

# ЛОПАТКИ ТУРБИН КАК ОТВЕТСТВЕННОЕ ИЗДЕЛИЕ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Белоновская И.Д., д-р. пед. наук, профессор, Арефьев Д.П.  
Оренбургский государственный университет

Технологические процессы изготовления лопаток турбин являются сложными и высокоточными процессами машиностроения. Несмотря на достаточно длительную историю их производства, все стадии технологического процесса остаются трудоёмкими и требующими тщательного контроля точности изготовления. В этой связи анализ конструкции лопатки турбины с целью выявления конструктивных особенностей, снижения трудоёмкости и себестоимости изготовления (отработка на технологичность) является важной задачей в теории и практике технологии машиностроения.

Целью данной статьи является анализ требований, предъявляемый к конструкции и точности изготовления лопаток турбин как ответственных изделий.

Несмотря на определенный научный задел в исследованиях конструкций лопаток турбин, возникают новые аспекты их изучения. Это связано с повышением скоростей работы двигателей, созданием новых конструкций, непрекращающимися попытками конструктивных и точностных улучшений характеристик лопаток турбин, а также возникновением новых технологий и оборудования для их моделирования и изготовления. В этой связи анализ современных конструкций лопаток турбин является актуальной задачей технологии машиностроения.

Лопаткой (рисунок 1) называют деталь турбокомпрессора и/или турбины газотурбинного двигателя (ГТД), предназначенную для перемещения потока газа (воздуха и продуктов его горения) [1].

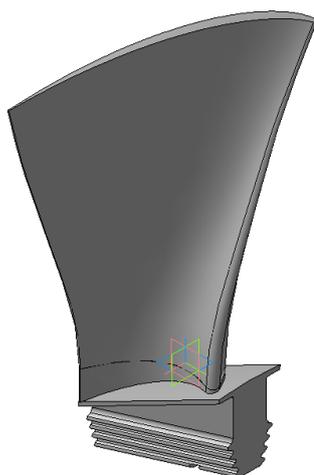


Рисунок 1 – Лопатка турбины ГТД.

Принцип действия такого двигателя (рисунок 2) заключается в следующем: за счет вращения лопаток турбокомпрессора происходит сжатие воздуха, необходимого для горения, и направление его в камеру сгорания, куда также

подается топливо, в результате горения которого образуется большое количество продуктов сгорания, которые находятся под высоким давлением. Энергия давления продуктов сгорания преобразуется в механическую работу за счет вращения лопаток газовой турбины. Часть этой работы расходуется на сжатие воздуха в компрессоре. Другая часть – передается на приводимый агрегат. Именно она считается полезной работой ГТД [1].

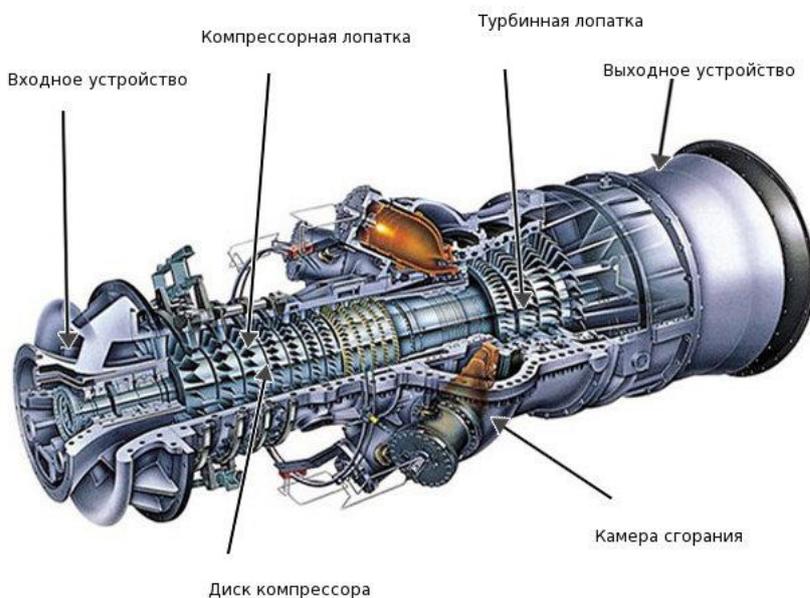
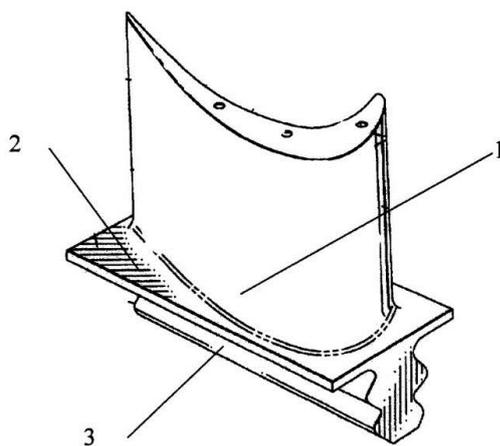


Рисунок 2 – Устройство и принцип действия ГТД.

