

УДК 621.165

**В.П. СУББОТОВИЧ**, канд. техн. наук; проф. НТУ «ХПИ»;  
**Ю.А. ЮДИН**, канд. техн. наук; проф. НТУ «ХПИ»;  
**А.Ю. ЮДИН**, канд. техн. наук; с.н.с. НТУ «ХПИ»;  
**А.Ю. БОЯРШИНОВ**, инженер ИПМаш НАН України, Харьков

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИКОРНЕВОЙ ЗОНЫ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ

Выполнены расчетные исследования прикорневой зоны рабочей лопатки последней ступени паровой турбины. Показано, что при уменьшении прикорневой галтели улучшается газодинамика без ухудшения прочностных показателей.

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

### Введение

К наименее исследованным элементам проточной части паровой турбины относится прикорневая зона рабочих лопаток. Эта проблема особенно касается длинных лопаток части низкого давления. Проектирование этой зоны связано с двумя категориями – аэродинамическими и прочностными. Поскольку здесь имеет место сопряжение профильной части лопатки с поверхностью полки хвостовика практически под прямым углом, естественно, требуется для снижения концентрации напряжений выполнять радиус прикорневой галтели максимально возможной величины. Оценка максимального уровня напряжений в местах резких переходов рассматриваемых элементов по имеющимся в литературе сведениям о величинах коэффициентов концентрации не достоверна, поскольку эти данные основаны на решении плоских или осесимметричных задач теории упругости.

### Состояние вопроса

В данном случае задача осложняется тем, что здесь имеет место сопряжение двух объемных конструкций с различными формами и скелетными линиями поперечных сечений различной кривизны. Кривизна корневого профиля определяется газодинамическими параметрами, а кривизна осевой линии хвостовика технологическими факторами и добиться при этом полного совпадения форм активной части лопатки и хвостовика невозможно. Вследствие этого имеет место существенная неравномерность распределения напряжений в прикорневой зоне лопатки [1].

Исследования, проведенные на моделях, построенных на основе реальной рабочей лопатки последней ступени турбин ОАО «Турбоатом» с длиной рабочей части 1030 мм позволили впервые установить рациональные формы рассматриваемой прикорневой зоны.

Для снижения концентрации напряжений переход от поверхности лопатки к полке хвостовика выполняется галтелями. При отсутствии данных о характере напряженного состояния переходной зоны радиус галтели выбирается исходя из представлений о целесообразности выбора возможно большей его величины. Таким образом, радиус галтели величиной 45 мм для указанной лопатки был выбран достаточно произвольно. Поставленная задача заслуживает внимания с двух точек зрения. С одной стороны, чем больше радиус галтели, тем меньше неравномерность

---

© В.П. Субботович, Ю.А. Юдин, А.Ю. Юдин, А.Ю. Бояршинов, 2013

распределения напряжений в прикорневой зоне лопатки из-за снижения концентрации напряжений. С другой стороны увеличение радиуса галтели приводит к загромождению каналов рабочей решетки и создает ухудшенные условия течения рабочего тела. При этом следует отметить, что в корневой решетке шаговое отношение и без того очень низкое. Отношение шага к хорде профиля равно  $\sim 0,3$ . Канал при таких условиях характеризуется диффузорными участками. Общая картина такова, что не только ухудшается работа этой зоны, но и вытесняется рабочее тело в вышележащие каналы, что связано с загромождением прикорневой зоны и ухудшением её аэродинамических характеристик.

### Результаты исследований

В современных конструкциях лопаток последних ступеней с елочными хвостовиками для снижения неравномерности передачи силовых линий от активной части лопатки к хвостовику его тело выполнено по дугам окружностей, что позволяет приблизить кривизну хвостовика к кривизне скелетной линии корневого сечения лопатки [2]. При этом уменьшаются вылеты входной и выходной кромок (рис. 1, точки «а» и «в») относительно сечения хвостовика по первым впадинам.

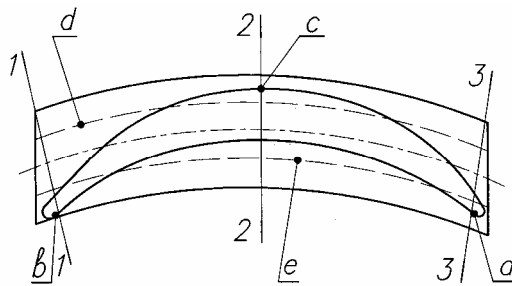


Рис. 1 – Корневое сечение:  
1, 2, 3 – исследованные сечения;  
а – входная кромка; в – выходная кромка;  
с – спинка; d, e – контуры сечения  
хвостовика по первым впадинам

Имевшие место в эксплуатации повреждения лопаток в зоне свисания выходной кромки профильной части лопатки за пределы переходной полки вызвали повреждения лопаток и послужили основанием для проведения усталостных испытаний натуральных моделей при асимметричном цикле нагружения. Устранение вылета выходной кромки корневого сечения обеспечило повышение усталостной прочности и надежности работы.

