

УДК 621.165

**Лопатки турбин. Облопачивание**

Сидорук Ю.С., Трахимович И.А.

Научный руководитель – ст. преподаватель ПАНТЕЛЕЙ Н.В.

Лопатка – деталь лопаточных машин, предназначенная для изменения в них параметров газа или жидкости. В паровых турбинах происходит преобразование потенциальной энергии пара в механическую энергию вращения ротора. Лопатки турбин являются сложными по конструкции оригинальными деталями. Число конструктивных разновидностей лопаток весьма велико.

Турбинные лопатки подразделяют на направляющие, которые монтируются в статоре турбины, и рабочие, закрепляемые на её роторе. Последние являются наиболее сложными по конструкции, дорогостоящими и ответственными элементами турбины, которые определяют надежность ее работы. Во время работы рабочие подвергаются воздействию различных факторов: высоких температур, коррозии, эрозии, а также статических, динамических и температурных напряжений. Выбор конструктивной формы, размеров и материала зависит от условий, в которых им приходится работать и в значительной степени определяет надежность и экономичность эксплуатации турбин.

*Конструкция лопаток*

Конструкцию рабочих лопаток можно условно представить состоящей из трёх основных частей: хвоста, рабочей части, головки. Каждая из этих частей имеет большое количество конструктивных разновидностей. На рисунке 1 представлена одна из разновидностей конструкций турбинных лопаток, приведены некоторые элементы конструкций данной и других лопаток, обозначения поверхностей конструктивных элементов.

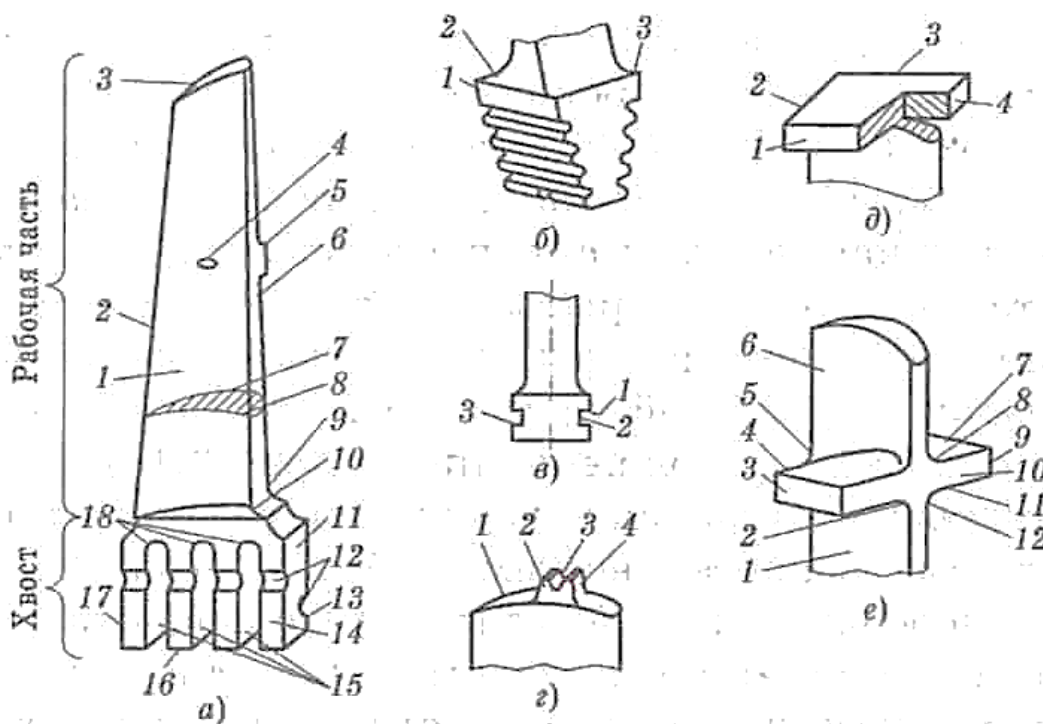


Рисунок 1 – пример конструкции рабочей лопатки и элементов конструкций лопаток: а — лопатка с вильчатым хвостом: 2 — внутренняя поверхность; 2 — выходная кромка; 3 — наружная поверхность; 4 — отверстие под скрепляющую проволоку; 5 — утолщение; 6 — входная кромка; 7 — наружный профиль сечения; 8 — внутренний профиль сечения; 9 — наружная галтель; 10 — внутренняя галтель; 11 — входная плоскость хвоста; 12 — полуотверстия под заклёпки; 13 — наружная радиальная плоскость хвоста; 14 — внутренняя

