

ДЕФОРМАЦИИ КРУЧЕНИЯ ДЛИННЫХ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН

Встановлено вплив деформації пружної розкрутки на напружений стан природно закручених лопаток при відхиленнях геометрії її профілів від проектної, а також характеру природної закрутки на величину пружної розкрутки у полі відцентрових сил. Дано рекомендації щодо зниження додаткових дотичних напружень, що викликані порушенням плавності кутів природної закрутки, а також по компенсації відхилень кутів

Ключові слова: лопатка, деформація, напруга, стержень, кут, похідна, міцність, закрученість, градієнт, бандаж

Установлено влияние деформации упругой раскрутки на напряженное состояние естественно закрученных лопаток при отклонениях геометрии ее профилей от проектной, а также характера естественной закрутки на величину упругой раскрутки в поле центробежных сил. Даны рекомендации по снижению дополнительных касательных напряжений, вызываемых нарушением плавности углов естественной закрутки, а также по компенсации отклонений углов

Ключевые слова: лопатка, деформация, напряжение, стержень, угол, производная, прочность, закрутка, градиент, бандаж

А. Л. Шубенко

Профессор, доктор технических наук
Член-корреспондент, заведующий отделом
оптимизации процессов и конструкций
турбомашин*

В. П. Сухинин

Профессор, доктор технических наук
Кафедра теплоэнергетики и энергосбережения
Украинская инженерно-педагогическая академия
ул. Университетская, 16, г. Харьков,
Украина, 61003

А. Ю. Бояршинов

Инженер*

*Институт проблем машиностроения
им. А.Н. Подгорного
ул. Дмитрия Пожарского, 2/10, г. Харьков,
Украина, 61046

1. Введение

Максимально достижимая единичная мощность турбоагрегата в значительной мере определяется площадью выхлопа последней ступени, которая является одним из наиболее сложных и ответственных элементов турбины, во многом определяющим уровень ее экономичности и общую конструктивную схему. Средний диаметр и длина рабочей лопатки, определяющие величину торцевой площади последней ступени, являются функцией ряда факторов, к числу которых относятся: большие тепловые перепады, трансзвуковые скорости течения пара и его существенная влажность, высокие окружные скорости рабочих лопаток при их значительных длинах и низких собственных частотах колебаний.

2. Современное состояние вопроса

Рабочие лопатки последней ступени паровой турбины относятся к конструкциям, которые постоянно совершенствуются на основе газодинамических и прочностных исследований. Выбор их рациональных форм и размеров, обеспечивающих высокие экономические показатели и эксплуатационную надежность, остается одной из важных проблем современного паротурбостроения. Эта задача относительно просто решается при постоянном сечении лопатки по высоте, но при разработке лопаток переменного профиля при-

ходится одновременно решать вопросы обеспечения прочности с учетом парового изгиба, растяжения профильной части центробежными силами, изгиба от внецентренного растяжения и напряжений, связанных с деформацией кручения в поле центробежных сил. В этом случае сложность процесса конструирования возрастает также из-за необходимости обеспечения высокого газодинамического качества ступени.

Проведенные ранее [1 – 8] теоретические и экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов лопаток позволили разработать комплекс методов и формализовать процесс их решения на ЭВМ, существенно упрощая процесс конструирования профильной части и сокращая необходимое для этого время.

Вопросы разработки газодинамически совершенных профилей поперечных сечений и конструирования профильной части лопатки рассматривались в [1 – 4]. Что касается выбора конструкции элементов лопатки в целом, то здесь также имеется ряд общих рекомендаций направленных на повышение конструкционной прочности [5 – 7]. В [4] рассмотрены физико-математические и инженерные основы оптимального проектирования ступеней, что значительно расширяет возможности реализации предложенных ранее методов.

В последние десятилетия в связи с усложнением конструктивных форм и увеличением габаритов лопаток последних ступеней проведены теоретические и экспериментальные исследования, которые позволили

рассматривать конструкции лопаток в качестве естественно закрученных стержней [5, 8]. Увеличение их поперечных размеров обусловило необходимость изучения объемного напряженного состояния конструкции. Некоторые результаты исследования объемной концентрации напряжений представлены в [5 – 7]. Результаты этих работ приводят к выводу, что конструирование естественно закрученной лопатки должно осуществляться с учетом деформаций, которые она получает в работе [9, 10]. Наиболее существенной из них оказывается деформация кручения, определяющая как уровень касательных напряжений, так и изменение геометрической формы лопатки.

Уровень касательных напряжений является, при заданном числе оборотов ротора, функцией не только геометрических параметров лопатки, но и типа выбранных бандажных связей и способа их скрепления с лопаткой. При проектировании естественно закрученных лопаток с деформацией раскрутки не стесненной бандажными связями (т. е. без связей или со связями, не препятствующими раскрутке), можно удовлетвориться, в первом приближении, контролем уровня касательных напряжений.

