

УДК 621.165

doi: 10.20998/2078-774X.2017. 11.10

Ю. А. ЮДИН, В. П. СУББОТОВИЧ, А. Ю. ЮДИН, А. Ю. БОЯРШИНОВ**ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ РАДИУСА ГАЛТЕЛИ ПРИКОРНЕВОЙ ЗОНЫ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ**

АННОТАЦИЯ Работа посвящена решению важной научно-технической проблемы – повышению эффективности части низкого давления мощной паровой турбины. Проведены прочностные и аэродинамические расчеты при четырех значениях радиуса галтели прикорневой зоны рабочей лопатки последней ступени ЦНД паровой турбины и определены рациональные значения радиуса галтели. Предлагается уменьшить радиус галтели до 25–30 мм, что позволит улучшить аэродинамические характеристики при сохранении прочностных показателей.

Ключевые слова: рабочая лопатка, прикорневая зона, галтель, прочность, газодинамика.

Yu. A. YUDIN, V. P. SUBOTOVICH, A. Yu. YUDIN, A. Yu. BOLARSHYNOV**CHOOSING THE RATIONAL RADIUS VALUE FOR THE FILLET IN THE ROTOR BLADE ROOT ZONE**

ABSTRACT The root zone of rotor blades is the less studied element of the flow section of steam turbine. This problem is especially vital for the long blades in the low pressure section. The design of this zone is related to two aspects embracing aerodynamic and strength properties. The investigations were carried out using the models that were constructed based on the real rotor blade of the last stage of a turbine operated by the PJSC "Turboatom" with the working section length of 1030 mm. These investigations enabled the establishment of the rational shape for the blade zone in question for the first time. To reduce the stress concentration the passage from the blade surface to the shank seat was made using the fillets. When the data on the stressed state character of a transient zone are unavailable the fillet radius is selected based on the conceptions of appropriateness of the selection of the feasibly highest value of it. The available radius of 45 mm was selected arbitrary enough for the given fillet. The investigations carried out showed the possibility of an increase in the aerodynamic efficiency with the retention of strength indices. Consideration was given to the problems of formation of active and root zones of the blade and the influence of different geometric factors was analyzed. It has been established that it is quite possible to reduce the root fillet radius from 45 to 25 or 30 mm.

Key words: rotor blade, root zone, fillet, strength and the gas dynamics.

Введение

К наименее исследованным элементам прочной части паровой турбины относится прикорневая зона рабочих лопаток. В этой зоне имеется проблема сопряжения корневых сечений лопатки с поверхностью полки хвостовика. Особенно это актуально для длинных лопаток части низкого давления. Проектирование этой зоны связано с двумя категориями – аэродинамическими и прочностными. Для снижения концентрации напряжений в корневой зоне сопряжение профильной части лопатки с поверхностью полки хвостовика обычно выполняют с помощью галтели определенного радиуса, чтобы обеспечить большой запас прочности. При отсутствии данных о характере напряженного состояния переходной зоны радиус галтели выбирается исходя из представлений о целесообразности выбора возможно большей его величины [1–3]. С одной стороны, чем больше радиус галтели, тем меньше неравномерность распределения напряжений в прикорневой зоне лопатки из-за снижения концентрации напряжений [4–6]. С другой стороны увеличение радиуса галтели приводит к загромождению каналов рабочей решетки и создает ухудшенные условия течения рабочего тела [7–9].

Цель работы

Целью данного исследования является определение рационального значения радиуса галтели прикорневой зоны рабочей лопатки последней ступени на основе анализа результатов расчетных исследований влияния различных радиусов галтели на аэродинамику и распределение напряжений.

Представленные ниже результаты проведенных исследований показывают возможность выбора минимально допустимых радиусов галтелей по наружному и внутреннему контурам прикорневой зоны, исходя из условия сохранения конструкционной прочности лопатки, при улучшении аэродинамических характеристик.

Прочностные характеристики прикорневой зоны

Исследования выполнены при помощи программного комплекса ANSYS на моделях, которые построены на основе реальной рабочей лопатки последней ступени турбин ПАО «Турбоатом» с длиной рабочей части 1030 мм.

