

## Рабочие и направляющие лопатки

Общие сведения.

Лопатки являются самыми ответственными и вместе с тем напряженными деталями турбин. Стоимость изготовления лопаточного аппарата составляет примерно 35% стоимости турбины. По своему назначению лопатки делятся на *рабочие* (подвижные), закрепленные на роторе, и *направляющие* (неподвижные), закрепленные в корпусе.

Лопатка (рис. 13.14) состоит из трех частей: корня или хвоста 1, служащего для закрепления ее в роторе или корпусе; рабочей части 2, омываемой паром; вершины 3. Вершину лопатки делают в виде шипа (рис. 13.14, а), на который насаживают бандаж, или в виде полки, или утоняют (рис. 13.14, б).

Поперечное сечение лопатки в пределах ее рабочей части называется *профилем лопатки*: он имеет вогнутую и выпуклую части.

Выпуклая поверхность профиля называется *спинкой лопатки*. Грань лопатки со стороны входа называется *входной кромкой*  $s_1$ , а со стороны выхода — *выходной кромкой*  $s_2$  (рис. 13.15).

Как рабочие, так и направляющие лопатки в зависимости от профиля делятся на активные и реактивные. У активных лопаток (рис. 13.15, а) профиль близок к симметричному, т. е. выходной угол  $\beta_{2л}$  мало отличается от входного  $\beta_{1л}$ . У реактивных лопаток (рис. 13.15, б) профиль несимметричный, выходной угол  $\beta_{2л}$  значительно меньше входного  $\beta_{1л}$ , благодаря чему между лопатками образуется сходящийся канал.

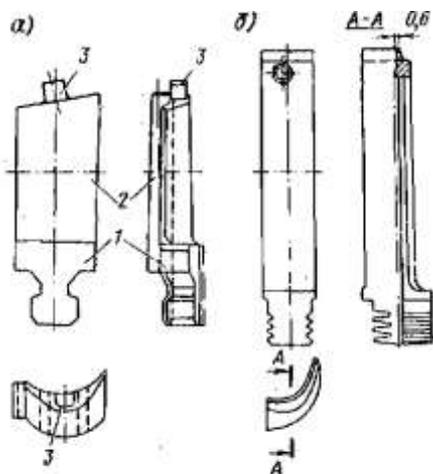


Рис. 13.14. Активная (а) и реактивная (б) лопатки турбины

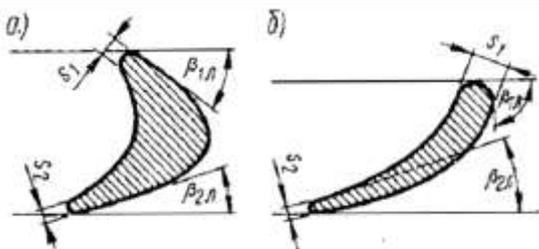


Рис. 13.15. Профили лопаток

Активные профили имеют значительную толщину, а реактивные относительно тонки и по внешнему виду напоминают профиль крыла самолета.

Для образования промежутков (каналов) между лопатками, по которым проходит пар, служат так называемые вставки (промежуточные тела) или же лопатки выполняют с утолщенными ножками.

Для уменьшения тепловых потерь и напряжений поверхности лопаток изготавливают с высокой степенью точности и полированными. Хвостовую часть лопатки выполняют по предельным калибрам. В каждой ступени лопатки являются полностью взаимозаменяемыми.

### Изготовление лопаток.

По способу изготовления лопатки делятся на цельнокатаные, полуфрезерованные, цельнофрезерованные и штампованные.

*Цельнокатаные* (или цельнотянутые) лопатки (рис. 13.16) изготавливают из прокатанных профильных полос, полученных в результате горячей или нескольких холодных прокаток, и применяют при небольших окружных скоростях. Механическая обработка этих лопаток ограничивается фрезеровкой хвоста и вершины. Могут быть и другие несложные операции, например, сверление отверстия для связной проволоки. Вставки выполняют отдельно.

