

Методика уточненных расчетов дисков авиационных двигателей со съемными лопатками методом конечных элементов в трехмерной постановке в среде Femap/Nastran

К. Н. Рудаков¹

Received: 15 March 2021 / Accepted: 24 May 2021

Проблематика. При доработке конструкции дисков роторов авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) необходимо, в частности, проводить расчеты на прочность, для чего создавать компьютерные модели, соответствующие утвержденным конструкциям (чертежам) и условиям эксплуатации. Алгоритм создания конечно-элементной сетки модели для проведения расчетов характеристик напряженно-деформированного состояния (НДС) диска с лопатками необходимо модифицировать с учетом развития расчетных программ.

Цель исследования. Предложить алгоритмы, позволяющие с заданной точностью рассчитывать характеристики НДС дисков с лопатками на персональных компьютерах, а также представлять результаты в виде графиков типа “поверхность”.

Методика реализации. На примере диска 2-й ступени компрессора ГТД был создан алгоритм построения трехмерной конечно-элементной сетки диска ГТД из отдельных блоков, “склеенных” в единую сетку. Проведены численные расчеты (контактная задача термоупругости, изотропные материалы). Для подготовки построения графиков типа “поверхность” создана интерфейсная программа преобразования таблицы из столбцов в двумерную таблицу.

Результаты исследования. Созданы и подробно описаны методики достижения целей исследования.

Выводы. Созданные методики позволяют на ограниченных компьютерных мощностях проводить достаточно точные проверочные расчеты дисков с лопатками в трехмерной постановке, провести визуализацию распределения напряжений и контактных усилий зоны контакта “диск–лопатка” в виде графиков типа “поверхность”.

Ключевые слова: диск авиадвигателя, расчетная модель, контактная задача, концентрация напряжений, методика.

Введение

При эксплуатации таких сложных объектов, как быстровращающиеся диски в составе роторов авиационных ГТД, возникает ряд проблем. Например, на рис. 1 показано фото части диска с усталостной трещиной, возникшей в зоне концентрации напряжений [1].

Диски несут лопатки, и это их основное предназначение. В авиационных ГТД лопатки обычно съемные, т.е. диски имеют лопаточные замки, удерживающие лопатки. Чаще всего это замки типа “ласточкин хвост” (рис. 1) или “елочка”. Конструктивно замки – это прорези (пазы) в ободе диска, расположенные под

рассчитанными углами по отношению к координатным осям. Лопатки в пазы вставляются основаниями (хвостовиками) и фиксируются штифтами или тонкими деформируемыми пластинами. Таких лопаток (и замков) на диске обычно несколько десятков. Фактически имеется циклически повторяемая геометрия (рис. 2 а) с угловым шагом $\Delta\theta = 360/N$ градусов, где N – количество лопаток на диске. Если учесть, что все лопатки диска изготавливаются из одного материала и работают в (теоретически) одинаковых условиях, можно говорить о полной циклической симметрии задачи о расчете диска с лопатками: геометрической, материальной, нагружения. Поэтому можно анализировать один сектор диска, с лопаткой и крепежным элементом, рис. 2 б.

На этапе проектирования обычно используют приближенные схемы: как геометрические, так и расчетные [2–12]. Но при конструктивной доработке диска важно создать компьютерную модель, парамет-

✉ K. N. Rudakov
knrudakov@ukr.net

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine



Рис. 1. Характерная усталостная трещина в диске ГТД в зоне лопаточного замка типа “ласточкин хвост” [1]

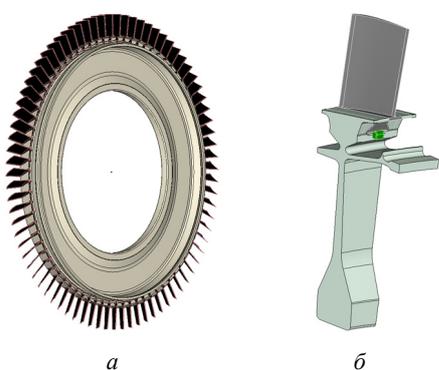


Рис. 2. Диск ГТД с лопатками: геометрия полная (а) и циклично-симметричный сектор (б)

ры которой максимально приближены к реальной ситуации. Поэтому модель сектора диска должна иметь все три компонента: собственно сектор, лопатку и ее фиксатор. Алгоритм построения такой геометрической модели на основе утвержденной конструкции (чертежей) достаточно полно описан в публикациях, например, в статье [13] на примере диска 2-й компрессорной ступени одного из серийных ГТД конструкции КБ “Прогресс”, Украина (рис. 2 б).