На рис. 1 приведено распределение напряжений при величинах радиусов галтели R равных 45, 30, 25 и 20 мм. При переходе от радиуса

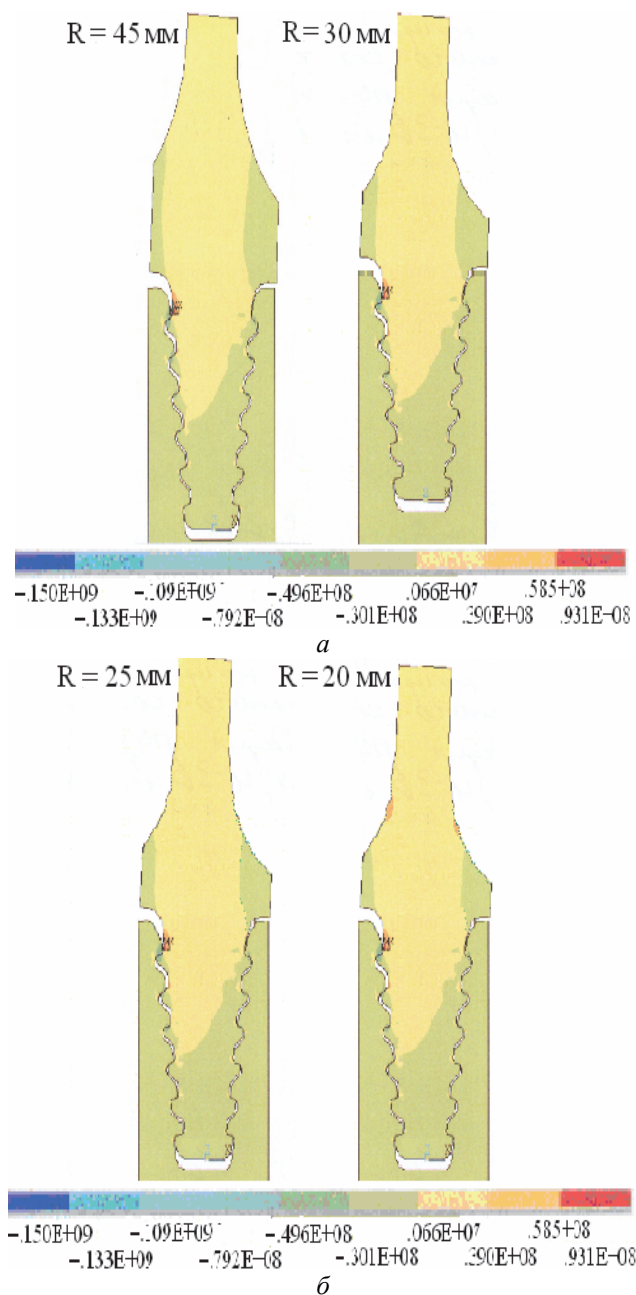


Рис. 1 – Распределение напряжений при радиусах скругления прикорневой галтели:
 а – 45, 30 мм; б – 25, 20 мм

$R = 45$ мм к радиусу $R = 30$ мм практически не наблюдается изменения средних и максимальных напряжений. Однако проявляется тенденция к снижению напряжений при уменьшении радиуса галтели в пределах нескольких процентов, что можно объяснить, главным образом, снижением массы галтели и, соответственно, нагрузки от центробежных сил при уменьшении радиуса. Таким образом, в исследованных пределах не выявлено отрицательного влияния уменьшения величины галтели на напряженное состояние прикорневой зоны лопатки.

При уменьшении величины радиуса прикорневой галтели до 25 мм и 20 мм (см. табл. 1),

средние напряжения остаются в пределах нормы. Однако при радиусе 20 мм значение максимальных напряжений в точечной зоне на галтели превышает допустимый предел текучести на 20 %, который равен для данного материала рабочей лопатки 680 МПа.

Таблица 1 – Значения напряжений

Радиус, мм	Напряжения, МПа	
	максимальные	средние
45	620	185
30	650	194
25	707	351
20	815	428

Кроме того, при выполнении радиуса прикорневой галтели около 20 мм, могут возникнуть технологические трудности.

Таким образом, по прочностным характеристикам предпочтительным является радиус галтели 25–30 мм.

Газодинамические расчеты прикорневой зоны

Аэродинамические расчеты выполнены с помощью CFD программы и определены зависимости относительного коэффициента профильных потерь ($\zeta_{пр} = \zeta_{прi} / \zeta_{пр min}$) при различных радиусах галтели (рис. 2). В ранее выполненных исследованиях [8, 9] определено, что при снижении величины галтели от $R = 45$ мм до $R = 30$ мм на расстояниях 20 мм и 30 мм от корня профильные потери в исследованном диапазоне режимов в пределах рассматриваемого участка лопатки снижаются в 2–2,5 раза при режимах близких к расчетному, а на других режимах в 2,5–3,5 раза. Эти аэродинамические исследования дополнены данными о влиянии меньшего радиуса галтели $R = 25$ мм (рис. 2), который приемлем по прочностным характеристикам. Профильные потери по сравнению с вариантом галтели $R = 30$ мм снизились на 15–20 % в исследованном диапазоне чисел Маха 0,4–1,15.