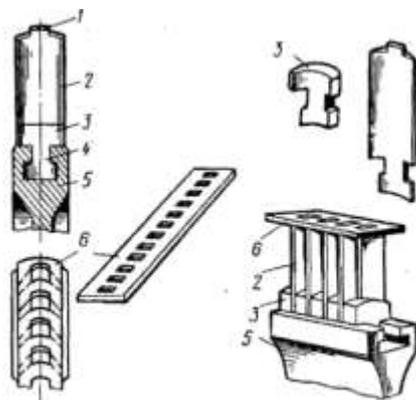


Рис. 13.16. Цельнотянутые лопатки и их крепление на диске

*Цельнофрезерованные* лопатки изготавливают вместе со вставками (с утолщенным хвостом) из горячекатаной полосовой стали прямоугольного и ромбического сечений и применяют при больших окружных скоростях. Фрезерованные лопатки обходятся дорого из-за того, что до 85% ценного металла уходит при обработке в стружку.

*Полуфрезерованные* лопатки изготавливают из профильных прокатанных полос, толщина которых равна толщине хвостовой части лопаток. Вогнутую сторону профиля получают при помощи светлокатаного проката, а выпуклую (спинку) и хвост лопатки фрезеруют. При изготовлении полуфрезерованных лопаток расход нержавеющей стали по сравнению с

изготовлением цельнофрезерованных уменьшается примерно на 50%. Одновременно резко снижается трудоемкость изготовления лопаток.

В настоящее время лопатки с утолщенным хвостом стали делать из заготовок, полученных горячей *штампкой*. Заготовки таких лопаток подвергают незначительной механической обработке, при которой отход металла составляет примерно 10%. Однако такой метод в основном применяют при массовом изготовлении лопаток одинаковых профилей.

### Крепление лопаток.

Лопатки в роторе крепят различными способами, однако их можно разделить на два основных вида: крепление погруженного

типа, когда хвосты лопаток заводят в специальные выточки в ободке диска или барабана; крепление верхнего

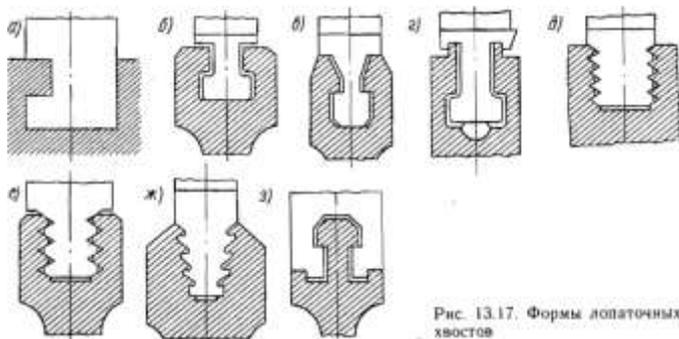


Рис. 13.17. Формы лопаточных хвостов

типа, когда хвосты лопаток надевают верхом и закрепляют на гребне диска, обод же диска получается облегченным.

Часто встречающаяся форма лопаточных хвостов первого и второго типов креплений показана на рис. 13.17. К креплению погруженного типа относятся хвосты: Г-образный (рис. 13.17, а); Т-образный (рис. 13.17, б); молотообразный, полученный путем улучшения Т-образного (рис. 13.17, в); Т-образный с подклинкой снизу (рис. 13.17, г); зубчиковые (рис. 13.17, д — ж). К креплению верхнего типа относятся хвосты типа «обратный молот» (рис. 13.17, з).

Г-образные хвосты применяются для направляющих лопаток, молотообразные и зубчиковые — для направляющих и рабочих лопаток. Т-образные и молотообразные хвосты применяются для слабонагруженных активных лопаток турбин; Т-образные с подклинкой снизу — для средненагруженных активных лопаток; зубчиковые, показанные на рис. 13.17, д,

*e*, — для реактивных и активных лопаток со средней и повышенной нагрузками; зубчиковые и двухвильчатые — для весьма нагруженных лопаток. Наиболее распространенными типами хвостов в лопатках современных турбин являются типы, показанные на рис. 13.17, *в* — *е*.

Для уменьшения вибрации от воздействия струй пара концы активных лопаток 2 (см. рис. 13.16) обычно скрепляют бандажной лентой 6, надеваемой отверстиями на шипы 1, которые затем расклепывают. Лопатки имеют Т-образный хвост 4 в диске 5. Между хвостами лопаток набирают вставки 3.

Бандажная лента состоит по окружности из нескольких отрезков, объединяющих 6—12 лопаток, между которыми имеются зазоры (1—2 мм) для теплового расширения. Концы отрезков припаивают к лопаткам.

