

УДК 621.165 : 539.4

В.П. СУХИНИН, д-р техн. наук, Т.Н. ФУРЦОВА

Украинская инженерно-педагогическая академия,
г. Харьков, Украина, e-mail: tatiananf@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ХВОСТОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН

У роботі розглядається розподіл напруг для хвостового з'єднання грибоподібного типу в об'єму конструкції при різних варіантах контакту по опорних площинах за допомогою експериментального методу фотопружності. Запропоновані способи поліпшення розподілу напруг за рахунок вибору оптимальних форм опорних площин.

In work, distributing of tensions is examined for tail connection of mushroom-like type in the volume of construction at the different variants of contact on supporting grounds by the experimental method of photoelasticity. The methods of improvement of distributing of tensions are offered due to the choice of optimum forms of supporting grounds.

Обеспечение эксплуатационной надежности турбоагрегата в значительной степени связано с уровнем напряженно-деформированного состояния (НДС) его элементов. К одному из наиболее ответственных элементов турбины относится узел крепления рабочей лопатки к диску ротора – хвостовое соединение, работающее в условиях сложно-напряженного состояния.

Статическое растяжение хвостового соединения центробежными силами и его изгиб вызывают неравномерное распределение усилий на контактных площадках зубцов, что определяет общую картину распределения напряжений. Это обусловлено, главным образом, точностью изготовления в пределах допусков, а также соотношением податливостей тел хвостовика и грибка обода диска. Местная неравномерность напряженного состояния определяется коэффициентами концентрации напряжений и зависит, в основном, от конструктивных особенностей соединения [1].

Влияние неравномерности распределения напряжений особенно остро проявляется в условиях экстремальных нагрузок. Разрушения хвостовиков при появлении трещин в зонах концентрации напряжений являются самыми распространенными видами их повреждений. Примером могут служить разрушения грибовидных хвостовых соединений турбины К-300-240, показанные в [2]. Очаг

разрушений был расположен на острой кромке, выходящей на торец хвоста.

В связи с тем, что грибок диска представляет собой тонкое сплошное кольцо, выполненное по диаметру окружности (рис. 1), в применяемых конструкциях с опорными площадками хвостовика в виде плоскости контакт происходит по краям опорных площадок, и в связи с весьма малой площадью контакта напряжения здесь достигают значительных величин. Это обстоятельство может оказывать влияние

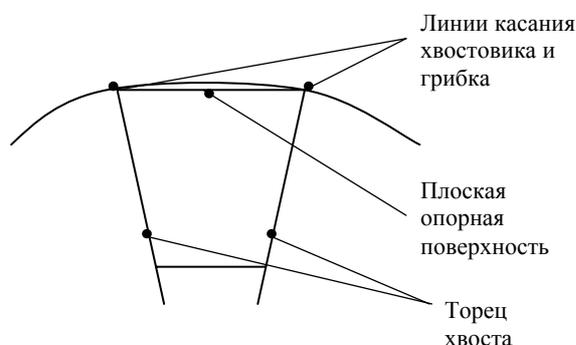


Рис. 1. Контакт опорных площадок по краям хвостового соединения

и на характер общей картины НДС хвостовых соединений.

В данной работе представлены результаты исследования распределения напряжений в объеме конструкции трехопорного грибовидного хвостового соединения при различных вариантах контакта по опорным площадкам. Анализ объемного напряженного состояния позволяет усовершенствовать конфигурацию – разработать и выбрать оптимальные конструктивные формы хвостовых соединений, обеспечивающих более равномерное распределение напряжений, а также обладающих наибольшей несущей способностью и надежностью в работе.

Для получения картины распределения напряжений при трехмерной постановке задачи был применен поляризационно-оптический метод (фотоупругости) с «замораживанием», который позволяет выявить общую и местную картину распределения напряжений, включая внутренние области детали.

Методика изучения распределения напряжений

Напряженное состояние моделей хвостового соединения изучалось под воздействием усилий, имитирующих статическое растяжение от центробежных сил, которые определяют, в основном, напряженность соединения. Нагрузка принималась равномерно распределенной по поперечному сечению лопатки на достаточном удалении от корневого сечения, что обеспечивалось специальным нагрузочным приспособлением на шарнирных подвесах. Линия действия растягивающей силы (равнодействующей) проходила через центр тяжести поперечных сечений моделей.

