

УДК 621.044.96

**УСЛОВИЯ РАБОТЫ И КОНСТРУКЦИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК
ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ**

Гапеев К.Н., Пантелей Д.Е.

Научный руководитель – старший преподаватель Пантелей Н.В.

Основой турбины, определяющей ее надежность и экономичность, является ее проточная часть, наиболее ответственными элементами которой являются рабочие лопатки, профили которых образуют рабочую решетку. Они работают в весьма тяжёлых условиях, подвергаясь значительным статическим, малоцикловым и динамическим нагрузкам. В связи с этим в процессе эксплуатации до сих пор ещё имеют место повреждения рабочих лопаток, в большинстве случаев носящие усталостный характер.

Условия работы рабочих лопаток

Естественно, что условия работы и конструкция рабочих лопаток сильно разнятся в турбинах различных мощностей. Так же на это влияют начальные и конечные параметры пара в совокупности с расположением лопаток в проточной части.

Лопатки последних ступеней турбины испытывают колоссальные нагрузки, связанные с центробежной силой, которая может достигать 200-300 тонн в быстроходных турбинах и 500-600 тонн – в тихоходных, что делает их повреждения очень опасными. Из-за этого к лопаткам последних ступеней предъявляются очень высокие требования надёжности работы.

Начальные параметры в паровых турбинах в большинстве случаев не превосходят 540-570 градусов и 25 МПа. При этих начальных параметрах в лопатках первых ступеней цилиндра высокого давления (и цилиндра среднего давления в турбинах с промперегревом) имеет место явление ползучести, которое учитывается не только при определении уровня допустимых напряжений, но и при выборе величин радиальных зазоров между лопатками и статором турбины.

Малоцикловые нагрузки в рабочих лопатках возникают при переходных режимах работы турбины и связанным с неравномерным прогревом валопровода. При соблюдении инструкции по эксплуатации малоцикловые разрушения не должны иметь места, а их величина может быть уменьшена за счёт увеличения длительности пуска. С точки зрения повреждений от малоциклового усталости, лопатки паровых турбин находятся в более лёгких условиях, чем лопатки газовых, где возникновение значительных по величине термических напряжений неизбежно в процессе зажигания и погасания камер сгорания.

Наиболее частой причиной повреждения лопаток паровых турбин являются вибрационные нагрузки. Вибрация бывает: низкочастотная, оборотной частоты и высокочастотная.

Источником высокочастотной вибрации является генератор турбины. Возникают эти колебания из-за особенностей конструкции ротора генератора.

Вибрация оборотной частоты возникает из-за несоответствия центров тяжести отдельных сечений валопровода с осью вращения. Неуравновешенность ротора является одной из основных причин вибрации. Она может возникать на стадии изготовления (недостаточная балансировка ротора), монтажа и сборки, а также в процессе эксплуатации турбины (отрыв лопаток и бандажей). Для ликвидации этой вибрации необходима балансировка ротора турбины.

Низкочастотная вибрация связана с потерей устойчивости вращения вала на масляной пленке подшипника (она связана с автоколебаниями). Заметное влияние на возникновение масляной вибрации оказывает температура и давление масла, которая определяет его вязкость. Чем выше температура, тем лучше с точки зрения устойчивости. Однако, это приводит к снижению несущей способности масляной пленки тем самым вызывая износ вкладыша подшипника, а также преждевременному старению масла. С повышением давления уменьшается шанс возникновения низкочастотной вибрации, но также приводит к износу заливки вследствие увеличения толщины масляной пленки.

Причинами усталостных повреждений лопаток паровых турбин могут явиться резонансные, срывные или автоколебания. Резонансные колебания кратны (в целое число раз больше) числу рабочих оборотов, а причиной их возникновения могут явиться как конструктивные (парциальный подвод, пара, отборы и т.д.), так и технологические факторы (различия в шагах, горлах, толщине кромок сопловых лопаток и т.д.), вызывающие неравномерность параметров потока по окружности колеса. Вращающиеся в неравномерном потоке рабочие лопатки подвержены возмущающим нагрузкам, частоты которых равны или кратны частоте вращения ротора. В случае совпадения собственных частот рабочих лопаток с частотами возмущающих сил возникает резонанс, который негативно влияет на усталостную прочность лопаток.

Помимо этого, рабочие лопатки испытывают напряжение парового от сил парового потока, преобразующего потенциальную энергию пара в механическую энергию вращения ротора. Увеличив размеры поперечных сечений лопаток можно уменьшить напряжения парового изгиба, что, правда, вызывает как увеличение центробежных сил лопаток, так и осевых размеров ротора.

Также лопатки в зонах низкого давления подвергаются эрозии и коррозии, что не только приводит к местному ослаблению поперечных сечений лопаток, но и существенно снижает их конструктивную усталостную прочность и увеличивает опасность усталостных повреждений.