В реактивных турбинах давление пара по обе стороны лопаток неодинаково, поэтому часть пара протекает через радиальные зазоры между рабочими лопатками и корпусом, а также направляющими лопатками и ротором, не совершая работы. Для уменьшения протечки эти зазоры делают небольшими. Однако при этом не исключена возможность задевания лопаток за корпус или ротор, например, при неравномерном расширении отдельных частей турбины, короблении и т. п. Чтобы предотвратить аварию, концы реактивных лопаток обычно заостряют (см. рис. 13. 14, б), вследствие чего при задевании о корпус или ротор они легко стачиваются. У таких лопаток ленточный бандаж не ставят. Их назначение выполняет связная проволока, которую пропускают через отверстия или вырезки в верхних частях лопаток и припаивают к лопаткам серебряным припоем (рис. 13.18). Между отдельными отрезками проволоки, как и у ленточного бандажа, устанавливают тепловые зазоры.

У ступеней активных турбин, работающих со значительной степенью реактивности, а также у некоторых реактивных турбин для уменьшения протечки пара устанавливаются ленточные бандажи с заостренными радиальными или осевыми выступами (усиками), выполняющими роль уплотнения (рис. 13.19).

Скрепленная между собой группа лопаток (6—12 шт.) образует так называемый лопаточный пакет. Пакеты между собой не связаны и могут свободно колебаться во всех направлениях. Для уменьшения амплитуды колебаний пакетов между соседними пакетами ставят проволочный мостик (демпфер), представляющий собой короткий кусок проволоки *1* (см. рис. 13.18), припаянный к двум-трем лопаткам одного пакета и свободно проходящий (с зазором *a*) сквозь отверстия двух-трех концевых лопаток соседнего пакета; под действием центробежной силы проволока мостика прижимается к этим отверстиям. Отверстия *2* просверлены для облегчения постановки мостика.

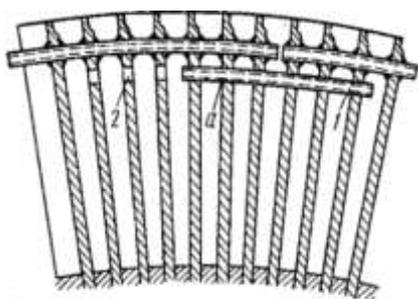


Рис. 13.18. Крепление проволочного бандажа

### Замки

Для возможности ввода лопаточных хвостов погруженного типа в пазы ротора (или корпуса) в последних имеется уширение (колодец). Лопатки и вставки поочередно заводят в это уширение и прогоняют по окружности до надлежащего места. После набора всех лопаток и вставок уширение заделывают замками. При больших диаметрах ротора делают два и даже три замка.

У замка для лопаток с Т-образным хвостом (рис. 13.20, *a*) уширение в пазах диска сделано посредством удаления выступов (показаны на рис. 13.20, *a* штриховой линией), удерживающих хвосты лопаток. Замковую вставку забивают в уширение между прилегающими лопатками, через отверстие в щеке диска сверлят в замковой вставке отверстие, в которое забивают заклепку. Концы заклепки расклепывают.

У замка для лопаток с Т-образным и молотообразным хвостами (рис. 13.20, *б*) замковый вырез в диске расширяется книзу. После установки всех лопаток на дне замкового выреза ставят стальной клин *1*, на вершину которого заколачивают замок *2*. При этом клин раздвигает замок в стороны, и последний принимает форму замкового выреза.

У замка двухступенчатого диска (рис. 13.20, *в*) в средней части обода диска между обоими пазами сделан вырез, через

который вводят последовательно лопатки обоих рядов. Последние (замковые) лопатки 3 крепят двумя планками 4, разжимаемыми клином 5. Клин крепят к ободу винтом 6.

У реактивных турбин, имеющих лопатки с хвостами зубчико

вого типа, часто применяют замок, показанный на рис.

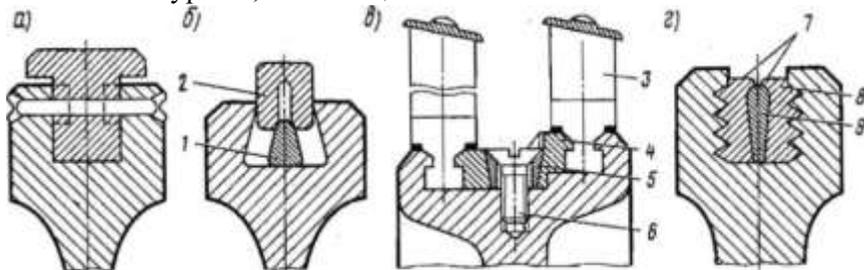


Рис. 13.20. Конструкции замков

13.20, г. Для этого замка вырез не делают. Лопатки вводят в паз ротора и поворачивают так, чтобы их зубчики входили в соответствующие им впадины паза, проводят по окружности до надлежащего места, прижимают к другой лопатке ударами молота по оправке. Набранные таким образом лопатки закрепляют замковой вставкой, которая состоит из двух частей 8, разгоняемых клином 9. Клин удерживается на месте расклинкой выступа 7 обеих частей замковой вставки.