В таблице представлены величины нагрузок, выбранные таким образом, чтобы в моделях при температуре «замораживания» происходили упругие деформации.

Таблица 1.

Модели	$P, Н$	$F_{сеч}, мм^2$	$\sigma_{ном}, МПа$
1	70	2700	0,026
2	50	2700	0,022
3	30	2700	0,011

Материал, из которого отливались блоки, – композиция, содержащая эпоксидную смолу ЭД-20 и метилгидрофталиевый ангидрид МГТФА с добавлением ускорителя УПП-20. Из полученных блоков изготавливались модели хвостовика лопатки и грибка диска в натуральную величину при полном геометрическом подобии. Из этих же блоков вырезались тарировочные балочки, с помощью которых находились величины E и C ($E = 457 \text{ кг/см}^2$, $C = 1440 \text{ (м} \cdot \text{см)/кг}$).

Для нахождения напряжений во внутренних точках моделей по расчетным сечениям их разрезали на срезы и субсрезы, представляющие собой пластинки толщиной 2 мм. Определение напряжений производилось по стандартной методике с помощью разности касательных напряжений [3].

Зазоры по опорным площадкам обеспечивались подгонкой при сборке за счет хвостовиков. Расчетные сечения моделей представлены на рисунке 2.

Для удобства сравнения полученных результатов были использованы безразмерные величины напряжений K_x, K_y, K_z , вычисленные по формулам:

$$K_{xi} = \frac{\sigma_{xi}}{\sigma_{ном}}; \quad (1)$$

$$K_{yi} = \frac{\sigma_{yi}}{\sigma_{\text{НОМ}}} ; \quad (2)$$

$$K_{zi} = \frac{\sigma_{zi}}{\sigma_{\text{НОМ}}} . \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{НОМ}} = \frac{P}{F_{\text{к}}}$ – номинальные напряжения в корневом сечении лопатки;

P – приложенная нагрузка;

$F_{\text{к}}$ – площадь корневого сечения лопатки (табл. 1).

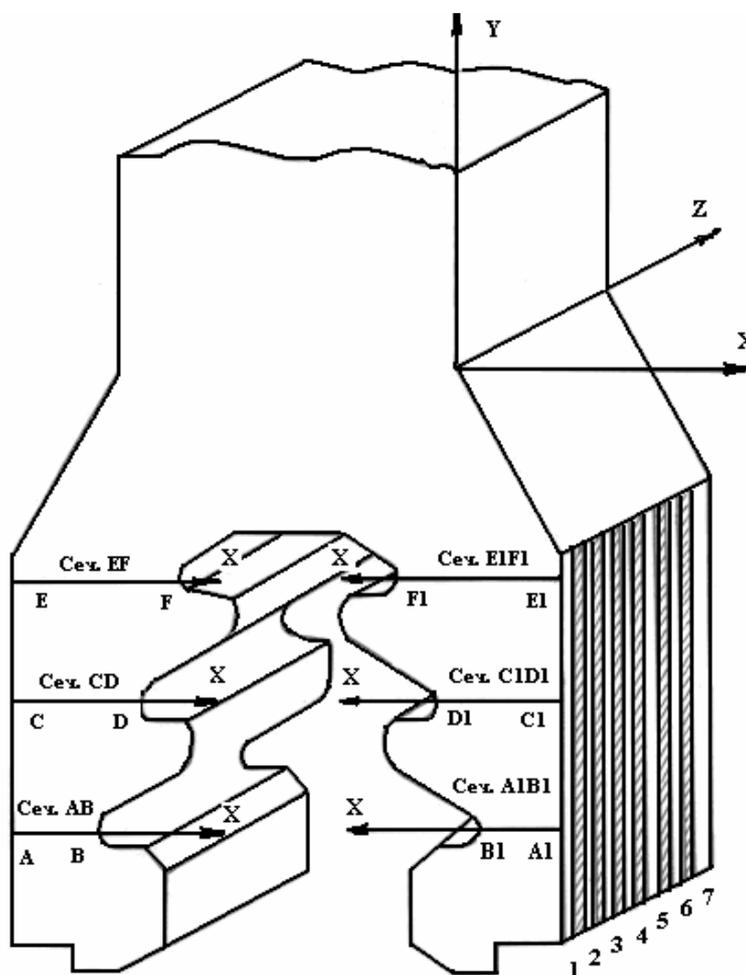


Рис. 2. Расположение сечений и срезов в хвостовике

Результаты исследования

Так как наибольшей величины в рассматриваемых сечениях моделей достигают растягивающие напряжения σ_y , то именно они и учитываются при дальнейшем анализе.