Цель работы

Предложить методику, учитывающую современное состояние расчетных программ и позволяющую с заданной точностью рассчитывать характеристики НДС дисков с лопатками на персональных компьютерах, а также представлять результаты в виде графиков типа “поверхность”.

Алгоритм создания конечно-элементной сетки модели

Конечно-элементная модель объекта создается на основе геометрической модели. Она должна

учесть, что лопатка удерживается исключительно диском, поэтому рассматриваемая краевая задача должна быть контактной. **Важно:** геометрическая модель крепежного элемента – пластины, должна иметь гарантированные зазоры (хотя бы 0.02 мм), чтобы при решении контактной задачи не возникали паразитные напряжения от ее “заклинивания”.

Так как плоскость симметрии паза (угол врезания) лопаточного замка обычно составляет 50–60 градусов относительно плоскости диска (см. рис. 3), то не всегда удается расположить отсекающие сектор плоскости таким образом, чтобы они не пересекали поверхности контакта, не подходили к ним слишком близко и чтобы эти плоскости включали в себя ось вращения диска (как на рис. 3 б). Поверхности отсечения могут иметь любую форму, в том числе – быть составными. Обязательное условие одно: идентичность при повороте на угол $\Delta\theta = 360/N$ градусов. Поэтому поверхность рассечения в виде плоскости – всего лишь удобный вариант.

Рассмотрели тот же диск, что и в статье [13], изображенный на рис. 2. Вновь реализовали “косой” вариант расположения отсекающих плоскостей (рис. 3 а), т.к. в “прямом” варианте (рис. 3 б) отсекающие плоскости слишком близко подходят к поверхностям контакта диск – лопатка.

Как следует из рис. 3, отсекающие плоскости в обоих случаях не являются плоскостями симметрии. Поэтому даже в случае рис. 3 б нельзя поступить традиционным для симметрии образом: всем узлам, лежащим на плоскости отсечения, запретить степень свободы в направлении нормали к этой поверхности. Естественный способ учета влияния отсеченной части диска на решение изложен в статье [13]. Во-первых, поверхности отсечения *A* и *B* (см. рис. 4 а) должны иметь абсолютно идентичное расположение узлов конечных элементов (КЭ), т.е. на этих поверхностях должны быть “пары узлов циклосимметрии” (ПУЦ), имеющих одинаковые радиальные и осевые координаты, а их окружные координаты θ должны отличаться на величину $\Delta\theta = 360/N$. Во-вторых, должно быть введено условие попарного равенства значений

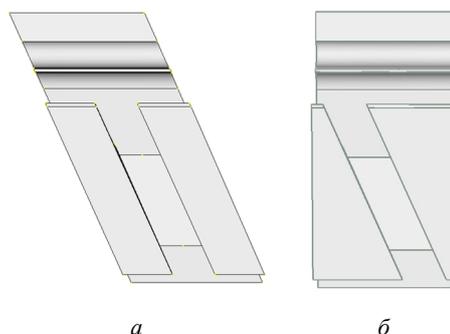


Рис. 3. Сектор Диска ГТД, вид со стороны лопатки (ось вращения – вертикально). Варианты расположения отсекающих плоскостей: “косой” (а) и “прямой” (б)