Материал лопаток.

Применяемый для изготовления лопаток материал должен обладать высокими механическими качествами; достаточной стойкостью при высокой температуре, соответствующей эксплуатационным режимам турбины; быть способным противостоять коррозии и эрозии<sup>1</sup>; быть дешевым.

В отечественном турбостроении в качестве материала для лопаток, работающих при температуре до 450°C, применяют хромистые нержавеющие стали марок 1X13 и 2X13 с содержанием хрома 12—14%. Эти стали отвечают всем перечисленным требованиям.

<sup>1</sup>Эрозия — механическое воздействие капелек воды при работе лопаток в области влажного пара

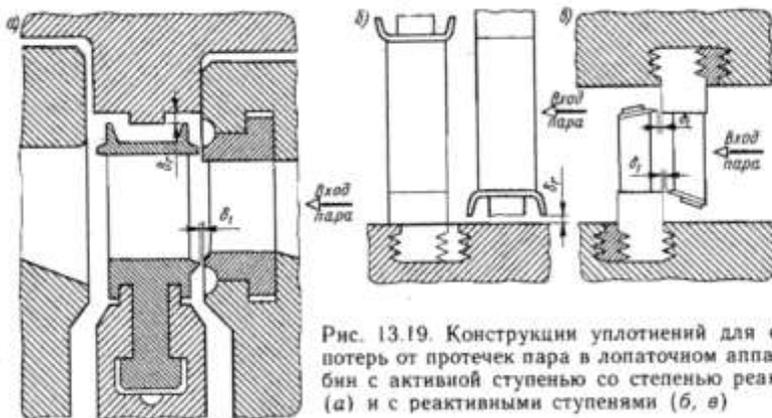


Рис. 13.19. Конструкции уплотнений для снижения потерь от протечек пара в лопаточном аппарате турбин с активной ступенью со степенью реактивности (а) и с реактивными ступенями (б, в)

В отожженном состоянии эти стали можно подвергать холодной прокатке, штамповке, протяжке и другим видам холодной обработки.

Сталь 1X13 применяют для рабочих и направляющих лопаток, бандажной ленты и связной проволоки, сталь 2X13 — для лопаток, не подвергаемых пайке. Вставки, так как они не несут больших нагрузок, изготавливают из углеродистых сталей марок 15 и 35. Лопатки первых ступеней ТВД, работающих при температуре выше 450°C, изготавливают из сталей со значительным содержанием хрома (10—16%), никеля (0,5—38%) и присадками молибдена, ванадия, вольфрама, титана.

### Роторы и диски

*Ротором\** называется вращающаяся часть турбины. Ротор состоит из следующих основных деталей: вала, дисков или барабана с рабочими лопатками, упорного гребня и соединительной муфты. У некоторых конструкций турбин на валу ротора укрепляют втулки наружного уплотнения и маслоотбойные кольца. В реактивных турбинах на роторе часто устанавливают еще уравнивающийся поршень, или думмис.

Конструктивно роторы разделяют на дисковые, барабанные и смешанной конструкции. В активных турбинах ротор составляют **исключительно** из дисков. Для реактивных турбин удобнее и **дешевле** применять барабанные роторы. Роторы активно-реактивных турбин обычно состоят из одного или

нескольких дисков — активной части ротора и барабана — реактивной части ротора.

\*Слово «ротор» происходит от латинского слова «roto», что означает «вращаю».

Роторы могут быть жесткими и гибкими. У жесткого ротора рабочая частота вращения на 20—30% меньше критической, у гибкого — в 1,5 — 2 раза больше критической. Критической частотой вращения ротора называется такая, при которой частота вынужденных колебаний равна частоте собственных колебаний. При этом наступает резонанс и ротор начинает вибрировать с увеличивающейся амплитудой колебаний.

**Главные** судовые турбины должны работать спокойно и надежно при любой частоте вращения, поэтому их роторы всегда изготавливают **жесткими**. Роторы турбогенераторов могут быть жесткими или гибкими, так как они работают с переменной и постоянной частотой вращения.