На рисунках 3–5 представлены графики распределения безразмерных напряжений K_y в исследуемых сечениях при различных сочетаниях зазоров между контактными площадками хвостовика и грибка обода диска.

В модели 1 (рис. 3) контакт осуществлялся по трем парам опор, представляющим собой плоские поверхности хвостовика и дуговые опорные поверхности грибка обода диска.

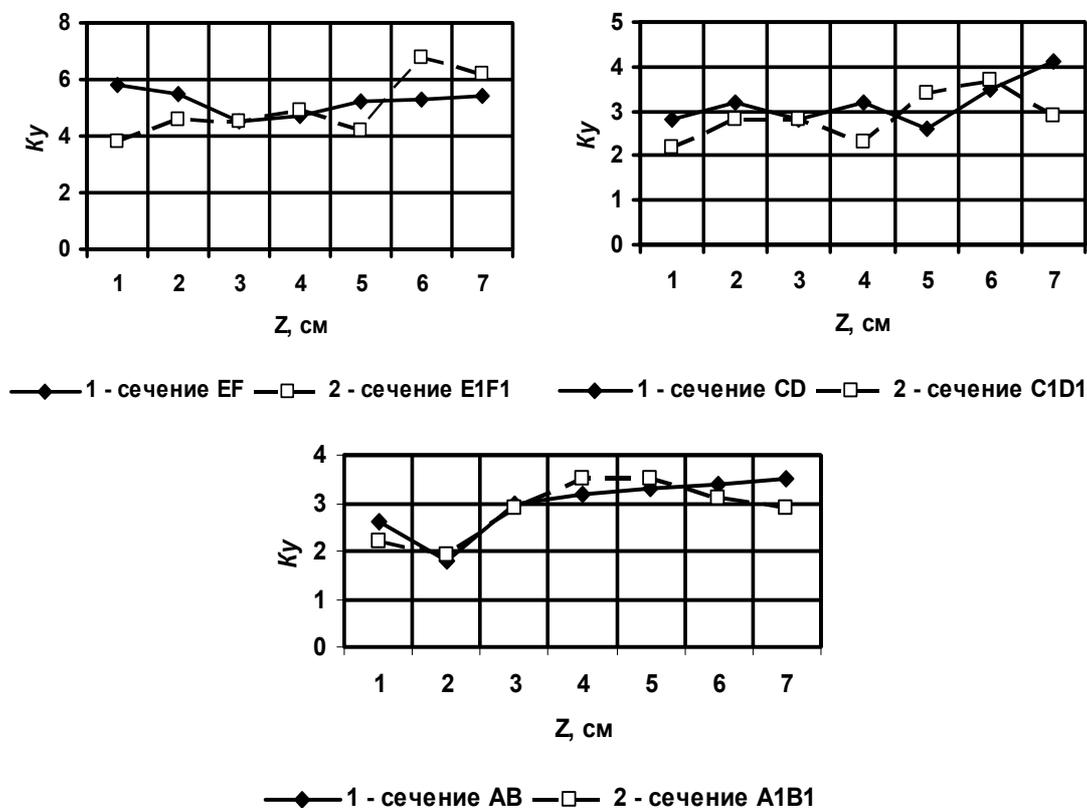


Рис. 3. Распределение безразмерных напряжений $K_{у\max}$ по толщине хвоста. Модель 1

Как было сказано выше, отклонения размеров от теоретических, в пределах заданного поля допусков на изготовление, могут обуславливать появление зазоров между опорными площадками. На рис. 4, модель 2, рассмотрен вариант, когда контакт происходит по двум верхним парам зубцов. На рис. 5, модель 3, показано распределение напряжений при работе верхней опорной площадки.