радиальная плоскость хвоста; 15 — пазы хвоста; 16 — торец хвоста; 17 — выходная плоскость хвоста; 18 — вершина пазов хвоста; б — ёлочного профиля, полка, переход полки в рабочую часть: 1 — внутренняя плоскость полки; 2 — переходная галтель; 3 — наружная плоскость полки; в — хвост пазового двустороннего профиля, поверхности профиля: 2 — верхние; 2 — боковые; 3 — нижние; г — головка с шипом: 1 — торец головки; 2 — внутренняя поверхность шипа; 3 — наружная поверхность шипа; 4 — входная поверхность шипа; д — бандажная полка: 2 — внутренняя плоскость бандажной полки; 2 — входная плоскость бандажной полки; 3 — наружная плоскость бандажной полки; 4 — входная плоскость бандажной полки; е — перемычка двухъярусной лопатки: 2 — нижний ярус; 2 — внутренняя нижняя галтель перемычки; 3 — внутренняя плоскость перемычки; 4 — выходная плоскость перемычки; 5 — внутренняя верхняя галтель перемычки; 6 — верхний ярус; 7 — наружная плоскость яруса; 8 — наружная верхняя галтель перемычки; 9 — наружная плоскость перемычки; 10 — входная плоскость перемычки; 22 — наружная плоскость нижнего яруса; 12 — наружная галтель нижней перемычки.

Рабочие части направляющих и рабочих лопаток различают по ряду признаков: форме сечений и их взаимному расположению вдоль оси лопатки; нависанию (или его отсутствию) элементов над профилями рабочей части; способу построения поверхностей.

По форме сечений и их взаимному расположению вдоль оси рабочие части подразделяют на части с постоянным профилем и переменным.

Над концами рабочей части лопатки может нависать хвост, полка, оба этих элемента одновременно или нависание может отсутствовать. По данному признаку рабочие части лопаток подразделяют на открытые, полуоткрытые и закрытые.

Если конструктивный элемент нависает с одного конца лопатки, например со стороны хвоста, а со стороны головки или в рабочей профильной части лопатки нависающие элементы отсутствуют, то подобные конструкции лопаток классифицируют как лопатки с полуоткрытым профилем рабочей части. Лопатки с закрытым профилем имеют нависающие элементы с обоих концов рабочей части. У такой лопатки над рабочей частью с одной стороны нависает хвост, а с другой — утолщение.

По способу построения поверхностей различают лопатки с аналитическими поверхностями рабочей части и со скульптурными поверхностями. Аналитические поверхности представляют собой сочетание линейных, цилиндрических и винтовых поверхностей. Эти поверхности достаточно просто формализуются математически. Определение скульптурной поверхности отражает технологический приём её формирования. Для этого используют шаблоны. Сечения рабочей части лопатки припасовывают к шаблону, а между сечениями поверхность доводят на ощупь.

Турбинные лопатки в сборочной единице закрепляют различными способами. В зависимости от способа в конструкцию лопатки вводят соответствующие конструктивные элементы. По этому признаку лопатки подразделяют на имеющие хвостовую часть и не имеющие последней. К лопаткам с хвостовой частью относятся направляющие лопатки (рисунок 2). Концевые части таких лопаток могут быть ограничены торцовыми поверхностями (рисунок 2, а), поверхностями цилиндрической формы или сложной формы (рисунок 2, б).