Конструкции рабочих лопаток паровых турбин

В зависимости от положения в проточной части и параметров работы турбины изменяется конструкция лопатки, но при этом основные элементы остаются неизменными. Таким образом основными конструктивными элементами лопатки является профильная часть, благодаря которой при прохождении потока пара через рабочие лопатки образуется разность давлений, в результате которой потенциальная энергия потока преобразуется в механическую энергию вращения ротора, и хвостовая часть, служащая для крепления лопатки к диску или ротору. Также рабочие лопатки паровой турбины

могут еще соединяться различными конструкциями, повышающими надежность и экономичность работы.

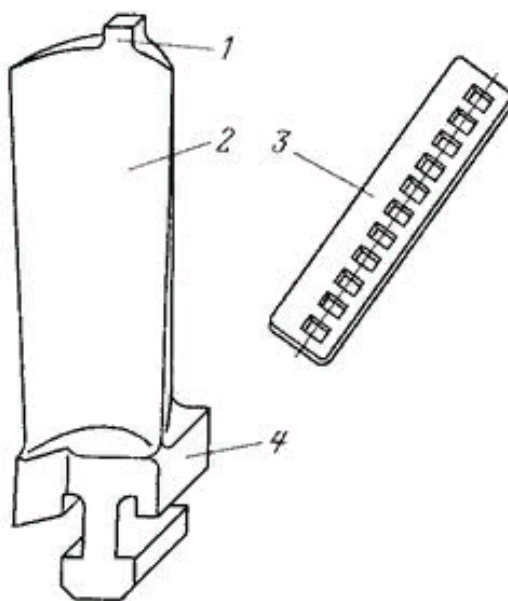


Рисунок 1 – Конструкция простейшей лопатки

Простейшая лопатка паровой турбины состоит из рабочей части (2) и хвостовика (4). Рабочая часть имеет профили, которые с помощью хвостовиков устанавливаются на ротор и образуют рабочие каналы. Для крепления лопаточного бандажа (3) на торце лопатки предусмотрен шип, который соответствует отверстиям в бандаже. Шипы расклепывают или сваривают в результате чего лопатки на диске оказываются набранными в пакеты.

Типичные конструкции лопаток паровых турбин показаны на рисунке 1: на рисунке 1а) изображена лопатка постоянного сечения, на рисунке 1б) – лопатка среднего давления, на рисунке 1в) – бандажированная лопатка последней ступени мощной турбины.

На рисунке 1а) в периферийном сечении лопатки показан шип для крепления клёпаного бандажа, на рисунке 1б) – отверстие для установки проволочной связи, на рисунке 1в) – бандажная полка, изготовленная заодно с профильной частью лопатки.