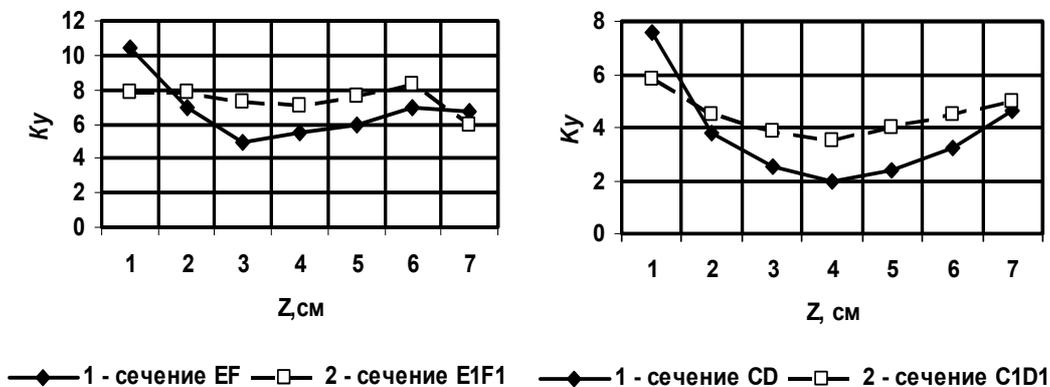


Рис. 4. Распределение безразмерных напряжений $K_{у\max}$ по толщине хвоста. Модель 2

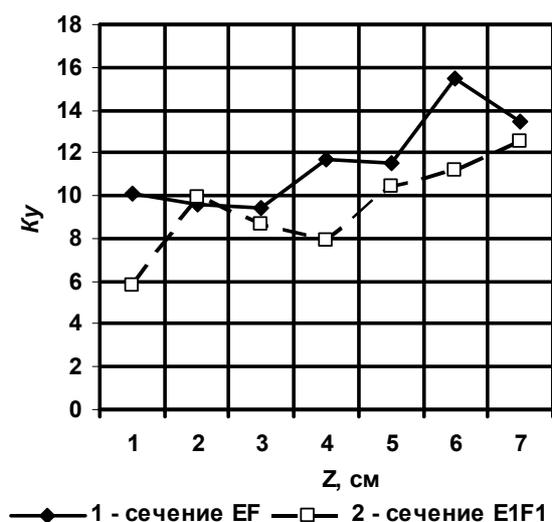


Рис. 5. Распределение безразмерных напряжений $K_{y\max}$ по толщине хвоста. Модель 3

Как видно из рисунков 3–5, в моделях 2 и 3 происходит перераспределение напряжений по сравнению с моделью 1, определяемое зазорами. Напряженное состояние в местах наибольшей концентрации возрастает, соответственно, в 1,5 и 2,5 раза. Таким образом, уменьшение количества контактирующих опор резко увеличивает неравномерность распределения напряжений K_y , которая усугубляется тем, что контакт хвостовика и обода диска имеет место в точках у торцов хвостовика.

Для снижения концентрации напряжений на торцах (рис. 3–5), а также уменьшения связанной с этим возможности образования трещин на поверхности профиля в опасных сечениях и обеспечения более полной и равномерной работы всех контактных площадок, необходимо определить оптимальную форму хвостовика, обеспечивающую необходимые прочностные свойства. Это соответствует одной из главных задач при проектировании турбин – выбору конструктивных форм узлов, в частности, хвостового соединения, которые обладают наибольшей несущей способностью.

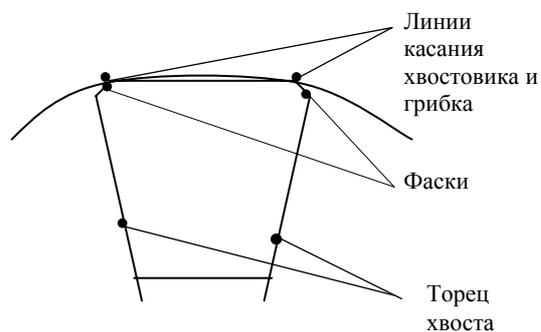


Рис. 6. Контактные площадки с фасками

рассмотренным выше моделям).

В данной работе рассмотрен также вариант хвостового соединения, в котором опорные площадки представляют собой плоскости с фасками у торцов (рис. 6). В этом случае максимум напряжений отмечается в зонах контакта, удаленных от торцов хвостовика.