Резкое изменение форм сечений в зоне перехода от профильной части к хвостовой

создает выраженный характер неравномерности распределения напряжений в сечении хвостовика по первым впадинам вблизи торцов с внутренней стороны профиля (точки «а» и «в», рис. 1) и в средней зоне с наружной стороны профиля (точка «с»), т.е. в местах, где элементы корневого сечения имеют максимальные вылеты относительно обводов сечения хвостовика по первым впадинам (контуры «е» и «d», рис. 1).

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.

Для исследования использован программный пакет ANSYS. Были выбраны три сечения (1, 2, 3 рис. 1) и получена картина распределения напряжений при различных радиусах прикорневой галтели по наружному и внутреннему контурам лопатки.

На рис. 2 приведено распределение напряжений при величинах радиусов галтели  $R$  равных 45 и 30 мм. При переходе от радиуса  $R = 45$  мм к радиусу  $R = 30$  мм практически не наблюдается изменения средних и максимальных напряжений. Однако в пределах нескольких процентов проявляется тенденция к снижению напряжений при

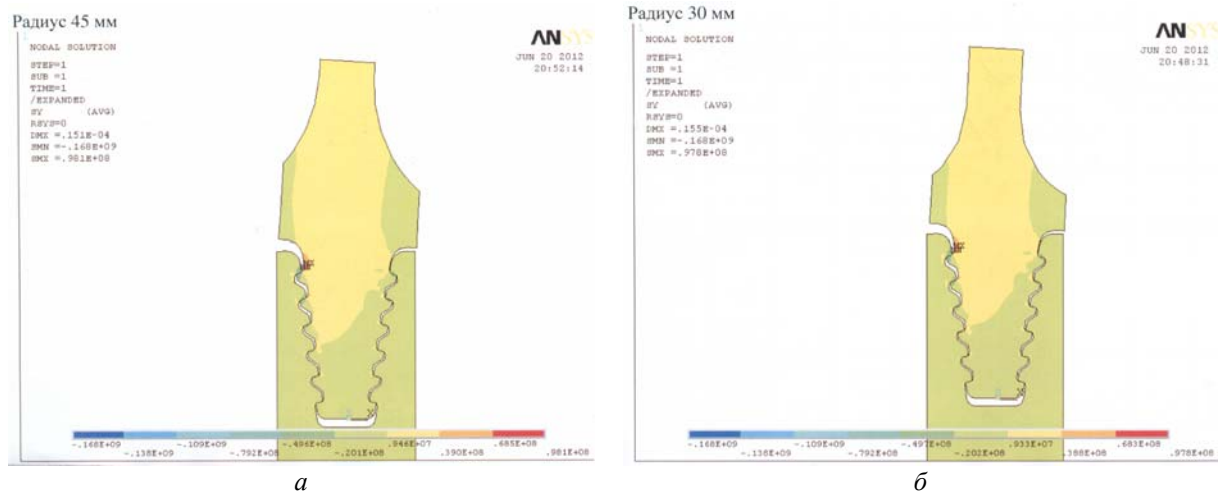


Рис. 2 – Картина напряженно-деформированного состояния в сечении 2 при радиусах галтели 45 мм (а) и 30 мм (б)

уменьшении радиуса галтели, 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.

Для исследования эффекта от уменьшения величины галтели на аэродинамику прикорневой зоны проведены расчетные исследования сечений лопатки.

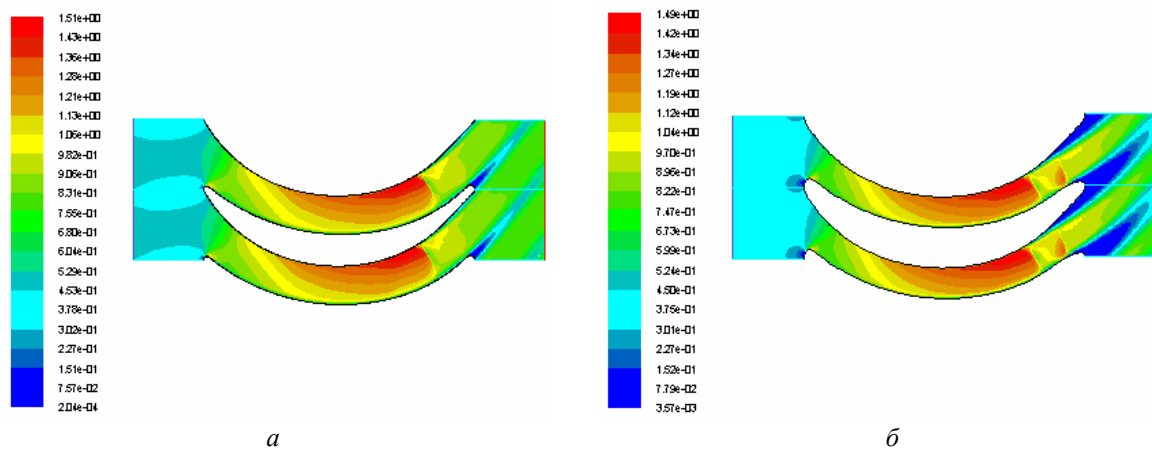
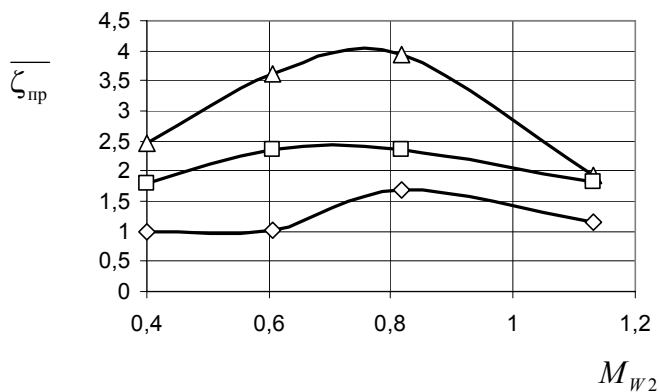


