

УДК 62-253.6, 539.4

Расчёт на прочность моноколеса газотурбинного двигателя

*Колесниченко Р. В., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им Н. Э. Баумана,
кафедра «Компьютерные системы автоматизации производства»*

*Научные руководители: Гаврюшин С. С., д.т.н., профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им Н. Э. Баумана*

*Петренко Е. О., к.т.н.
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им Н. Э. Баумана
liza@rk9.bmstu.ru*

В данной статье рассказывается о расчёте на прочность детали моноколесо (блиск, вентилятор) 1-й ступени компрессора низкого давления (КНД) газотурбинного двигателя (ГТД). Первая ступень КНД является начальной ступенью сжатия газа на его пути в камеру сгорания ГТД. Сжатие газа происходит за счёт его взаимодействия с вращающимися лопатками ротора, чем является диск. Моноколесо представляет собой такой диск с лопатками, выполненный в виде единой детали.

Существует несколько способов получения такой детали. Наиболее распространённый - путём механической обработки заготовки с удалением материала межлопаточного пространства, что обеспечивает получение моноколеса без границ раздела между диском и лопатками. Таким образом, полученная деталь является монолитной, что уменьшает вероятность её разрушения в процессе работы по границе раздела лопаток и диска. Но в процессе эксплуатации такая проблема играет очень важную роль, так как разрушение лопаток может привести к нелокализованному разрушению газотурбинного двигателя, что может привести к катастрофе. Поэтому необходимо проводить расчёт на прочность таких деталей для того, чтобы сделать выводы о запасах статической прочности в диске и лопатках.

Форма детали является сложной, поэтому её расчёт на прочность не может быть получен аналитически. Существует несколько методов расчёта на прочность, но самый широко распространённый – это метод конечных элементов, который является сеточным методом, предназначенным для решения задач микроуровня, для которого модель объекта задаётся системой дифференциальных уравнений в частных производных с заданными

краевыми условиями. Основные преимущества этого метода – произвольная форма рассчитываемой области, возможность создания сетки более редкой в тех местах, где не требуется особая точность [1].

Исходные данные расчёта:

Расчёт моноколеса 1-й ступени КНД ГТД проводится для наиболее нагруженного режима $n_{\max}, H=0, M=0$ в CAE системе AnSYS Mechanical APDL.

На рис. 1 представлена расчётная 3D модель колеса. Данная модель представляет собой сектор моноколеса, угол которого 18.947° ($360^\circ/19$ лопаток). Для учета влияния остальной части диска на гранях используемой модели были заданы граничные условия циклической симметрии в цилиндрической системе координат. Кроме того, было ограничено осевое перемещение узлов диска в месте его соединения с вентилятором 2 ступени (см. рис. 1).

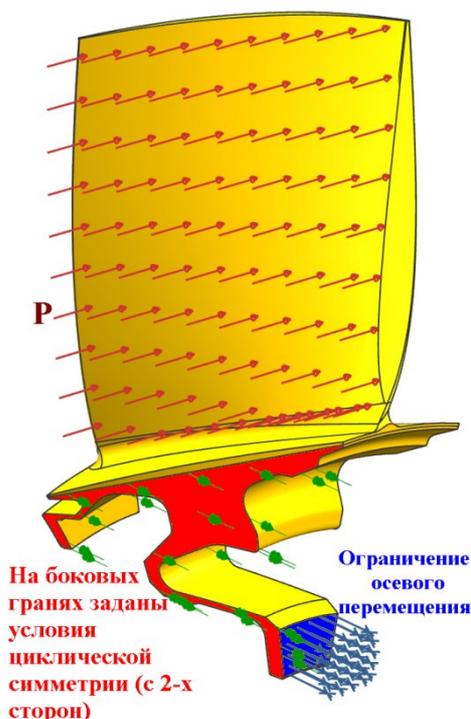


Рис. 1. Граничные условия и нагрузка на лопатку

Блиск изготовлен из материала ВТ6, механические свойства которого представлены в таблице:

| | При температуре, °С | |
|----------------------------------------|---------------------|--------|
| | 20 | 350 |
| Е, МПа | 125000 | 102000 |
| Коэффициент Пуассона | Mu=0.3 | |
| Плотность материала, кг/м ³ | Ro=4450 | |
| Предел прочности, МПа | $\sigma_B=900$ | – |