На рис. 7–9 показано распределение напряжений по толщине хвостовиков с этими опорными площадками. В модели 4 контакт осуществлялся по трем опорам, в модели 5 – по двум и в модели 6 представлен случай, когда в работе находится одна верхняя опорная площадка (соответственно

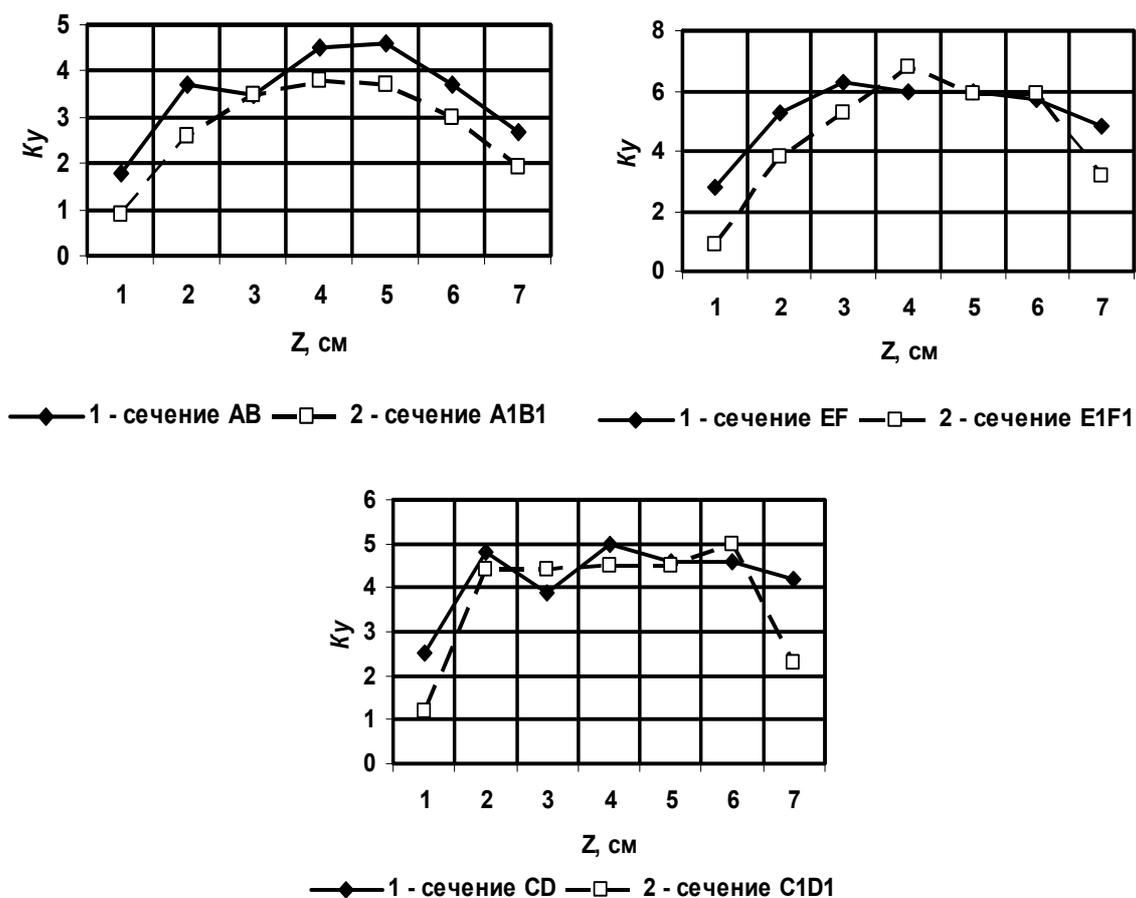


Рис. 7. Распределение безразмерных напряжений $K_{y_{\max}}$ по толщине хвоста. Модель 4