3. Анализ и результаты исследования

Однако проведенный расчетный анализ по методике, разработанной на основе технической теории естественно закрученных стержней Б. Ф. Шорра [8] показывает, что умеренный уровень касательных напряжений может быть получен лишь при плавном изменении геометрических параметров сечений лопатки. Главную роль здесь играет характер изменения первой производной угла естественной начальной закрутки, которая численно может быть выражена формулой [5, 8]:

$$\tau_i = \frac{\alpha_{0i} - \alpha_{0i-1}}{\Delta z_i},$$

где α_0 – угол между проекцией оси минимального момента инерции текущего сечения и абсциссой системы координат в корневом сечении;

i – номер рассматриваемого сечения, считая от верхнего сечения;

$\Delta z_i = z_i - z_{i-1}$ – расстояние между соседними расчетными сечениями в системе координат корневого сечения XYZ.

На рис. 1 представлен график изменения максимальных суммарных напряжений в реальной лопатке последней ступени, с учетом касательных напряжений от деформации кручения.

В первоначальном виде график углов $\alpha_0(z)$ имел некоторый излом (кривая 1 на рис. 1), обусловивший скачок напряжений, показанный на рисунке 1 кривой 2. Корректировка наклона оси минимального момента инерции всего на один градус привела к снижению уровня суммарных напряжений за счет касательных, на величину порядка 40 МПа. Изменение исправленных углов $\alpha_0(z)$ и соответствующих суммарных напряжений представлено на рис. 1 кривыми 3 и 4.

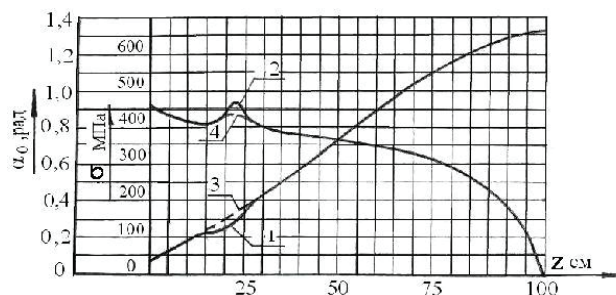


Рис. 1 Зависимость напряжений в лопатке от угла наклона оси минимального момента инерции $\alpha_0(z)$: 1 – кривая $\alpha_0(z)$ до корректировки; 2 – кривая напряжений в лопатке в исходном состоянии; 3 – кривая скорректированных углов $\alpha_0(z)$; 4 – напряжения, соответствующие скорректированной кривой (3) углов $\alpha_0(z)$

Если при изготовлении лопатки допущено отклонение профиля от расчетного по наружному контуру выходной кромки до 0,7 мм, а на входной кромке по внутреннему контуру на такую же величину – это приведет к фактическому отклонению от расчетного положения угла установки профиля $\beta(z)$ и, следовательно, угла $\alpha_0(z)$ примерно на $0^\circ 50'$ (рис. 2).

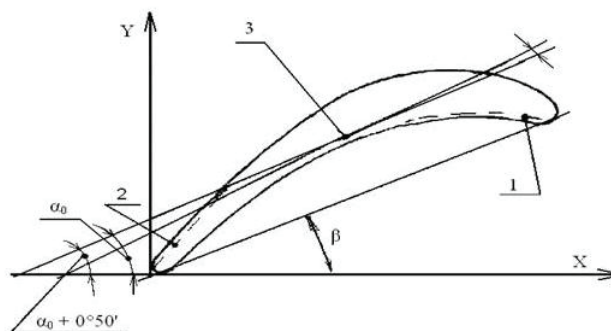


Рис. 2. Геометрия профиля с отклонениями: β – угол установки профиля; α_0 – угол наклона оси минимального момента инерции профиля

Такие отклонения могут быть результатом неточной шлифовки при обработке, местных деформаций от внутренних остаточных напряжений или неудачного профилирования. В случае поворота соседнего расчетного сечения на такой же угол в другую сторону, имеет место взаимный дополнительный разворот двух расчетных сечений примерно на 2° (рис. 3, кривая 2), вызывающий повышение напряжений на величину до 120 МПа (рис. 4, кривая 2), по сравнению с номинальным положением сечений.

Дальнейшее повышение градиента углов естественной закрутки при взаимном дополнительном развороте двух соседних сечений показано кривой 3 на рис. 4.

Это соответствует утрированному изменению углов $\alpha_0(z)$ и, соответственно, $\beta(z)$ которое на практике маловероятно, но даёт наглядное представление о динамике роста напряжений при увеличении градиента углов по высоте лопатки.

На рис. 4 (кривая 3) показано изменение напряжений для этого случая.