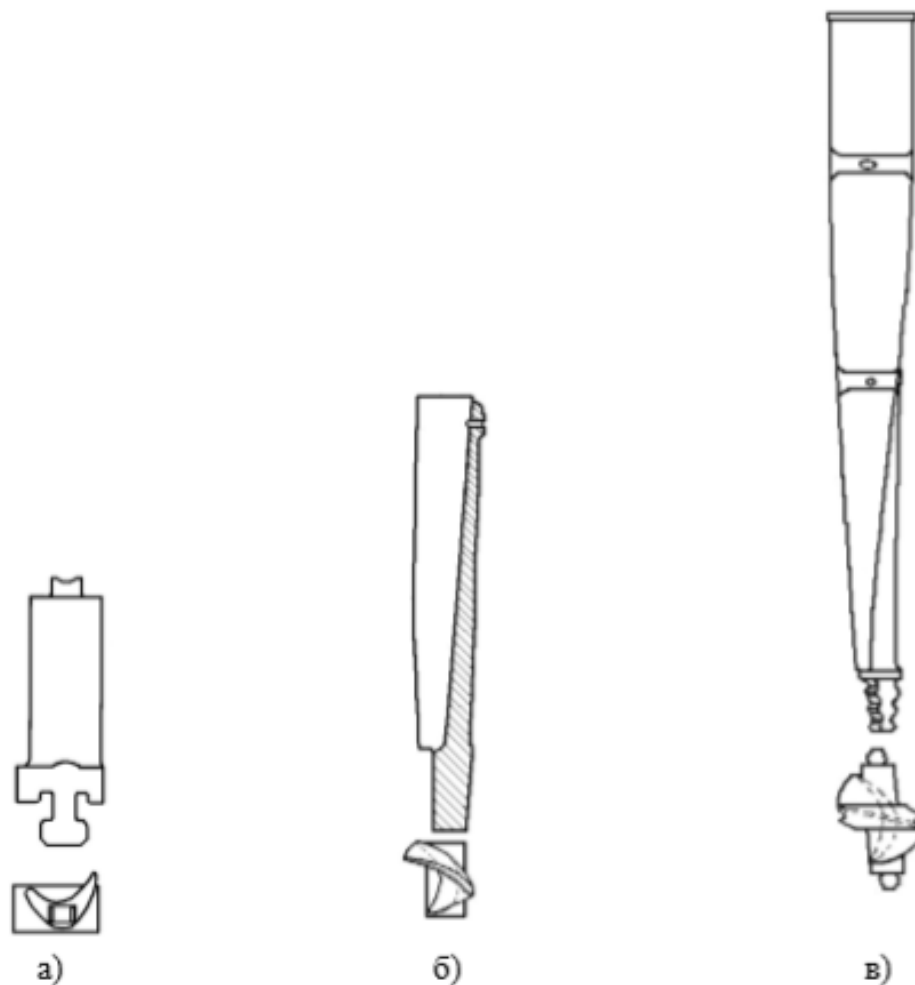


Рисунок 2 – Типичные конструкции лопаток паровых турбин

Выбор типа хвостовика определяется нагрузками, действующими на лопатку, которые воспринимаются хвостовиком и передаются им на диск. Типы хвостовиков показаны на рисунках 3 и 4.

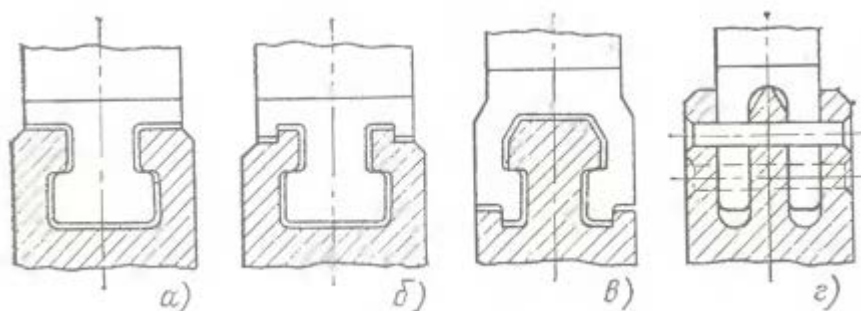


Рисунок 3 – Хвостовики рабочих лопаток: а – Т-образный без заплечиков; б – Т-образный с заплечиками; в – грибовидный одноопорный; г – вильчатый

Простейшими конструкциями хвостовика являются Т-образный и одноопорный грибовидный хвостовики. Для уменьшения изгибающих напряжений в хвостовике и щеках диска на лопатках или диске выполняются заплечики. Для установки лопаток на диск предусмотрены специальные конструкции с замковыми колодцами соответствующие типу хвостовика лопаток. Преимуществом вильчатого хвостовика является то, что замена лопаток

с хвостовиком этого типа осуществляется без полного разбора лопаточного диска.

С возникновением больших нагрузок на лопатки возникает необходимость в более сложных конструкциях хвостовиков. Таким образом хвостовики выполняют многоопорными или с большим числом вилок (рисунок 4).

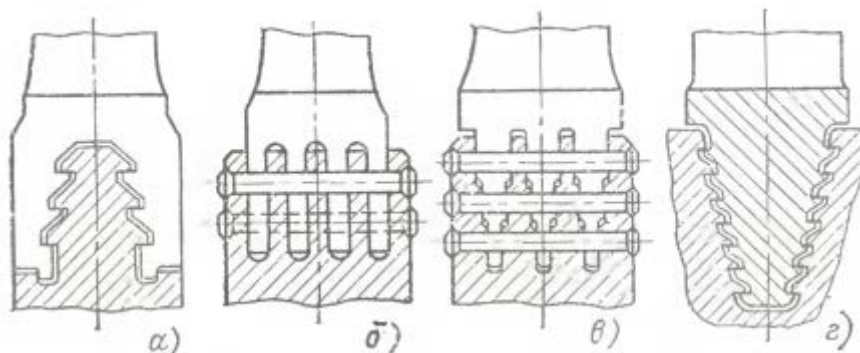


Рисунок 4 – Хвостовики повышенной несущей способности: а – грибовидный трехопорный; б – вильчатый; в – вильчатый равнопрочный; г – елочный с торцевой заводкой.

Наиболее надежными считаются хвостовики елочного типа, которые применяются для самых нагруженных ступеней.

Рабочие лопатки паровых турбин соединяются в пакеты бандажами или проволочными связями. Это делается для повышения вибрационной надежности и уменьшения утечек пара через периферийную часть. Для лопаток последних ступеней в качестве бандаж используется проволока, проходящая через специальные отверстия в профильной части, которые впоследствии запаиваются, либо устанавливаются свободно. В последнем случае проволока под действием собственной центробежной силы прижимается к лопаткам и является гасителем колебаний лопаток (демпферная связь).

Таким образом рабочие лопатки паровой турбины являются важнейшим элементом, благодаря которому происходит преобразование энергии парового потока в механическую энергию вращения ротора, которая, в свою очередь, преобразуется в электрическую энергию в генераторе. Поэтому от прочности и конструктивных особенностей лопаток зависит экономичность и безаварийность работа турбины.

Литература

1. Боришанский К.Н. Колебания рабочих лопаток паровых турбин и меры борьбы с ними. Санкт-Петербург, 2011.
2. Жирицкий Г.С. Конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин. Машиностроение. Москва, 1968.