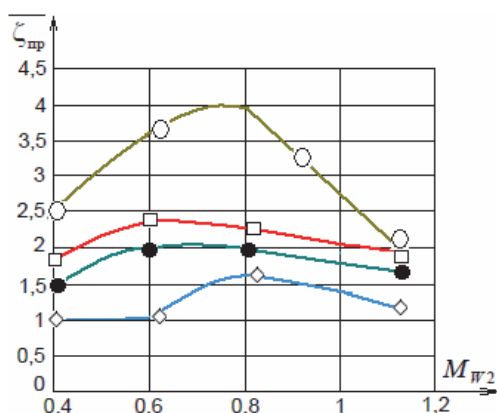


Рис. 2 – Зависимость относительного коэффициента профильных потерь: \diamond – 0 мм; \bullet – 25 мм; \square – 30 мм; \circ – 45 мм

Таким образом, в исследованном диапазоне радиусов галтелей корневой зоны рабочей лопатки рациональными можно принять значения радиусов 25–30 мм, как по прочностным, так и аэродинамическим показателям.

Выводы

При решении комплексной задачи по улучшению аэродинамического качества прикорневой зоны рабочей лопатки при сохранении необходимых прочностных показателей определены рациональные значения радиусов галтелей по наружно-

му и внутреннему контурам прикорневой зоны, которые находятся в диапазоне 25–30 мм.

Список литературы

- 1 Сухинин, В. П. Исследование напряженно-деформированного состояния двухъярусных рабочих лопаток / В. П. Сухинин, Г. М. Меллерович, Р. М. Герман // Теплоэнергетика. – 1985. – № 1. – С. 53–56.
- 2 Петерсон, Р. Коэффициенты концентрации напряжений / Р. Петерсон. – Москва : Мир, 1977. – 304 с.
- 3 Ellyin, F. Experimental Study of oblique Circular Cylindrical Apertures in Prates / F. Ellyin // Experimental Mechanics. – 1970. – Vol. 10. – 195 p.
- 4 Шубенко, А. Л. Улучшение равномерности распределения напряжений в елочных хвостовых соединениях рабочих лопаток турбин / А. Л. Шубенко, В. П. Сухинин, Т. Н. Фурсова, А. Ю. Бояршинов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – № 12(986). – С. 120–127. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-774X.
- 5 Подгорный, А. Н. Решение осесимметричной задачи методом конечных элементов для тел сложных конструктивных форм / А. Н. Подгорный, П. П. Гонтаровский, Г. А. Марченко // Проблемы машиностроения. – 1976. – Вып. 3. – С. 9–14.
- 6 Kirchhof, G. Uber das Gleichgewicht und die Bewegung eines unendlich dunnen elastischen Stabes / G. Kirchhof // Journ. Fur Math. – 1959. – No. 56. – P. 28.
- 7 Лейкин, А. С. Об общей неравномерности распределения напряжений в замках лопаток турбомашин в связи с влиянием профиля лопатки / А. С. Лейкин // Изв. АН СССР. ОТН. Механика и Машиностроение, 1960. – № 4. – С. 149–153.
- 8 Субботович, В. П., Исследование прикорневой зоны лопатки турбины / В. П. Субботович, Ю. А. Юдин, А. Ю. Юдин, А. Ю. Бояршинов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – № 13(987). – С. 34–37. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2078-774X.
- 9 Бояршинов, А. Ю. Повышение эффективности прикорневой зоны рабочей лопатки / А. Ю. Бояршинов // Тези доповідей конференції молодих вчених і спеціалістів. 21–24 листопада 2016 р. – Харків : ПІМаш НАН України, 2016. – С. 41.