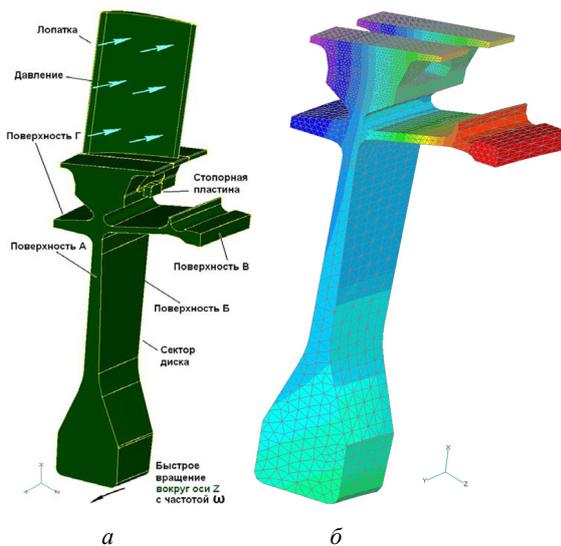


Рис. 4. Сектор диска ГТД (рисунки из статьи [13]): геометрия и схема нагружения (а), тетрагональная КЭ сетка (б)

всех трех перемещений в ПУЦ, и тоже в цилиндрической системе координат (ЦСК). Причина таких действий проста: поверхность *В* для данного сектора является поверхностью *А* для следующего сектора.

Как оказалось, на момент написания статьи [13] выполнить первое требование было проблемой: автоматический построитель трехмерной КЭС в FEMAP не мог создать идентичные сетки на указанных поверхностях. Поэтому в статье [13] применили такой алгоритм: сначала создавали двумерную треугольную сетку на стороне *А* и копировали ее на сторону *В*, затем покрывали все остальные поверхности модели двумерными треугольными КЭ, при этом на ребрах узлы сеток должны были совпадать. Модель передавали в среду HyperMesh, которая на основе замкнутой треугольной поверхностной сетки создавала трехмерную сетку из симплексных КЭ (тетрагональных КЭ первого порядка аппроксимации), не меняя уже имеющуюся поверхностную сетку. После возвращения уже трехмерной КЭС в FEMAP операцией модификации вводили в КЭ промежуточные узлы, т.е. КЭ получали второй порядок аппроксимации, но на тот момент FEMAP не выводил вновь созданные узлы на наружные поверхности модели, т.е. огранка на криволинейных поверхностях сохранялась.

В данной статье предлагается другой алгоритм, не имеющий описанных недостатков.

Дело в том, что в среде FEMAP/Nastran качественно реализовано “склеивание” (Glued) трехмерных КЭС, в том числе и сильно отличающихся друг от друга. Это позволяет моделировать объект не согласованными блоками КЭС, затем “склеивать” блоки воедино и получать решение с достаточной точностью. Кроме упрощения процесса создания КЭС есть еще одно важное обстоятельство: гораздо легче в ак-

туальных частях объекта создавать мелкую или очень мелкую сетку, в остальных – более грубую, и тем самым экономить на вычислительных ресурсах. Такое “склеивание” было с успехом использовано, например, при уточненном моделировании болтового соединения многослойной композиционной пластины [14, 15].

Паз лопаточного замка, особенно острый угол выхода его на торец обода, создает вокруг себя зоны концентрации напряжений, что сказывается на снижении ресурса диска. Поэтому при построении КЭС большое внимание необходимо уделить зоне лопаточного замка, в том числе аппроксимации поверхностей контакта диск–лопатка для уточненного анализа распределения контактных усилий на них. Возможность без проблем “склеивать” несогласованные трехмерные КЭС значительно упрощает выполнение этой задачи. Однако при этом важно учитывать, что близкое расположение поверхности “склеивания” к зоне концентрации напряжений может исказить результаты решения краевой задачи. Поэтому “косой” (рис. 3 а) вариант плоскостей отсечений обычно оказывается предпочтительнее “прямоуго” (рис. 3 б), что и было учтено.