Статический расчет напряжённо-деформированного состояния блиска

Моноколесо 1-й ступени КНД ГТД работает в условиях нагрузки от:

- Поля центробежных сил от вращения с частотой 235,8 Гц (14150 об/мин=1481.784534943 рад/с);
- Газовой силы на одну лопатку (распределённая нагрузка по всему профилю пера лопатки, равная среднему значению газовой силы, действующей на лопатку $P=495.071712\text{Н}$, см рис. 1).

Так как это моноколесо 1-й ступени КНД, особых температурных нагрузок оно не испытывает. В работе деталь нагревается не более, чем на 100-150 °С.

Принцип построения 3D модели моноколеса:

Инженер-конструктор, проектирующий лопатку, определяет координаты точек профиля пера лопатки по сечениям (в данном случае 13 сечений, по 49 точек на каждое сечение). При построении 3D-модели лопатки вначале задаются координаты этих точек. Затем создаются сплайн-линии по этим точкам по сечениям, как показано на рис. 2.



Рис. 2. Сплайн-линии сечений профиля пера лопатки (показано только 3 сечения)

Далее создаются сплайн-линии, разделяющие входную, выходную кромки пера лопатки и само перо для последующего разбиения лопатки на 3 тела (входная, выходная кромки и тело самого пера лопатки) с целью получения ровной и относительно равномерной сетки при разбиении лопатки на конечные элементы для увеличения точности расчёта..

Наконец, создаются поверхности корыта, спинки, носика, хвостика лопатки “натягиванием” на сплайновые линии сечений лопатки. Также создаются поверхности верхней и нижней кромок лопатки, поверхности, разделяющие кромки пера и само перо лопатки, образующие 3 тела.

Далее достраивается модель моноколеса (создаются поверхности диска, галтели, бандажа), вырезается из него сектор, и получившаяся модель разбивается на 5 тел (3 тела составляют лопатку, одно тело представляет собой вырезанный участок ступицы диска с галтелью и тело диска). Это можно сделать в любой 3D CAD системе, в том числе и в CAE системе AnSYS. [4]