Роторы турбогенераторов, работающих на главный электродвигатель (ГЭД), имеют жесткий ротор, так как частота вращения их переменная. Роторы турбогенераторов электростанций могут иметь гибкий ротор, так как они работают с постоянной частотой вращения.

В период пуска при повышении частоты вращения и во время остановки ротор с гибким валом проходит зону критической частоты вращения, на практике при быстром прохождении этой зоны возникает только мгновенная легкая вибрация. Как показывает опыт, турбогенераторы с гибкими облегченными валами работают вполне надежно.

После изготовления ротор подвергается статической и динамической балансировке, при которой определяется близость частоты вращения ротора к критической.

**Дисковые роторы.**

При диаметре дисков до 1000—1200 мм дисковые роторы выполняют обычно цельноковаными. Преимуществами этих роторов являются отсутствие соединения дисков с валом, простота обработки, достаточные прочность, жесткость и надежность в эксплуатации. Однако сложность изготовления качественных поковок больших диаметров ограничивает размеры цельнокованных роторов. Поэтому при диаметрах более 1000—1200 мм дисковые роторы целесообразно

выполнять составными (из гладкого или слегка ступенчатого вала и насаженных на него дисков).

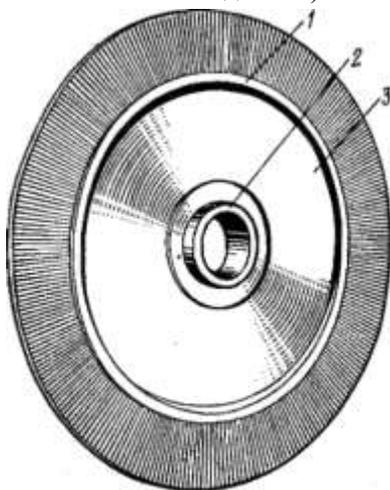


Рис. 13.21. Диск ротора

Диск (рис. 13.21) является основной частью ротора в передаче крутящего момента от рабочих лопаток к валу. Диск состоит из трех основных частей. Часть 1 диска, на которой крепят лопатки, называется ободом; часть 2, которой диск насаживается на вал, — ступицей, средняя часть 3, соединяющая обод и ступицу, — полотном. Форма обода зависит от хвостового крепления лопаток, форма ступицы и полотна — от нагрузки диска и главным образом от его окружной скорости. В цельнокованом роторе ступицы

всех дисков сливаются в одну сплошную центральную часть поковки.

На рис. 13.22 показан дисковый цельнокованный ротор турбины ПТГ. Ротор откован из высококачественной легированной стали. Первый диск 1 двухвенечный, остальные четыре диска 2 — одновенечные. В выточках ободьев дисков установлена лопатка 3 с хвостами зубчикового типа (см. рис. 13.17, e). Наружные концы

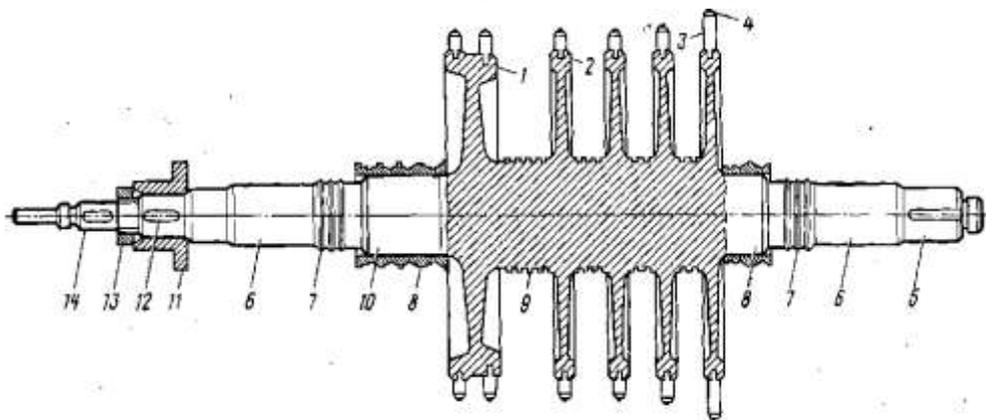


Рис. 13.22. Цельнокованный дисковый ротор паротурбогенератора

лопаток для большей жесткости скреплены между собой бандажной лентой 4. В промежутках между дисками на валу ротора