Основными конструктивными элементами лопатки являются перо лопатки, бандажные полки и замковая часть (рисунок 3).



1 – перо лопатки; 2 – бандажная полка; 3 – замковая часть.

Рисунок 3 – Основные конструктивные элементы лопатки.

Замковая часть является крепежным элементом лопатки; ее поверхности являются конструкторскими базами, определяющими положение детали в сборочной единице. К конструкторским базам лопаток предъявляются высокие требования шероховатости поверхности в пределах  $Rz=0,16 \dots 0,32$  мкм.

В зависимости от сборочной единицы, в которой находится лопатка, различают несколько видов замковой части:

- елочный замок;
- грибовидный замок;
- замок Т-образной формы;
- замок трапецеидальной формы;
- вильчатый замок и др.

Например, елочный замок применяется на лопатках турбин, так как он обеспечивает необходимые параметры прочности и точности крепления лопатки к диску турбины. Замки Т-образной и трапецеидальной формы используются у лопаток турбонасосных агрегатов.

Следует отметить, что каждый из видов замков имеет свои преимущества и недостатки. Поэтому нельзя однозначно утверждать, что один вид имеет преимущество перед другим. Разными заводами изготавливаются разные типы замковой части лопатки, и каждый из них использует свои технологии изготовления [2].

Рабочими поверхностями лопатки являются поверхности пера. К ним предъявляются высокие требования по точности геометрических параметров и шероховатости поверхности. Кроме того, важным параметром является толщина стенки между наружной поверхностью пера лопатки и внутренним контуром охлаждения.

К конструктивным особенностям поверхности пера лопатки следует отнести также термобарьерное керамическое покрытие, обладающее низкой теплопроводностью, толщиной порядка 250 мкм, которое и позволяет ей работать при столь высоких температурах.

Характерной особенностью каждой лопатки является уникальность аэродинамического профиля пера. Как правило, он имеет некоторое сходство с крылом летательного аппарата. При этом существенным отличием пера лопатки от крыла состоит в условиях ее работы. А именно в том, что лопатки работают в потоке воздуха (газа), параметры которого значительно изменяются по её длине.

Бандажные полки предназначены для сцепления в сборочной единице соседних лопаток между собой. Это позволяет повысить прочностные характеристики конструкции, улучшить условия защиты от вибрации. При сборке колес турбины, за счет сложного профиля бандажной полки создается замкнутый контур бандажного обода, который повышает условия прочности и экономичности изделия. Точность соединения между стыковыми частями бандажных полок лопаток выполняется не ниже 5-6 качества. Кроме того, с высокой точностью обеспечивается расположение этих поверхностей относительно замка лопатки [3].

Из дополнительных требований к лопаткам ГТД можно отметить следующие. Допуск на массу каждой рабочей лопатки устанавливают до 5% номинального значения. В процессе сборки колеса турбины осуществляют распре-

деление лопаток по массе исходя из оптимальной схемы их расположения в колесе турбины. Различие масс каждой из лопаток в составе колеса при этом составляет 2 г. После сборки колесо турбины подвергают статической балансировке. На этапе сборки ротора турбины проводятся его динамическая и статическая балансировки.

Столь высокие требования к лопаткам ГТД предъявляются не случайно. Это связано с тем, что разрушение рабочих лопаток турбины является одним из наиболее опасных отказов ГТД. Отломившаяся часть лопатки может пробить корпус турбины, обшивку двигателя и даже обшивку самолета, повредить тяги управления им [4]. Помимо этого, при разрушении лопатки вследствие дисбаланса возникает сильная вибрация ГТД, которая может повлечь за собой разрушение топливных и масляных трубопроводов и пожар двигателя [5].

В этой связи на этапе разработки необходимо выполнять 3d-модель лопатки турбин для проведения предварительного компьютерного анализа ее физико-механических свойств, а также наиболее полной проработки технологического процесса ее изготовления.

В современном машиностроении создание 3d-модели будущей детали является неотъемлемой частью технологической подготовки производства. Лопатки ГТД не являются исключением.

Наиболее популярными в отечественной и мировой промышленности САД-системами, используемыми для трехмерного моделирования деталей в настоящее время являются Autodesk Inventor, Autodesk AutoCAD, Solid Works, КОМПАС-3D, Catia, Siemens NX и другие.

Однако, создание 3d-модели лопатки ГТД осложняется тем, что перо лопатки имеет сложную пространственную форму, геометрия которой задается координатами точек в ряде сечений (рисунок 4, сеч. I-IX).