Реализовали такой алгоритм построения трехмерной КЭС:

1. На поверхности *А* сектора диска (рис. 4 а) создали поверхностную КЭС нужной плотности из четырехугольных КЭ 2-го порядка аппроксимации (рис. 5 а);
2. Из КЭС поверхности *А* операцией выдавливания КЭ при вращении (**Mesh→Revolve→Element...**) на небольшой угол $\delta\theta$ вокруг оси *Z* создали блок №1 трехмерной КЭС (реализовали угол $\delta\theta=0.5$ градусов, 3 слоя КЭ, рис.5 б);
3. Операцией вращения КЭ (**Mesh→Rotate→Element...**) на угол $(360/N - \delta\theta)$ градусов создали копию КЭС блока №1, т.е. создали блок №2 КЭС (рис. 5 в). Тем самым получили абсолютно одинаковое расположение узлов КЭС (рис. 5 в) на поверхностях *А* и *В* (рис. 4 а);

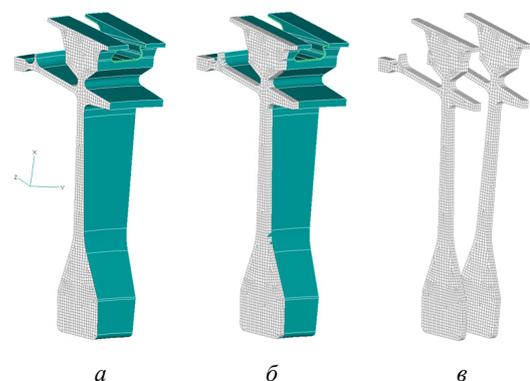


Рис. 5. Создание первых двух блоков КЭС диска: поверхностная КЭС (а); блок №1 гексагональной КЭС (б); блоки №1 и №2 гексагональной КЭС (в)

4. Операцией расщепления тела (**Geometry**→**→Solid**→**→Slice...**) отсекали от модели сектора диска части, соответствующие блокам КЭС № 1 и № 2, для удобства дальнейшей работы поместили их в новые слои изображений (**Modify**→**Layer**→**...**);

5. Операцию **Modify**→**Association**→**Automatic...** провели ассоциацию КЭС блоков № 1 и № 2 с соответствующей им геометрией (необходимо, чтобы в дальнейшем приложить граничные условия, а также назначить места “склеивания” отдельных блоков путем указания геометрических поверхностей);

6. Оставшуюся часть сектора диска разделили на две части с помощью построения дополнительного тела при вращении (вокруг оси Z), которое позволит с помощью операций логического вычитания отделить от этой части верхнюю часть (блок № 3), тем самым получить блок геометрии №4 (рис. 6 а);

7. Построили КЭС в блоке №4 и блоке № 3, причем значительно сгустили сетку на поверхностях контакта диска с лопаткой. В FEMAP делали предварительную разметку, давали команду **Mesh**→**→Geometry**→**→Solids**, на появившейся панели выбирали Property – Solid, активировали опцию **Midside Nodes**, с помощью кнопки Options ... устанавливали опцию **Midside Nodes on Surfaces**.

На рис. 6 б показана полученная КЭС сектора диска, содержащая около 230 тыс. узлов и 124 тыс. КЭ 2-го порядка аппроксимации, в которой КЭС на поверхностях A и B идентичны.

КЭС лопатки и крепежной пластины создавали автоматически на основе геометрии. Важно: размеры пластины должны обеспечить гарантированные монтажные зазоры с лопаткой и диском, иначе паразитное зажатие пластины вызовет значительные контактные усилия и напряжения.

Созданная КЭС всей модели содержала около 340 тыс. узлов и 170 тыс. КЭ 2-го порядка аппроксимации.

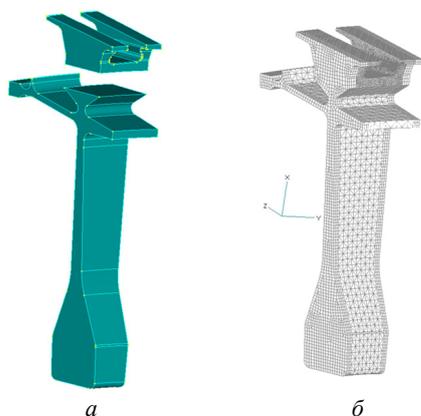


Рис. 6. Геометрические блоки диска № 3 (как бы “приподнят”) и № 4 (а); полная КЭС сектора диска (б)

Задание граничных условий

Осталось задать условия нагружения и наложить ограничения (граничные условия, ГУ).

Вначале рассмотрим условия нагружения.