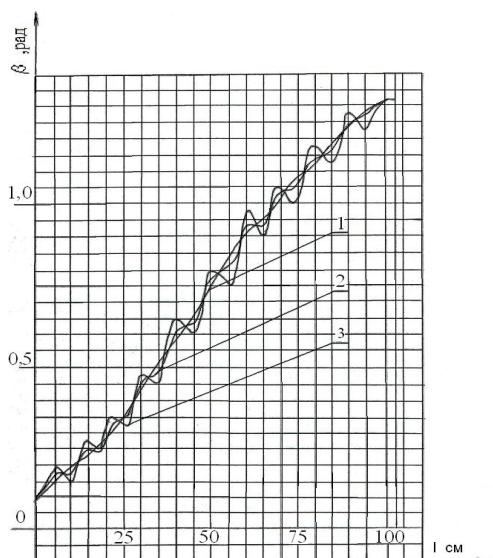


Рис. 3. Варианты изломов кривых установки профилей: 1 — номинальные значения $\beta(z)$; 2 — дополнительный разворот соседних сечений друг относительно друга на 2° ; 3 — дополнительный разворот на 5°

Как и следовало ожидать, изменение углов упругой раскрутки по высоте лопатки для рассмотренных выше вариантов естественной закрутки имеют различный характер.

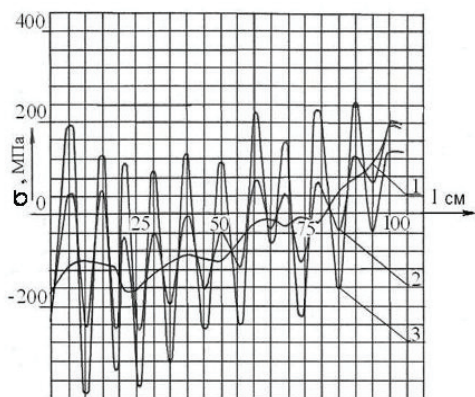


Рис. 4. Кривые изменения касательных напряжений в лопатке в зависимости от изломов кривых установки профилей $\beta(z)$: 1 — расчетное положение сечений; 2 — дополнительный разворот соседних сечений на 2° ; 3 — дополнительный разворот соседних сечений на 5°

Проведенные расчеты показали, что ступенчатое изменение углов установки профилей в пределах расчетных участков приводит к уменьшению общей упругой раскрутки лопатки.

На рис. 5 и 6 приведены графики углов раскрутки для двух вариантов конструкции лопатки со свободной и заневоленной вершиной и для всех рассмотренных выше случаев углов установки профилей. Легко видеть, что для варианта с дополнительным разворотом сечений (рис. 3, кривая 2) углы упругой раскрутки имеют тенденцию к уменьшению (кривые 2 на рис. 5 и 6). Устойчивость этой тенденции хорошо иллюстрируется кривыми 3 на рис. 5 и 6.

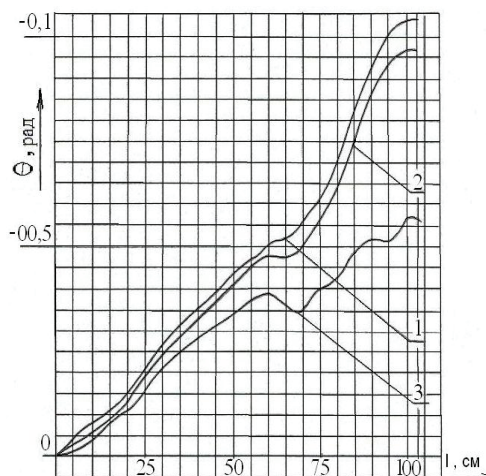


Рис. 5. Изменение углов раскрутки сечений по высоте лопатки со свободной вершиной. Кривые соответствуют изменению углов установки профилей $\beta(z)$ на рис. 3

Этому явлению может быть дано следующее объяснение. Дополнительный разворот двух соседних расчетных сечений в разные стороны от среднего положения обуславливает большую номинальную длину наиболее удаленных волокон от оси лопатки (где их длина остаётся неизменной в ненапряженном состоянии).

При несущественном изменении удельной естественной закрутки, сохранении общей геометрии лопатки, в том числе общего угла закрутки вышесказанное приводит к повышению жёсткости лопатки при кручении, что и обуславливает уменьшение углов упругой раскрутки.

Рассматривая вопрос об особенностях геометрической формы лопатки, следует иметь в виду, кроме рассмотренных выше особенностей, что деформация упругой раскрутки, достигающая в верхних сечениях нескольких градусов, обуславливает ряд специфических требований к процессу конструирования лопатки.

Здесь подразумеваются, прежде всего, различия в деформированном состоянии лопаток, соединенных бандажными связями различных конструкций.

