

УДК 621.45.037

## РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАБОЧИХ КОЛЁС ДЛЯ АНАЛИЗА СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

©2014 А.О. Шкловец, А.В. Урлапкин, К.В. Бояров

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Работа посвящена созданию параметрических конечно-элементных моделей рабочих колёс компрессора и турбины низкого давления, а также свободной турбины модернизируемой газоперекачивающей установки НК-36СТ с использованием пакета ANSYS Mechanical. Разработанные модели лопаток и дисков позволяют в широких пределах управлять сеткой конечных элементов и геометрическими параметрами конструкции: геометрией пера, формой и размерами радиусного перехода, геометрией хвостовика, размерами конструктивных элементов диска. Геометрия профильной части лопаток считывается из файлов, полученных в результате газодинамических расчётов. Модели рабочих колёс учитывают контактное взаимодействие в замковом соединении. Подход к созданию сетки конечных элементов предполагает использование упорядоченной и гибридной схемы, что сокращает объём сеток и, как следствие, уменьшает время расчётов. Использование таких моделей для расчёта статической прочности в условиях изменения геометрических параметров при газодинамической оптимизации позволило произвести их в короткие сроки. С помощью разработанных моделей произведены поверочные расчёты и подтверждены запасы прочности.

*Прочностная доводка, поворотная симметрия, упорядоченная сетка элементов, гибридная сетка, параметрическое моделирование, контактная пара.*

**Введение.** Модернизация существующих двигателей в условиях жёсткой конкуренции современного производства требует существенного снижения сроков её проведения. Значительную часть этого процесса занимает прочностная доводка турбомашин. Кроме того, оптимизация по параметрам рабочего процесса может вносить значительные изменения в конструкцию, что дополнительно увеличит срок доводки. Решением этой проблемы может стать сокращение объёмов испытаний и повышение роли численных исследований.

В рамках проекта по модернизации газоперекачивающей установки НК-36СТ производилась разработка параметрических конечно-элементных моделей рабочих колёс (РК) компрессора и турбины низкого давления, а также свободной турбины. Моделирование осуществлялось в среде пакета ANSYS Mechanical с использованием встроенного языка программирования APDL (ANSYS Parametric Design Language).

Наличие у рабочих колёс поворотной симметрии позволяет для сокращения времени расчётов создавать модель сек-

тора диска, включающую одну лопатку. Также для уменьшения объёма сетки конечных элементов (КЭ) она выполнена гибридной - сочетающей как упорядоченные области, так и области, в которых наложена свободная поверхностная сетка КЭ и последующим вытягиванием её для получения гексаэдральной. Для получения качественной гибридной сетки объёмы лопатки и диска разбивались на объёмы, содержащие простую геометрию.

**Разработка моделей лопаток.** Модель пера лопатки была построена по 10 сечениям, координаты точек которых записаны в текстовый файл, выдаваемый «профилятором» - программой для построения наборов точек профилей сечений, получаемых в результате газодинамической оптимизации. При этом текст программы имеет такую логику, что изменение числа сечений и количества точек по спинке и корытцу в каждом сечении не влияет на работоспособность макроса, а все изменения файлов с координатами точек учитываются автоматически. На основе полученных точек формируются поверхности пера лопатки, которые затем с помощью булевой операции разде-

ления преобразуются в набор сечений, необходимый для построения узлов сетки конечных элементов. Цикл разделения построен по такому алгоритму, что позволяет изменять угол установки секущей плоскости и шаг по высоте лопатки, добиваясь тем самым необходимой густоты сетки (рис. 1).



Рис. 1. Пери лопатки после операции разделения

К полученной геометрии пера лопатки достраивается плавный переход к трактовой полке либо к хвостовику. Алгоритм построения позволяет отслеживать взаимное угловое расположение пера и полки и корректировать длину дуги окружности (рис. 2).

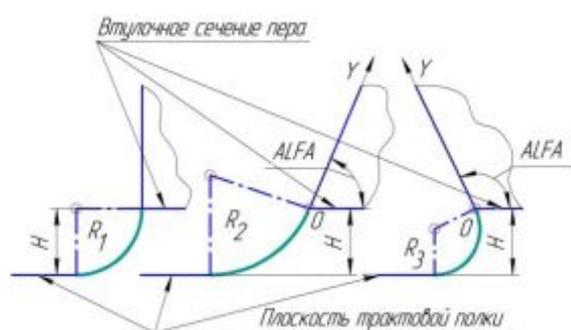


Рис. 2. Корректировка дуги окружности в зависимости от взаимного расположения пера и полки

Построение дуг скругления происходит следующим образом:

- в точке линии втулочного сечения располагается локальная система координат, в которой строится вспомогательная окружность;

- находятся точки пересечения построенной окружности с поверхностью полки и поверхностью пера;

- по найденным точкам определяется величина угла ALFA и строятся конечные точки дуги и сама дуга;

- в случае, если дуга скругления выходит за пределы полки, производится её подрезка предварительно сориентированной рабочей плоскостью.