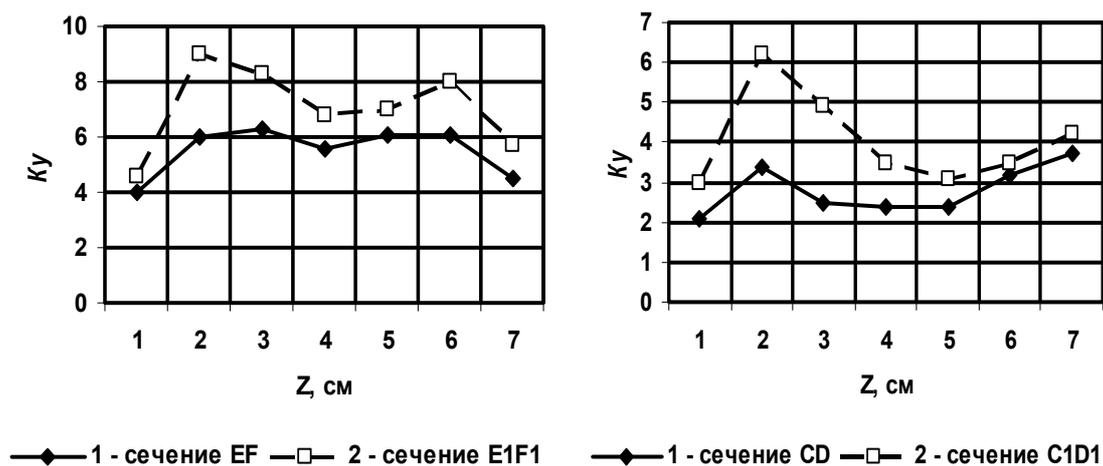


Рис. 8. Распределение безразмерных напряжений $K_{y_{\max}}$ по толщине хвоста. Модель 5



Рис. 9. Распределение безразмерных напряжений $K_{y\max}$ по толщине хвоста. Модель 6

Аналогично варианту опорных поверхностей в виде плоскостей без изломов, в случае выполнения опорных поверхностей с фасками в наиболее напряженных условиях находится верхнее сечение (EF – E1F1). Здесь максимальные напряжения K_y превосходят примерно в 1,5 раза напряжения по сечению CD – C1D1 и сечению АВ – A1B1. Если за счет появления зазоров не контактируют нижняя или нижняя и средняя площадки, напряженное состояние также возрастает в 1,5–2,5 раза в сравнении с вариантом контакта по трем опорам.

Анализ результатов

1. В случае, когда опорные площадки хвостовика представляют собой плоскости в применяемых сейчас хвостовых соединениях, контакт происходит по краям опорных площадок. Напряжения достигают максимума на внешней плоскости профиля хвоста, снижаясь к центру (табл. 2).

Таблица 2.

Сечения	Модель 1	Модель 2	Модель 3
EF – E1F1	от 6,0 до 4,8	от 9,5 до 6,0	от 13,2 до 8,0
CD – C1D1	от 3,5 до 2,6	от 7,0 до 3,0	–
AB – A1B1	от 3,15 до 2,0	–	–

За счет выполненных фасок максимальных значений напряжения достигают в центре хвостовика по толщине, резко уменьшаясь к внешним краям (табл. 3).

Таблица 3.

Сечения	Модель 4	Модель 5	Модель 6
EF – E1F1	от 6,2 до 2	от 8,5 до 6	от 14 до 8,5
CD – C1D1	от 4,6 до 2	от 5,5 до 3	–
AB – A1B1	от 4 до 2	–	–

2. В обоих случаях происходит перераспределение напряжений, если в результате появления зазоров контактируют не все опорные площадки.

3. Значения максимальных напряжений по расчетным сечениям в моделях хвостовиков 1, 2, 3 и в моделях 4, 5, 6 (см. табл. 2, 3) достаточно близки. Так, при контакте по трем опорам, сравнительные данные для двух типов опорных поверхностей приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Сечение	Модель 1	Модель 4
EF – E1F1	6,0	6,2
CD – C1D1	3,5	4,6
AB – A1B1	3,15	4

Следует отметить, что варианты хвостовика с фасками более предпочтительны, поскольку максимум напряжений смещен в глубь хвостовика.

Заключение

Даже при высокой точности изготовления, когда происходит контакт по трем опорным площадкам, наблюдается значительная неравномерность распределения напряжений по толщине хвостового соединения – максимумы напряжений приходятся на края опорных площадок профилей стандартной конструкции.

Для уменьшения вероятности повреждений, обусловленных высоким уровнем концентрации напряжений, целесообразно уменьшить неравномерность их распределения за счет выбора рациональных форм опорных площадок, в частности, выполненных с фасками.

Литература

1. *Кострикін В.О.* Конструкція і розрахунки на міцність елементів парових турбін / В.О. Кострикін, В.П. Сухінін, О.Л. Шубенко. – Харків, 2006. – 136 с.
2. Исследование изломов. Методические указания и атлас повреждений проточной части турбин / В.Ф. Резинских, Э.С. Гинзбург, А.М. Кислина и др. – М.: ВТИ, 1993.
3. *Подгорный А.Н.* Напряжения и деформации в деталях паровых турбин / А.Н. Подгорный, В.П. Сухинин, В.Л. Ингульцов, Г.М. Меллерович. – К.: Наук. думка, 1978.

© Сухинин В.П., Фурсова Т.Н., 2008