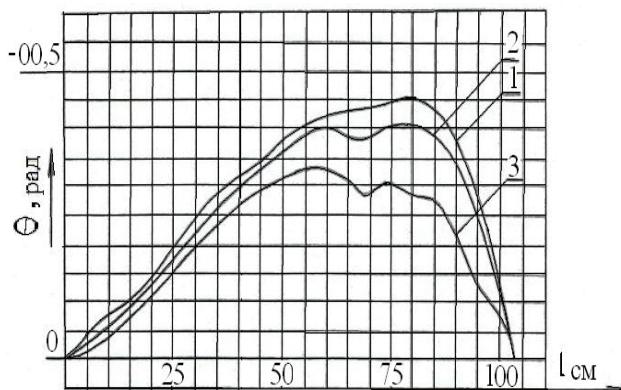


Рис. 6. Изменение углов раскрутки сечений по высоте лопатки с заневоленной вершиной.

4. Выводы

Стержневые бандажи демпферного типа практически не препятствуют упругой раскрутке лопаток и не накладывают на неё каких-либо ограничений, лишь нагружая дополнительную центробежной нагрузкой. При этом сечения лопатки отклоняются от своего расчетного положения, отрицательный угол атаки в периферийной части лопатки может достигать величины порядка 10° (наибольшая из полученных расчетным и экспериментальным путём величин угла упругой раскрутки в рабочей лопатке длиной более 1000 мм). Это вызывает существенное увеличение профильных потерь и может привести к возникновению отрывных явлений, особенно на сниженных нагрузках. Для устранения этого явления следует увеличить углы $\beta(z)$ профилей лопатки в расчетных сечениях на соответствующие величины углов упругой раскрутки,

возникающие под воздействием центробежных сил при вращении. Увеличенная естественная закрутка приведёт к возрастанию упругой раскрутки и её следует учесть в корректировке углов установки профилей $\beta(z)$. Двух-трех приближений достаточно для получения удовлетворительного соответствия величин углов в равенстве:

$$\beta_d(z) \approx \beta(z) - \theta(z) \approx \beta_p(z),$$

где $\beta_d(z)$, $\beta(z)$, $\beta_p(z)$ – значения углов между хордой профиля и осью x , в деформированном и исходном недеформированном состоянии и расчетный угол, $\theta(z)$ – угол упругой раскрутки.

Кроме того, в соответствии с приведенными выше результатами исследований, необходимо соблюдать плавность изменения по высоте лопатки углов установки профилей $\beta(z)$.

Литература

1. Аронов, Б.М. Профилирование лопаток авиационных газовых турбин [Текст] / Б.М. Аронов, М.И. Жуковский, А.В. Журавлев – М.: «Машиностроение», 1975. – 192 с.
2. Копелев, С.З. Расчет турбин авиационных двигателей [Текст] / С.З. Копелев, Н.Д. Тихонов – М.: «Машиностроение», 1983 – С. 268.
3. Моисеев, А.А. Длинные лопатки судовых машин [Текст] / А.А. Моисеев, А.М. Топунов, Г.Я. Шницер – Л.: Судостроение, 1969 – С. 467.
4. Шубенко-Шубин, Л.А. Оптимальное проектирование последней ступени мощных паровых турбин [Текст] / Л.А. Шубенко-Шубин, А.А. Тарелин, Ю.П. Антипцев – Киев: Наукова думка, 1986 – 228 с.
5. Подгорный, А.Н. Напряжения и деформации в деталях паровых турбин [Текст] / А.Н. Подгорный, В.П. Сухинин, В.Л. Ингульцев и др. – Киев: Наукова думка, 1973 – 276 с.
6. Сухинин, В.П. Исследование напряженного состояния зоны бандажных отверстий лопаток паровых турбин [Текст] / В.П. Сухинин, И.Б. Волькович, Э.В. Лукина // Динамика и прочность машин, 1975, вып. 21 – С. 92 – 96.
7. Сухинин, В.П. Экспериментальное исследование объёмного напряженного состояния элементов лопаток [Текст] / В.П. Сухинин, И.Б. Волькович // Динамика и прочность машин, 1977, вып. 25 – С. 81– 86.
8. Шорр, Б.Ф. Основы теории закрученных лопаток с непрямой осью [Текст] / Б.Ф. Шорр // Прочность и динамика авиационных двигателей, 1966, вып.3 – С.188 – 213.
9. Сухинин, В.П. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния естественно закрученных лопаток турбин [Текст] / Сухинин В.П. // Динамика и прочность машин, 1975, вып. 22. – С. 43 – 47.
10. Шорр, Б.Ф. К экспериментальной проверке теорий растяжения закрученных стержней [Текст] / Б.Ф. Шорр // Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1959, № 4. – С.176 – 178.