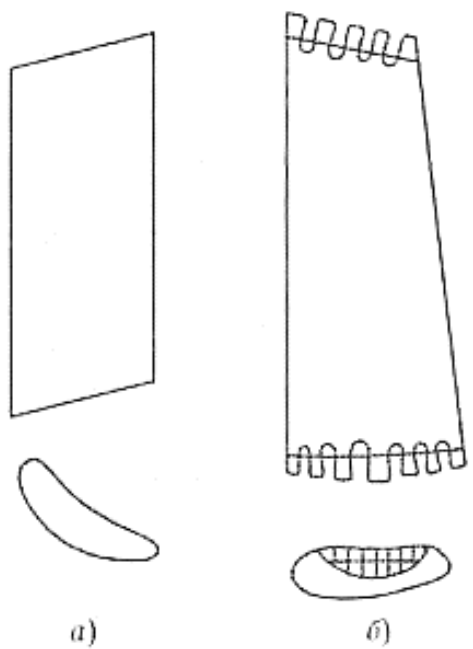


Рисунок 2 – примеры конструкций направляющих лопаток турбин

Наибольшее распространение имеют рабочие лопатки, хвостовая часть которых ограничена профильными поверхностями следующих форм: Т-образной без заплечиков и с заплечиками, ёлочной, вильчатой, пазовой двусторонней. Лопатка с вильчатым хвостом показана на рисунке 1, а, с ёлочным — на рисунке 1, б, с пазовым двусторонним — на рисунке 1, в, с Т-образным без заплечиков — на рисунке 3, а, б, Т-образным с заплечиками — на рисунке 3, в, с грибовидным — на рисунке 3, г, с ёлочным — на рисунке 3, е.

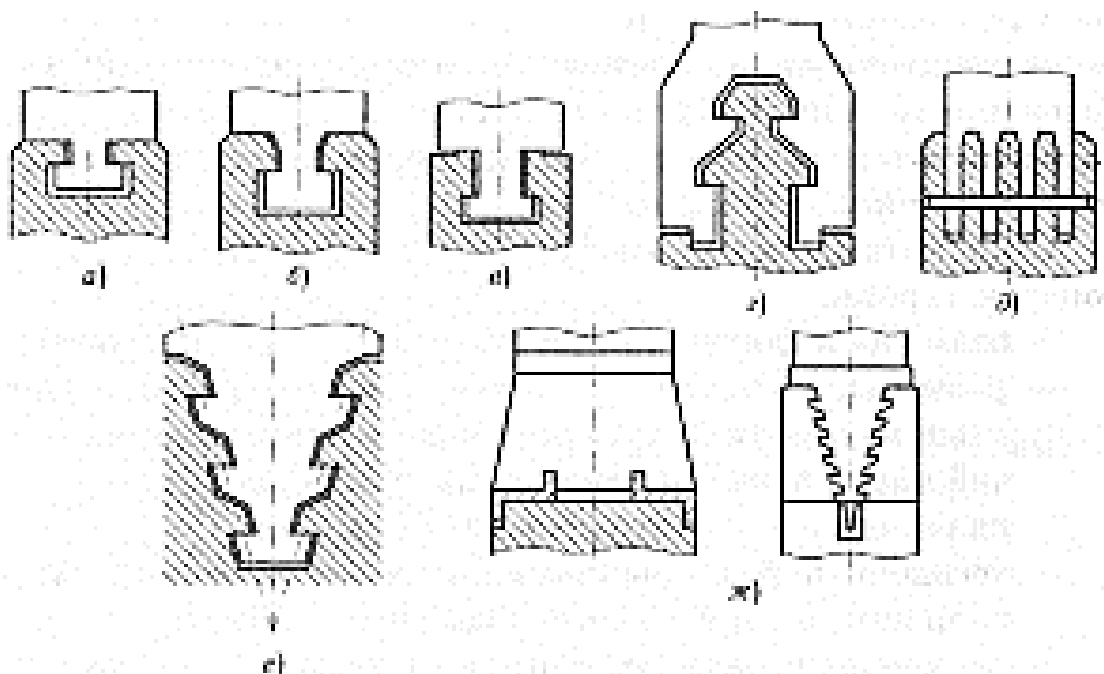


Рисунок 3 – конструкции соединения хвостов лопаток с дисками рабочих колёс

Во многих конструкциях лопаток со стороны головной части расположен элемент их связи в пакет посредством прикрепляемого бандажа. Данный элемент может быть выполнен в форме шипа (рисунок, 1, г) или полки, совместно с полками ряда лопаток, образующих собственный бандаж. По форме, расположению и числу шипы подразделяют на

прямоугольные в один ряд на прямом (в сечении) срезе (рисунок 1, г), прямоугольные в один ряд на косом срезе, прямоугольные двойные на прямом срезе, прямоугольные двойные на косом срезе, фасонные в один ряд на прямом или косом срезе, фасонные двойные на прямом или косом срезе. Имеются также лопатки, которые в головной части не скрепляются бандажом. Одна из таких конструкций лопаток показана на рисунке 1,а.