В связи с этим, наиболее рациональным способом построения трехмерной модели лопатки турбин, а именно пера лопатки, является так называемая операция «вытягивания по сечениям», доступная в большинстве современных САД-систем.

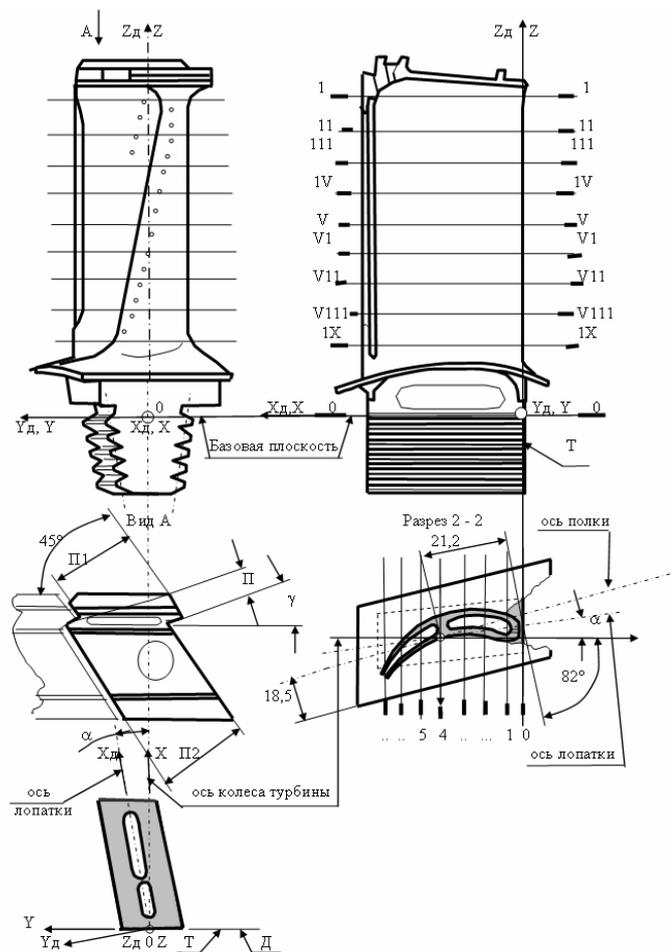


Рисунок 4 – Координатная система ориентирования лопатки первой ступени турбины ГТД.

В связи с этим, наиболее рациональным способом построения трехмерной модели лопатки турбин, а именно пера лопатки, является так называемая операция «вытягивания по сечениям», доступная в большинстве современных САД-систем. Однако наибольшую сложность в связи с особенностями геометрии пера лопатки имеет процесс создания эскизов сечений, по которым будет производиться данная операция [6].

Таким образом, можно сделать вывод, что процесс изготовления столь ответственной детали как лопатка турбины ГТД является очень трудоемким уже на этапе технологической подготовки производства и требует обязательно применения различных систем автоматизации с целью снижения трудоемкости, а также себестоимости готового изделия.

#### Список литературы

1. Демин Ф.И. *Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей [Электронный ресурс] : [учебник] / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев; под. общ. ред. проф. Ф. И. Демина. – 2-е изд. – Самара: Изд-во СГАУ, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).*

2. Резник С.В. Проектирование замкового соединения керамической лопатки и металлического диска газовой турбины: / С.В. Резник, Д.В. Сапронов - Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (Москва), 2014. – 9с. ISSN: 0536-1044

3. Бандажная полка рабочей лопатки: Пат. №2063518 РФ МПК F01D 5/22 / О.Г. Вассерберг, Е.Д. Консон, В.Н. Макаров, Ю.Н. Неженцев, О.М. Холтобин ; заявитель и патентообладатель Акционерное общество открытого типа "Ленинградский металлический завод". – № 92016020; заявл. 30.12.92; опубл. 10.07.96. – 3 с.: ил

4. Белоусов А.И. Дефекты бандажированных лопаток высокотемпературных газовых турбин: / А.И. Белоусов, С.В. Наздрачев - Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Самара), 2013. – 6с. ISSN: 2542-0453, eISSN: 2541-7533

5. Основные неисправности турбины, причины их возникновения и мероприятия по предотвращению [Электронный ресурс] // <http://ooobskspetsavia.ru/2015/10/06/osnovnye-neispravnosti-turbiny-prichiny-ix-vozniknoveniya-i-meropriyatiya-po-predotvrashheniyu/>

6. Рязанов А.И. Автоматизация процесса 3d-моделирования рабочей лопатки турбины: / А.И. Рязанов - ООО "Стин" (Москва), 2016. – 3с. ISSN: 0869-7566