Рис. 3 – Распределение числа Маха в канале корневой зоны на режиме  $M_{w2} = 0,82$  на расстоянии 30 мм от корня при  $R = 30$  мм (а) и  $R = 45$  мм (б)

Из распределения числа Маха в каналах корневой зоны с галтелями  $R = 45$  мм и  $R = 30$  мм на расстоянии 30 мм от корня (рис. 3) следует, что при одинаковом перепаде давлений, соответствующий теоретическому числу Маха  $M_{w2} = 0,82$ , в обоих вариантах имеются местные сверхзвуковые зоны. В рассматриваемом канале при  $R = 30$  мм (рис. 3а) имеет место только один скачок уплотнения и небольшой локальный отрыв потока на спинке профиля до горлового сечения, а в узком канале с галтелью  $R = 45$  мм (рис. 3б) имеются два скачка уплотнения. Первый скачок возникает на спинке до горлового сечения примерно на таком же расстоянии от выходных кромок, как и в канале с  $R = 30$  мм, второй скачок уплотнения – со стороны животика

профіля вблизи выходной кромки. При этом отрыв потока развивается за пределы выходной кромки, что приводит к существенному увеличению кромочного следа и к изменению угла выхода потока.



$\diamond$  –  $\zeta_{pr}$  в канале корневой зоны без галтелей (на расстоянии 30 мм от корня при  $R = 30$  мм);  
 $\square$  –  $\zeta_{pr}$  в канале на расстоянии 20 мм от корня при  $R = 30$  мм;  
 $\Delta$  –  $\zeta_{pr}$  в канале на расстоянии 30 мм от корня при  $R = 45$  мм  
 Рис. 4 – Зависимость относительного коэффициента профильных потерь  $\zeta_{pr} = \zeta_{pri} / \zeta_{prmin}$  от числа Маха  $M_{w2}$

На данном этапе исследований 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 (рис. 4).

### Выводы

Проведены расчетные исследования по определению распределения напряжений и аэродинамических характеристик прикорневой зоны рабочей лопатки.

Представленные результаты показывают возможность уменьшения радиусов галтелей по наружному и внутреннему контурам прикорневой зоны. Таким образом, решена комплексная задача – улучшение аэродинамического качества этой зоны лопатки при обеспечении прочностных показателей и надежности конструкции.

**Список литературы:** 1. Лейкин, А.С. Об общей неравномерности распределения напряжений в замках лопаток турбомашин в связи с влиянием профиля лопатки [Текст] / А.С. Лейкин // Изв. АН СССР, ОТН, Механика и Машиностроение, 1960. – № 4. – С. 149-153. 2. Сухинин, В.П. Экспериментальные исследования объемного напряженного состояния элементов лопаток [Текст] / В.П. Сухинин, И.Б. Волькевич // Динамика и прочность машин. – 1977. – Вып. 25. – С. 81-86.

Поступила в редколлегию 01.02.13

УДК 621.165

**Исследование прикорневой зоны рабочей лопатки турбины** [Текст] / В.П. Субботович, Ю.А. Юдин, А.Ю. Юдин, А.Ю. Бояршинов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 13(987). – С. 34-37. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2078-774X.

Виконані розрахункові дослідження прикорневої зони робочої лопатки останнього ступеня парової турбіни. Встановлено, що при зменшенні прикорневої галтели поліпшується газодинаміка без погіршення міцностних показників.

**Ключові слова:** робоча лопатка турбіни, прикорнева зона, галтель, міцність, газодинаміка.

Computational investigations of last stage steam turbine rotor blade hub zone are performed. It is shown that reducing hub fillet improved gas dynamics without reducing strength characteristics.

**Keywords:** turbine rotor blade, hub zone, fillet, strength, gas dynamics.