В результате выполнения этих операций по контуру втулочного сечения пристраиваются дуги скругления (рис. 3).

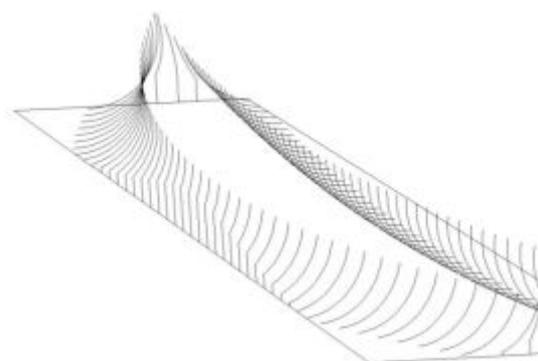


Рис. 3. Линии скругления с выполненной подрезкой

Для получения упорядоченной сетки трактовая полка (либо хвостовик) разделяется по толщине на две части, на каждую из которых переносится конфигурация сетки из прилегающих частей. На верхней части полки путём проецирования точек втулочного сечения строятся точки промежуточных сечений внутри полки. По созданным точкам создаются узлы с совпадающей нумерацией, по которым затем строятся конечные элементы пера. При построении сетки применяется объёмный 8-узловой конечный элемент SOLID185. В качестве технологии формирования элемента используется метод упрощённой расширенной формулировки деформаций. Она предотвращает сдвиговое заклинивание в задачах с преобладанием изгиба, является специальным случаем расширенной формулировки деформаций и всегда включает девять внутренних степеней свободы. Все внутренние степени свободы вводятся автоматически на уровне элемента и являются конденсированными. Сформированные этим методом

элементы позволяют избежать сильного влияния густоты сетки конечных элементов на результаты анализа [1, 2]. Проецированием точек втулочного сечения на линии, ограничивающие поверхность полки, и расстановкой промежуточных точек получают точки для элементов верхней части полки.

Затем выполняется построение объёмов нижней части полки, удлинённой ножки и хвостовика таким образом, чтобы получить геометрию, допускающую наложение упорядоченной сетки. Наложение сетки на эти элементы осуществля-

ется путём разбиения торцевой поверхности у хвостовика и боковой поверхности у ножки и протягивания сетки операцией *Sweep*. Поскольку сетка в нижней и верхней частях полки строится независимо, в ней нет совпадения узлов. Для того, чтобы связать лопатку в единое целое, применяется связка с помощью контактной пары с MPC алгоритмом, которая позволяет жёстко связать между собой разнородные элементы без возникновения значительных погрешностей при расчёте. В результате описанных действий получены модели лопаток, приведённые на рис. 4.

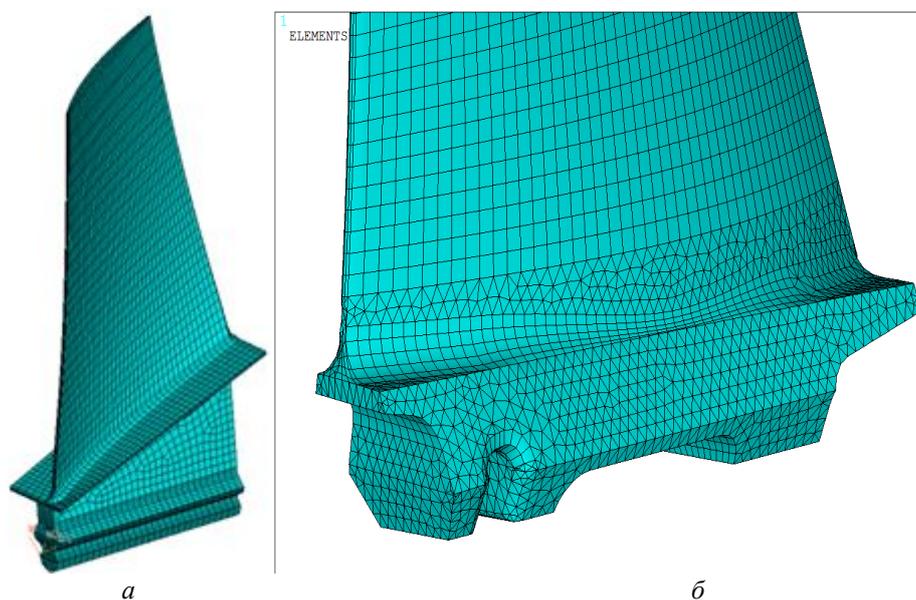


Рис. 4. Конечно-элементные модели лопаток: а – первого рабочего колеса компрессора НД; б – второго рабочего колеса компрессора НД

Для лопаток турбин, имеющих существенно более сложную геометрию, применён иной подход к моделированию. Наиболее сложные элементы, такие как хвостовик, трактовая и бандажная полка, переносятся в формате *Parasolid* из системы NX 8.5 с предварительным исправлением геометрии в ANSYS Workbench с помощью функции *Repair Edges* (рис. 5).