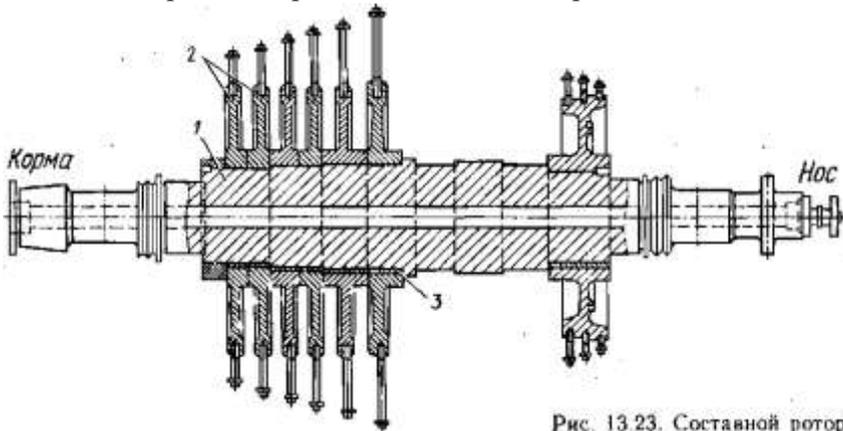
имеются кольцевые выточки 9, образующие вместе с гребешками диафрагмы лабиринтовые уплотнения.

С обеих сторон дисков на вал ротора 10 насажены и крепятся винтами гребенчатые втулки 8 наружного уплотнения. Недалеко от шеек 6 опорного подшипника имеется кольцевая выточка 7 для масляных уплотнений подшипников.

На переднем конце вала ротора установлен гребень 11 упорного подшипника; упорный гребень насажен на шпонке 12 и крепится гайкой 13. На этой же стороне рядом с упорным гребнем в отверстие шейки 14 устанавливается предельный регулятор, выключающий турбину при повышении частоты вращения больше допустимого на 15%.

Кормовая часть вала ротора заканчивается шейкой 5, на который насаживается звездочка муфты.

В судовых турбинах (рис. 13.23) чаще всего применяют непосредственную посадку дисков 2 на вал 1, что обеспечивает плотное и прочное крепление дисков. При таком способе для



облегчения работы по посадке и съемке дисков валы изготавливают ступенчатыми, причем на каждую ступеньку насаживают один, иногда два диска. Для обеспечения прочной посадки и передачи валу крутящего момента диски насаживают на вал с натягом, который представляет собой разность диаметров шейки вала и отверстия ступицы диска. Для горячей посадки натяг определяют расчетом, он примерно равен 0,001 диаметра вала.

Хотя натяг и обеспечивает достаточно надежное соединение диска с валом, все же обязательно ставят одну или

две шпонки 3 на случай потери сцепления диска с валом при быстром нагреве или под действием центробежных сил. Перед посадкой диски нагревают до 150—200°С в масляной ванне или при помощи специальных электротрансформаторов. Перед снятием дисков с вала их нагревают газовыми или керосиновыми горелками. После посадки последний диск укрепляют стопорной гайкой.

Для упрощения изготовления вала, а также для облегчения посадки и снятия дисков иногда преимущественно для турбин вспомогательных механизмов применяют посадку дисков на различных кольцах и втулках.

В этих конструкциях вал по всей длине или на протяжении нескольких ступеней турбины имеет одинаковый диаметр.

**Барабанные роторы.**

Барабанные роторы по конструкции и способу изготовления подразделяют на цельнокованные, полые составные и сварные.

Цельнокованные роторы применяют главным образом для быстроходных реактивных турбин небольшого диаметра; обычно их изготавливают со сквозным центральным отверстием.

Барабаны роторов большого диаметра для уменьшения веса выполняют полыми. При этом для облегчения расточки барабана и дополнительного уменьшения массы ротора одну или обе шейки отковывают отдельно. Поршень думмиса у роторов этого типа обычно отковывают заодно со съемной шейкой.

Для облегченияковки и получения более быстрого прогрева ротора, что особенно важно для повышения маневренности судовых турбин, применяют барабанные роторы, сваренные из отдельных колец или дисков.

## **Литература**

1. Верете А. Г., Дельвинг А. К. Судовые паровые и газовые энергетические установки: Учебник для мореходных училищ.—2-е изд., перераб. и доп.— М.: Транспорт, 1990.- 240 с. Стр. 162-169