor of Technical Sciences, Professor, Electric Welding Institute NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine.

Овчарова Наталья Юрьевна – ведущий инженер, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина.

Ovcharova Nataliia – Leading Engineer, Institute of Problems of Mechanical Engineering A.N. Podgorny NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine.

Берлизова Татьяна Юрьевна – аспирант, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина

Berlizova Tatiana – Postgraduate, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Кулаков Петр Николаевич – аспирант, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина

Kulakov Petr – Postgraduate, Institute of Problems of Mechanical Engineering A.N. Podgorny NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Воробьев, Ю. С. Проблемы использования новых материалов для лопаточного аппарата турбомашин [Текст] / **Ю. С. Воробьев, О. В. Махненко, Н. Ю. Овчарова, Т.Ю. Берлизова, П.Н. Кулаков** // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПИ», 2016. – № 9(1181). – С. 44–49. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.06.

Please cite this article as:

Vorobiev, Iu., Makhnenko, O., Ovcharova, N., Berlizova, T. and Kulakov, P. (2016), ²Problems of new materials for turbomachine blading², *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 9(1181), pp. 44–49, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.06.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Воробійов, Ю. С. Проблеми використання нових матеріалів для лопаткового апарату турбомашин [Текст] / **Ю. С. Воробійов, О. В. Махненко, Н. Ю. Овчарова, Т.Ю. Берлізова, П.М. Кулаков** // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПИ», 2016. – № 9(1181). – С. 44–49. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.06.

АНОТАЦІЯ Розглядаються особливості температурного, термопружного і вібраційного стану охолоджуваних лопаток ГТД з монокристалічних матеріалів з урахуванням орієнтації кристалографічних осей. Проведено аналіз концентрації напружень в зоні ерозійних пошкоджень лопаток з титанового сплаву для останніх ступенів парових турбін. Досліджуються особливості швидкісного деформування елементів корпусів ГТД при ударних навантаженнях. Показано, що використання нових матеріалів істотно розширює можливості турбомашин.

Ключові слова: турбомашини, лопатки, матеріали, термопружність, коливання, удар, МСЕ.

Поступила (received) 15.01.2016