На полученную таким образом геометрию в дальнейшем накладывалась поверхностная, а далее по ней – объёмная сетка КЭ (рис. 6).

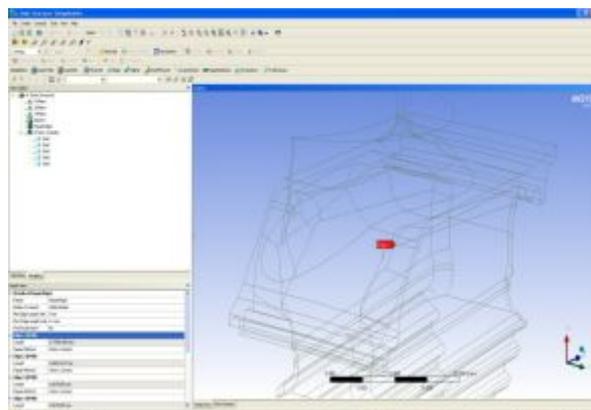


Рис. 5. Исправление геометрии в ANSYS Workbench

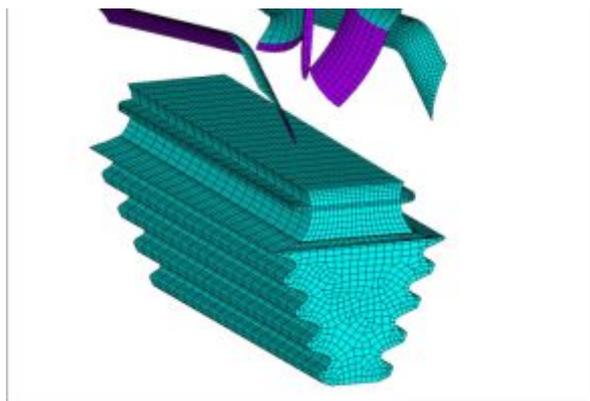


Рис. 6. Наложение поверхностной сетки

**Разработка моделей дисков.** Одним из условий для создаваемых моделей является максимальное сохранение геометрии дисков РК. Поэтому при их построении использовались 3D-модели, ранее созданные в программном пакете Siemens NX. Модель диска РК первой ступени компрессора низкого давления (КНД) представлена на рис. 7.



Рис. 7. Трёхмерная модель диска первой ступени КНД

Для импорта данной модели в ANSYS из неё вырезался сектор с углом  $360/n$  градусов, где  $n$  - количество лопаток в РК. Для исправления возникших при импорте ошибок и удаления мелких элементов, что необходимо для построения более качественной сетки, модель импортировалась из NX в ANSYS Workbench DesignModeler, где производилось исправление геометрии паза диска с помощью операций «лечения» геометрии. После исправления сегмент диска импортировался в ANSYS Mechanical таким образом, чтобы совместить его с ранее построенной лопаткой (рис. 8).

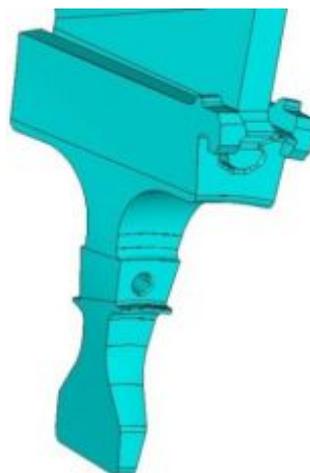


Рис. 8. Сектор диска с лопаткой

Затем на боковую поверхность диска накладывалась свободная поверхностная сетка, при этом для повышения качества сетки на линии отверстия задавалось определённое количество элементов. Для задания циклической симметрии предварительно сетка с одной поверхности симметрии копировалась на другую, а на объёмы сегмента диска, не включающие хвостовик, накладывалась упорядоченная сетка конечных элементов. Для создания сетки на объём паза разбивались линии поверхностей паза, а затем накладывалась тетраэдрическая сетка (рис. 9).



Рис. 9. Конечно-элементная модель диска

### Граничные условия и нагрузки.

На противоположные грани сектора диска накладывалось условие циклической симметрии для обеспечения корректного учёта тангенциальных нагрузок, возникающих в диске. Для моделирования взаимодействия хвостовика и паза диска создавались контактные пары с трением. Закрепление моделей осуществлялось либо по поверхностям отверстий, либо по участкам проставок. В качестве действующих нагрузок на рабочие колёса прикладывались нагрузки от действия центробежных сил, а также газовые нагрузки, полученные в результате газодинамических расчётов и затем перенесённые на внешние узлы сетки конечных элементов лопатки.