Bibliography (transliterated)

- 1 Suhinin, V. P., Mellerovich, G. M. and German, R. M. (1985), "Issledovanie napryuzhenno-deformirovannogo sostoyaniya dvuhyarusnih rabochih lopatok [Study of stress-strain state of rotor blades bunk]", *Teploenergetika*, No. 1, pp. 53–56.
- 2 Peterson, R. (1977), *Koeffitsienty koncentracii napryazhenii* [Stress concentration factors], Mir, Moscow, Russia.
- 3 Ellyin, F. (1970), "Experimental Study of oblique Circular Cylindrical Apertures in Prates", *Experimental Mechanics*, No. 10, pp. 195.
- 4 Shubenko, A. L., Sukhinin, V. P., Fursova, T. N. and Boyarchinov, A. U. (2013), "Improve the uniformity of the stress distribution in tail connections of shoulder-blades of turbines", *Bulletin of NTU "KhPI". Series:*

- Power and heat engineering processes and equipment*, No. 12(986), pp. 120–127, ISSN 2078-774X.
- 5 **Podgornii, A. N., Gontarovskii, P. P. and Marchenko, G. A.** (1976), "Reshenie osesimmetrichnoi zadachi metodom konechnih elementov dlya tel slojnih konstruktivnih form [Solution axisymmetric problem by finite element method for bodies of complex structural shapes]", *Problemi mashinostroeniya*, No. 3, pp. 9–14.
 - 6 **Kirchhof, G.** (1959), "Uber das Gleichgewicht und die Bewegung eines unendlich dunnen elastischen Stabes", *Journ. Fur Math.*, No. 56, P. 28.
 - 7 **Leikin, A. C.** (1960), "Ob obschei neravnomernosti raspredeleniya napryazhenii v zamkah lopatok turbomashin v svyazi s vliyaniem profilya lopatki [On the general unevenness of distribution of stresses in the castles of turbomachinery blades due to the influence of the blade profile]", *Izv. AN SSSR. OTN. Mehanika i Mashinostroenie*, No. 4, pp. 149–153.
 - 8 **Subbotovich, V.P., Yudin, Yu.A., Yudin A.Yu., Boyarshinov, A.Yu.** (2013), Investigation of hub zone turbine rotor blade, *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 13(987), pp. 34–37, ISSN 2078-774X.
 - 9 **Boyarshinov, A. Yu.** (2016), "Povishenie effektivnosti prikornevoi zoni rabochei lopatki [Effectiveness increase of rotor blade root area]", *Tezi dopovidei konferencii molodih vchenih i specialistiv [Conference thesis report of young scientists and specialists]*, 21–24 November 2016, pp. 41, IPMash NANU, Kharkov, Ukraine.

Сведения об авторах (About authors)

Юдин Юрий Алексеевич – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры турбиностроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: alex78ua@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9770-2273.

Yudin Yuriy – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Professor, Professor of Turbine Projection Chair named after prof. Makovski V. M., National Technical university "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Субботович Валерий Петрович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры турбиностроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: alex78ua@yahoo.com, ORCID 0000-0002-7051-4758.

Subotovich Valery – Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Professor of Turbine Projection Chair named after prof. Makovski V. M., National Technical university "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Юдин Александр Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник кафедры турбиностроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: alex78ua@yahoo.com, ORCID 0000-0001-5098-7796.

Yudin Alexander – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Research Fellow, Senior Researcher of Turbine Projection Chair named after prof. Makovski V. M., National Technical university "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Бояршинов Алексей Юрьевич – кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины; г. Харьков, Украина.

Boiarshynov Alexey – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Junior Researcher of Department Processes and Optimization of Turbomachinery Designs, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Юдин, Ю. А. Выбор рационального значения радиуса галтели прикорневой зоны рабочей лопатки / **Ю. А. Юдин, В. П. Субботович, А. Ю. Юдин, А. Ю. Бояршинов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 11(1233). – С. 64–67. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.11.10.

Please cite this article as:

Yudin, Yu. A., Subotovich, V. P., Yudin, A. Yu. and Boiarshynov, A. Yu. (2017), "Choosing the Rational Radius Value for the Fillet in the Rotor Blade Root Zone", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 11(1233), pp. 64–67, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.11.10.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Юдін, Ю. О. Вибір раціонального значення радіусів галтелі прикореневої зони робочої лопатки / **Ю. О. Юдін, В. П. Субботович, О. Ю. Юдін, О. Ю. Бояршинов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 11(1233). – С. 64–67. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.11.10.

АНОТАЦІЯ Робота присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми – підвищення ефективності частини низького тиску потужної парової турбіни. Проведені міцнісні та аеродинамічні при чотирьох значеннях радіуса галтелі прикореневої зони робочої лопатки останнього ступеня ЦНТ парової турбіни і визначені раціональні значення радіуса галтелі. Пропонується зменшити радіус галтелі до 25–30 мм, що дозволить поліпшити аеродинамічні характеристики при збереженні міцнісних показників.

Ключові слова: робоча лопатка, прикоренева зона, галтель, міцність, газодинаміка.

Поступила (received) 08.02.2017