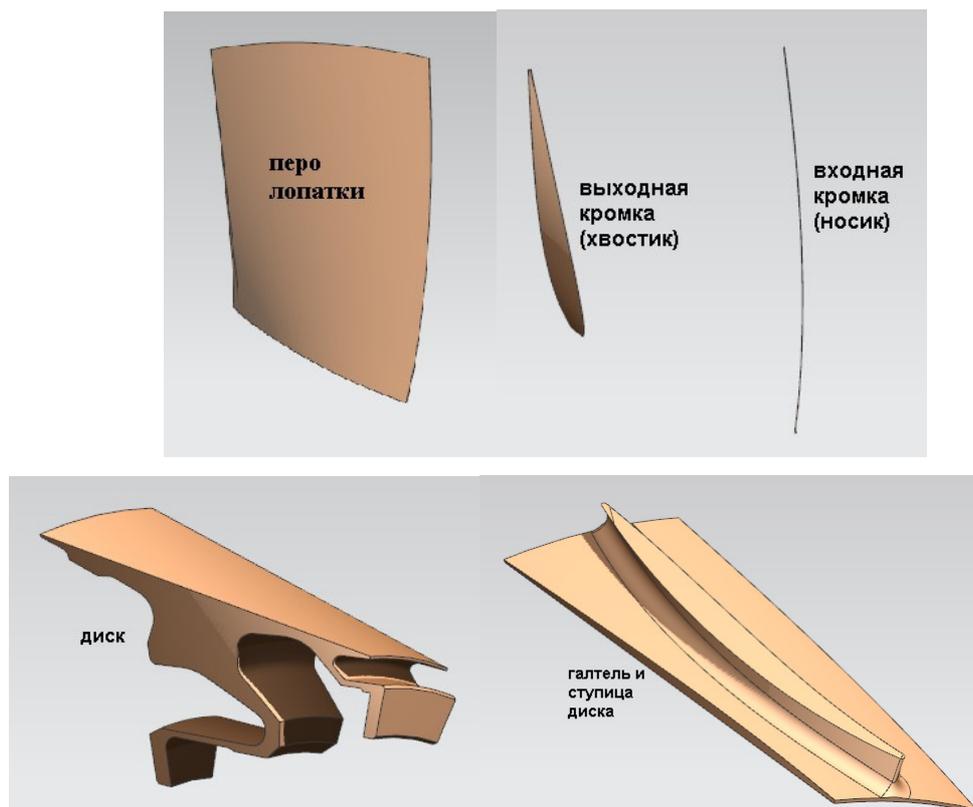


Рис. 3. Тело пера лопатки, входной и выходной кромок, диска и галтели со ступицей диска

Далее в CAE системе задаются граничные условия, исходные данные, 5 получившихся тел моноколеса разбиваются на конечные элементы разными способами, описанными далее, задаются закрепления детали и действующие силы.

Диск моноколеса разбивается на конечные элементы методом проекции и оставления сетки одной граничной поверхности сектора на другую поворотом вокруг оси вращения моноколеса на угол $360^{\circ}/19$ так как общее количество таких секторов 19 штук (в CAE системе AnSYS Mechanical APDL команда VSWEEP).

Перо лопатки разбивается также проецированием поверхности, разделяющей входную кромку лопатки и перо, на поверхность, разделяющую выходную кромку лопатки и перо (в CAE системе AnSYS Mechanical APDL команда VSWEEP).

Тела входной и выходной кромок пера лопатки и тело галтели со ступицей диска разбиваются автоматически (в CAE системе AnSYS Mechanical APDL команда VMESH) с указанием количества конечных элементов для линий, ограничивающих эти тела (в CAE системе AnSYS Mechanical APDL команда LESIZE). [2,3]

На рис. 4 показана сетка сектора моноколеса, разбитого на конечные элементы.

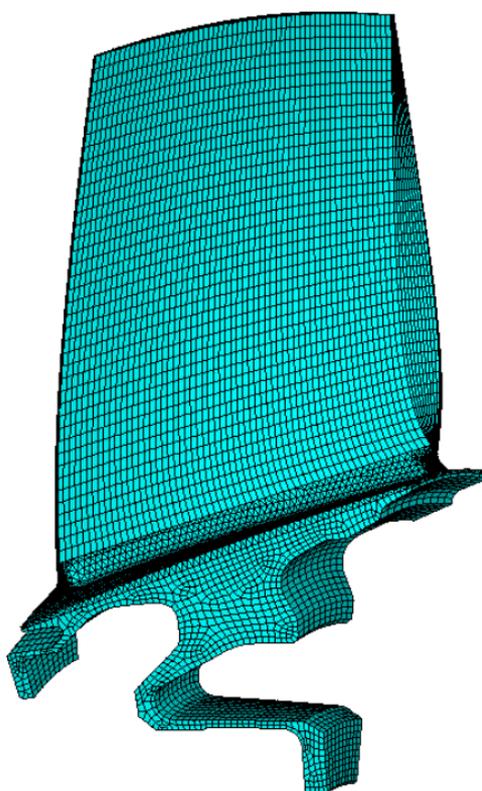


Рис. 4. Сектор моноколеса, разбитый на конечные элементы

Результаты расчёта

В результате расчёта мы получаем картины распределения радиальных, окружных и эквивалентных напряжений в блиске. Нам необходимо учитывать, что полученные напряжения в диске и в лопатке разные, поэтому будем считать их по-отдельности. Коэффициент запаса прочности также посчитаем отдельно для лопатки и для диска.

Максимальные радиальные напряжения в лопатке равны 337 МПа и находятся они примерно в середине лопатки.

Максимальные окружные напряжения в диске составляют 494 МПа и находятся они в месте границы диска и лопатки.