Для учёта взаимодействия лопаток турбины по бандажным полкам выполняются следующие дополнительные построения:

- в цилиндрической системе координат копируется часть бандажной полки на угол шага лопаток;
- на поверхности циклической симметрии исходной полки и её скопированной части накладываются условия симметрии;

– по контактным поверхностям создаётся контактная пара с начальным коэффициентом трения 0,1.

Аналогичным образом осуществляется построение моделей остальных рабочих колёс.

Полученные модели обладают следующими возможностями:

- автоматическое построение профилей лопаток по данным, полученным в результате газодинамической оптимизации;
- управление числом и плотностью сетки КЭ в любой части модели;
- полностью параметрическое перестроение радиусных переходов от профильной части к полкам и хвостовику;
- параметрическое изменение хвостовика.

Использование параметрических моделей позволило в короткие сроки произвести оптимизационные расчёты и подтвердить запасы прочности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления правительства РФ №218 от 09.04.2010.

### Библиографический список

1. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.
2. ANSYS Theory Manual, 12th edn., SAS IP Inc., 15-65-15-66 (1999).

3. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчёт на прочность деталей машин: справочник. М.: Машиностроение, 1993 640 с.

### Информация об авторах

**Шкловец Александр Олегович**, младший научный сотрудник отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Вибрационная прочность и надёжность авиационных изделий», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [ssau\\_shklovets@mail.ru](mailto:ssau_shklovets@mail.ru). Область научных интересов: статическая и динамическая прочность турбомашин.

**Урлапкин Александр Викторович**, инженер отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Вибрационная

прочность и надёжность авиационных изделий», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [urlapkin@gmail.com](mailto:urlapkin@gmail.com). Область научных интересов: статическая и динамическая прочность турбомашин.

**Бояров Константин Владиславович**, инженер отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Вибрационная прочность и надёжность авиационных изделий», Самарский государственный аэрокосмический университет

имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [konst90@gmail.com](mailto:konst90@gmail.com). Область на-

учных интересов: математическое моделирование динамических процессов в упругих системах.

## **DEVELOPMENT OF PARAMETER-ORIENTED MODELS OF BLADED DISKS FOR STATIC STRENGTH ANALYSIS**

©2014 A.O. Shklovets, A.V. Urlapkin, K.V. Boyarov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

In today's competitive production is important shortening time-processing products, which can be achieved using modern digital technology. Work is devoted in creating parametric finite element models of the compressor and the low-pressure turbine rotor wheels and a free turbine of modernized gas compressor unit NK-36ST using the package ANSYS Mechanical. The developed models of blades and disks allow to control grid of finite elements and the geometrical parameters of the structure in a wide range: the geometry of the blade, shapes and sizes for radius transition, shank geometry, dimensions of structural elements of the disc. The geometry of the airfoil blades is read from the file received as a result of gas-dynamic calculations. Models rotor wheels consider contacting a locking connection. Approach to the creation of the finite element mesh is to use structured and hybrid scheme that reduces the amount of grids and as a consequence, reduces the calculation time. The use of such models for the calculation of static strength under changing the geometric parameters of the gas-dynamic optimization when allowed to make them as soon as possible. With the help of the developed models in the future produced calibration calculations and confirmed reserves of strength.

*Strength debugging, rotational symmetry, mapped mesh, hybrid mesh, parametric modeling, contact pair.*

### **References**

1. Basov K.A. ANSYS: справочник pol'zovatelya [ANSYS: User's manual]. Moscow: DMK-Press Publ., 2005. 640 p.
2. ANSYS Theory Manual, 12th edn., SAS IP Inc., 15-65-15-66 (1999).
3. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. Raschet na prochnost' detalei mashin: Spravochnik [Calculating the strength of machine parts. Handbook]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1993 640 p.

### **About the authors**

**Shklovets Aleksandr Olegovich**, associate research fellow of sectoral research laboratory "Vibration resistance and reliability of aeronautical products", Samara State Aerospace University. E-mail: [ssau\\_shklovets@mail.ru](mailto:ssau_shklovets@mail.ru). Area of Research: static and dynamic strength of turbomachinery.

**Urlapkin Aleksandr Viktorovich**, engineer of sectoral research laboratory "Vibration resistance and reliability of aeronautical products", Samara State Aerospace Universi-

ty. E-mail: [urlapkin@gmail.com](mailto:urlapkin@gmail.com). Area of Research: static and dynamic strength of turbomachinery.

**Boyarov Konstantin Vladislavovich**, engineer of sectoral research laboratory "Vibration resistance and reliability of aeronautical products", Samara State Aerospace University. E-mail: [konst90@gmail.com](mailto:konst90@gmail.com). Area of Research: math modeling of dynamic process in elastic systems.