В этом случае лопатки выполняют с отверстиями 4 (рис. 1, а), которые служат для скрепления лопаток в пакет проволокой.

Надёжность, долговечность, ремонтпригодность и другие качественные показатели турбин во многом определяются их лопаточным аппаратом. Поэтому к конструкциям лопаток предъявляют чёткие технические требования в частности к материалам и их состоянию, точности размеров и геометрической формы лопаток.

Стандартами регламентированы следующие параметры лопаток турбин:

- размеры и формы профилей сечений рабочих частей;
- размеры, которые определяют расположение в радиальном, осевом и тангенциальных направлениях рабочей части лопатки относительно поверхностей хвоста, являющихся конструкторскими базами;
- посадочные размеры поверхностей сопряжений хвоста с диском, а также хвостов соседних лопаток;
- посадочные размеры шипов, а также отверстий под скрепляющую проволоку;
- размеры, определяющие отверстия от базовых поверхностей;

#### *Применяемые материалы*

Материалы, применяемые при изготовлении лопаток, выбираются исходя из условий эксплуатации лопатки и действующих на нее усилий. Основными материалами являются нержавеющие стали мартенситного класса марок 12Х13, 20Х13, 15Х11МФ (12Х13Ш, 20Х13Ш, 15Х11МФШ – стали полученные методом шлакового переплава).

Для лопаточного аппарата регулирующих ступеней ЦВД и первых ступеней, расположенных после промперегрева пара, применяют стали марок 20Х12ВНМФШ или 18Х11МНФБШ, как наиболее жаростойкие.

Стали марок 12Х13Ш и 20Х13Ш рассчитаны на работу до температуры не выше 400..450 °С, поэтому они применяются для рабочих лопаток части среднего и низкого давления.

Для ступеней давления ЧВД используется сталь марки 15Х11МФШ. Она же применяется для изготовления лопаток наиболее нагруженных ступеней ЧНД. Сталь этой марки может работать до температуры 500..550 °С и обладает высокой прочностью и пластичностью, так как может быть термообработана до категории прочности КП70.

#### *Характерные дефекты и причины их появления*

##### Механические повреждения

Наиболее распространенными и практически не зависящими от места расположения ступени в турбине являются случайные механические повреждения. Эти повреждения могут быть вызваны инородными предметами, случайно попавшими в проточную часть после ремонта, и частями разрушившихся при эксплуатации деталей, расположенных перед данной ступенью.

Характер механических повреждений проявляется либо в виде забоин, которые могут быть расположены на любом участке лопатки, включая кромки, либо в виде деформации всего профиля, кромок или верхнего торца лопатки. Особенно опасны острые забоины, расположенные на кромках. В некоторых случаях (при больших размерах забоины и расположении ее в месте максимальных напряжений в лопатке) концентрация напряжений может привести в дальнейшем к разрушению.

##### Усталостные повреждения

В турбине в процессе эксплуатации из-за наличия неравномерности потока всегда имеются возбуждающие силы, вызывающие колебания рабочих лопаток. При колебаниях в лопатках возникают динамические напряжения, которые способствуют накоплению усталости и при определенных условиях могут привести к усталостному разрушению бандажей, связей, самих рабочих лопаток и дисков.

### Коррозионные повреждения

Коррозионные повреждения лопаток наблюдаются во всех типах турбин. Это связано с тем, что в паровой среде всегда содержатся коррозионно-активные вещества, а от их количества зависит лишь скорость развития повреждений.

Коррозионные повреждения можно подразделить на несколько видов:

- коррозионное растрескивание под напряжением;
- коррозионно-усталостное разрушение;
- питтинговая и язвенная коррозия.