Во-первых, диск быстро вращается относительно оси Z . Это вызывает распределенную по объему всей модели центробежную силу, зависящую от плотности материала, угловой скорости вращения и расстояния актуальной точки от оси Z . Это ГУ задается для всего объекта (**Model**→**Load**→**Body...**) через количество оборотов в секунду. Плотность материала задается в свойствах материала.

Во-вторых, лопатка компрессора захватывает поток воздуха и гонит его далее по проточной части ГТД. Возникает перепад давления между передней (активной) и задней поверхностями лопатки. Так как перо лопатки – тонкая пластинка, то можно задавать давление лишь на активной поверхности лопатки, а именно – величину перепада давления. Наличие решетки стационарных лопаток, не позволяющих закрутиться потоку воздуха, вызывает цикличность величины давления: есть минимум и максимум, коэффициент асимметрии цикла – положительный и близок к единице. В проверочных стационарных расчетах есть смысл задавать максимальное значение. Если цель расчетов – анализ характеристик НДС диска (данный случай), а не лопатки, то можно задавать давление на пере лопатки равномерно распределенным.

Кроме того, давление действует на верхнюю поверхность диска и даже на поверхности лопаточного замка (воздух проникает через зазоры), однако весьма незначительно влияет на характеристики НДС диска, и им можно пренебречь.

В-третьих, диск второй ступени компрессора транзитом передает крутящий момент (**Torque**, T). Очевидно, что чем меньше площадь сечения, через который он передается (тут – поверхностей B и Γ , рис. 4 а), тем равномернее распределение результирующей силы, создающей момент. Поэтому для приложения этой силы выбрали поверхность Γ (рис. 4 а). Величину результирующей силы определили как $F = T / (NR_m)$, а распределенной по поверхности – как $f = F / A = T / (NAR_m)$, где R_m – средний радиус поверхности Γ ; A – площадь поверхности Γ . Полученное значение f приложили ко всем частям поверхности Γ как **Force Per Area** в направлении окружной координаты, т.е. в ЦСК.

В-четвертых, температурная нагрузка. Цитата из [13]: “Если рассматривается диск компрессора, то температура потока соответствует температуре воздуха за бортом самолета (примерно от + 50 до – 60 градусов Цельсия, в зависимости от географической широты, времени года и высоты). Для турбины температура потока соответствует температуре сгоревшего топлива.” Очевидно, что в проверочных расчетах задавать

нужно предельные значения: начальную и рабочую температуры.

Поскольку рассматриваем постоянный режим полета, то можно решать задачу стационарной теплопроводности. Естественно, что в этом случае в результате проведенного расчета перо лопатки и верхняя часть обода диска будет иметь температуру, близкую к температуре среды T_∞ . Если есть сведения о температуре внутри ротора, то ее можно задать на диске и решить задачу стационарной теплопроводности только для диска. В крайнем случае, для диска компрессора задачу стационарной теплопроводности системы диск – лопатка – пластина можно не решать, а назначить во всех узлах СЕС системы текущую температуру (как нагрузку), равную T_∞ .

Рассмотрим ограничения в перемещениях.

Во-первых, необходимо ввести ограничения, моделирующие отсеченную часть диска, т.е. условия циклической симметрии.

Как описано выше, на отсекающих поверхностях A и B в созданной КЭС предусмотрены “пары узлов циклосимметрии” – ПУЦ, имеющие одинаковые радиальные и осевые координаты, а их окружные координаты θ отличаются на величину $\Delta\theta = 360/N$. В этих ПУЦ перемещения в ЦСК должны быть одинаковы.

При введении таких условий выявлена проблема. Цитата из [13]: “Для связывания искомым значений в узлах обычно в программных комплексах предусмотрен диалог введения формульной связи

$$a_n \cdot (U_i(r, \theta, Z))_n + a_m \cdot (U_i(r, \theta + \Delta\theta, Z))_m = 0, \quad (1)$$

где n и m – номера узлов из списка ПУЦ; $i = 1, 2, 3$ – номера координатных осей. Для приравнивания значений перемещений достаточно назначить коэффициенты $a_n = -a_m$.