Максимальные эквивалентные напряжения в колесе возникают в ступице диска и равны $\sigma_{\text{экв.мах}} = 560$ МПа. Максимальные эквивалентные напряжения в лопатке равны $\sigma_{\text{экв.мах}} = 348$ МПа, как видно из рисунка 5.

По теории прочности при объёмном напряжённом состоянии коэффициент запаса прочности рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{\sigma_{\text{в}}}{\sigma_{\text{экв.мах}}} > [\sigma]$$

где σ – предел прочности для данного материала;

σ – максимальное эквивалентное напряжение детали;

$[\sigma]$ – минимальное допустимое значение коэффициента запаса прочности. Обычно принимается на основании опыта конструирования и эксплуатации машин определенного типа.

Минимальное допустимое значение коэффициента запаса прочности для дисков и для лопаток $K = 1,35 \dots 1,5$.

Коэффициент запаса прочности для диска

$$K_{\text{д}} = \frac{\sigma_{\text{в.д}}}{\sigma_{\text{экв.мах.д}}} = \frac{900}{560} = 1.61 > [1.5]$$

Для лопатки коэффициент запаса прочности

$$K_{\text{л}} = \frac{\sigma_{\text{в.л}}}{\sigma_{\text{экв.мах.л}}} = \frac{900}{348} = 2.59 > [1.5]$$

ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB=1
TIME=1
SEQV (NOAVG)
DMX=5361.81
SMN=-416848
SMX=560E+09

ANSYS
APR 13 2014
16:02:57

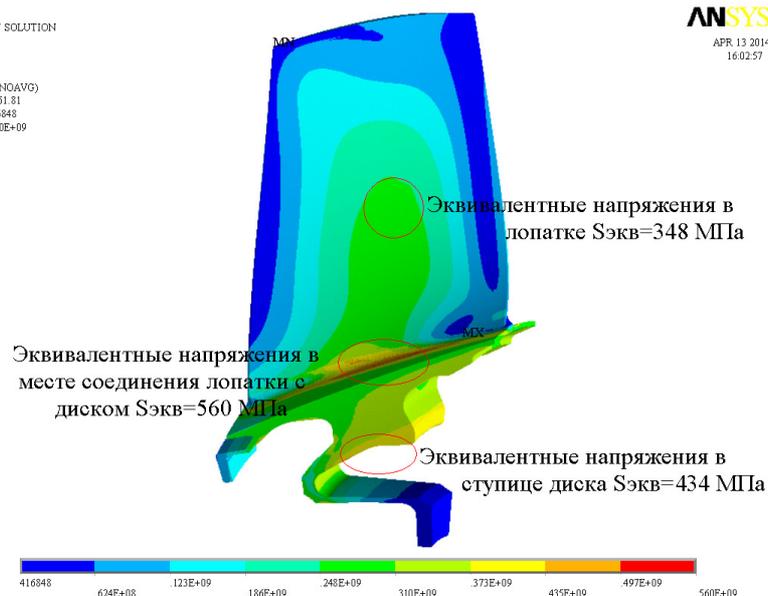


Рис. 5. Картина распределения эквивалентных напряжений в моноколесе

Вывод: запасы статической прочности в диске и лопатке удовлетворяют требованиям норм прочности.

Список литературы

1. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 543 с.
2. Белкин А.Е. , Гаврюшин С.С. Расчёт пластин методом конечных элементов. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 232 с.
3. Шкловец А.О. Конструкционный анализ методом конечных элементов в САЕ-пакете Ansys Mechanical. Электрон. учеб. пособие. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2012. Электрон. текстовые и граф. дан. (2,245 Мбайт).
4. Машков А., Нестеров С., Чернышев Н., Жук Е.. Разработка технологии изготовления заготовки турбинной лопатки для ОАО «Пензадизельмаш» // САПР и графика. КомпьютерПресс. Электрон. журн. 2009. № 9. Режим доступа: <http://www.sapr.ru/Article.aspx?id=20746> (дата обращения 23.11.2013).