### Эрозионные повреждения

Рабочие лопатки ЧНД (в большей степени последние ступени) подвержены эрозионному износу. Износ входных кромок связан с наличием процессной влаги и часто усугубляется сниженной (по условиям работы котла) температурой свежего пара при сохранении расчетного начального давления. Эрозия выходных кромок связана с подсосом влаги из конденсатора или отборов и развивается, как правило, от корня лопатки. Эрозионные повреждения, особенно в виде сквозных промылов, служат концентраторами напряжений и могут привести к усталостному разрушению рабочих лопаток. При значительной потере металла вследствие эрозии снижаются прочностные характеристики, нарушается вибрационная отстройка лопаток и ухудшаются аэродинамические показатели проточной части.

### *Облопачивание рабочих колес и роторов паровых турбин*

Основной задачей при облопачивании рабочих колес и роторов является обеспечение расчетной жесткости соединения лопаток с диском и аэродинамических характеристик проточной части, что гарантирует безаварийную работу и экономичность турбины.

К облопачиванию предъявляются следующие основные требования: лопатки должны плотно сидеть в пазах или на гребнях дисков и вместе с тем плотно прилегать друг к другу; они должны правильно устанавливаться как в аксиальном, так и в радиальном положении; бандажная лента должна плотно прилегать к головкам лопаток и иметь надежную расклепку головок; скрепляющая проволока должна быть свободно заведена в отверстия лопаток и хорошо припаяна. Величина допустимых отклонений указывается при рассмотрении операций.

Предшествует сборке визуальный контроль соединяемых элементов диска и лопаток, а также контроль бандажных лент, скрепляющей или демпферной проволоки, деталей крепления лопаток и замков. При обнаружении забоин, неполностью снятых заусенцев и других мелких наружных дефектов производится их удаление. Лопатки небольшой длины взвешиваются и по результатам взвешивания комплектуются в пакеты. У лопаток длиной свыше 300 мм определяются момент массы и координаты центра массы. Увеличение размеров и массы лопаток при создании новых более мощных турбин влечет за собой повышение требований к стабильности статических моментов всех лопаток ступени. На основании полученных замеров производится раскладка лопаток в комплекте ступени.

Типовой технологический процесс облопачивания дисков с Т-образным пазом включает следующие операции:

- установка диска на стойки для облопачивания;
- разметка, вырубка и припиливание замковых колодцев, т.е. выемки на ободке, в которые будут заводиться лопатки;
- облопачивание диска рабочими лопатками;
- подгонка и установка замка;
- обандаживание рабочих лопаток (подготовка бандажей; пробивка отверстий под головки лопаток; надевание бандажей на лопатки и расклепка шипов лопаток;)
- протачивание торцов бандажа на токарном или карусельном станке до чертежных размеров и снятие фасок;

- подготовка облопаченного и обандаженного диска под пайку скрепляющей проволоки (запиливание и зачистка бандажей после обтачивания; установка сегментов проволоки под пайку согласно чертежу);
- припайка проволоки к лопаткам серебряным припоем;
- промывка диска горячим паром для снятия флюса;
- статическая балансировка диска.

Процессы сборки лопаток отдельных колес или цельных роторов в основном аналогичны. Но они отличаются оборудованием рабочих мест. Диски с Т-образными и им подобными пазами облапачиваются в вертикальном положении, подвешенными за отверстие на оправках. Сборка же ротора производится на роликовых опорах, помещенных на двух стойках. Ротор опирается шейками на роликовые опоры и в процессе выполнения сборочных и слесарно-пригоночных работ может быть повернут в удобное положение. Облопачивание роторов выполняется бригадой слесарей.

Чтобы лопатки можно было заводить в паз диска, в ободке вырубает выемки по форме и размерам хвоста лопатки (или промежуточного тела), которые называются замковыми колодцами. Обычно на диске делают два замковых колодца, расположенных диаметрально противоположно. Для обеспечения требования беззазорного прилегания друг к другу радиально направленных поверхностей хвостов лопаток производят их пригонку с проверкой на краску наружной поверхности одной лопатки по сопрягаемой поверхности внутреннего профиля соседней. После сборки лопаток замковые колодцы заделывают замками и насадные диски садят с натягом на ротор турбины.

#### Литература

1. Паровые и газовые турбины атомных электростанций: Учебное пособие для вузов/ Б. М. Трояновский, Г. А. Филиппов, А. Е. Булкин — М.: Энергоатомиздат, 1985
2. Паровые турбины и турбоустановки Уральского турбинного завода/ Г.Д. Баринберг, Ю.М. Бродов-Екб, 2010