Каждое из таких уравнений вводится индивидуально. Если в узле связывать три перемещения в своих направлениях, то для сотен узлов такая работа чрезвычайно обременительна.”

И хотя в последней версии FEMAP все три направления для ПУЦ объединены в одном диалоге (см. рис. 7), ситуация изменилась мало по сравнению с предыдущей [16].

Для решения проблемы в [13] предложили задействовать формат **.neu** сохранения всей модели, используемый пре- пост- процессором FEMAP. В **.neu** информация о координатах узлов и о связях узлов из списка ПУЦ по формуле (1) имеет текстовый формат, что позволяет редактировать файл **.neu** в текстовом редакторе, например, **Блокнот** (из состава операционной системы). Была создана программа с названием **Symmetry**, формирующая нужный формат записи формулы (1) для файла **.neu** при $a_n = -a_m = 1$.

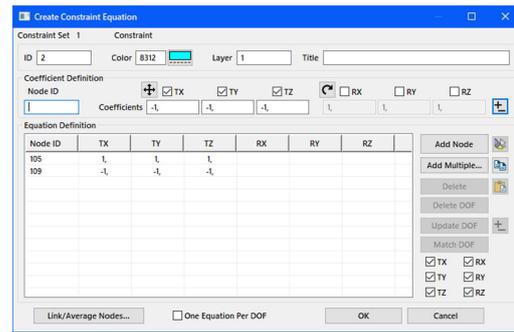


Рис. 7. Интерфейс введения связей перемещений ПУЦ сразу по трем направлениям

Однако со времени написания статьи [13] появились некоторые изменения в формате **.neu** (формат описан в файле **neutral.pdf** из Help программы [17]). К тому же в статье [13] методика описана не была. Поэтому опишем работу с данными подробнее и с учетом изменений.

В формате **.neu** вся информация дается блоками конкретного назначения. Каждый блок оформляется так, как показано на рис. 8 а, где K – номер блока, а перед знаками маркировки начала и конца блока, т.е. перед -1 , а также перед его номером – по три пробела. Содержимое блока записано строками, без пробелов и через запятые.

Блок с координатами узлов модели имеет номер 403. Характерное его заполнение показано на рис. 8 б.

В строках с содержимым блока запятые отделяют позиции, в которых указаны характерные для узлов КЭ значения. Из этих строк программе **Symmetry** необходимы лишь такие значения:

- позиция 1: номер узла;
- позиции 12, 13 и 14 – координаты X, Y, Z узла.

Важно: программа FEMAP в формате **.neu** выводит координаты узлов только в декартовой системе координат, независимо от того, в какой системе они вводились в FEMAP.

```
-1
K
содержимое блока
-1
```

а

```
-1
403
1,1,0,2,46,0,0,0,0,0,0,198.758357501,-22.8201428111,-5.25,0, 0,
2,1,0,2,46,0,0,0,0,0,0,200.126686861,-22.9996827116,-5.25,0, 0,
3,1,0,2,46,0,0,0,0,0,0,200.317364309,-21.6429398093,-5.25,0, 0,
.....
-1
```

б

Рис. 8. Форматы блоков файла **.neu**: общий (а) и координат узлов (б)

Дело в том, что на стыках поверхностей A с B и B с V располагаются узлы, которые попали бы в два списка: *во-первых*, узлов с заданными условиями циклической симметрии, *во-вторых* – с закреплением по направлениям осей θ и Z . Как выяснилось, это – конфликт, который затем в NASTRAN приведет к неверному решению (фатальной ошибке). Приоритет отдаем второму условию: закреплениям этих узлов по направлениям осей θ и Z . Именно поэтому в диалоговой панели, изображенной на рис. 11 введено исключение: в узлах пар циклической симметрии, имеющих заданную координату (а это должна быть координата Z узлов на стыках поверхностей A с B и B с V , условие циклической симметрии будет задаваться только по координате R . Почти аналогичная ситуация с узлами на стыках поверхностей A с G и B с G , только здесь должно быть исключение только по координате Z .

Осталось рассмотреть *третий* набор ограничений: контактные ограничения.

Контактные граничные условия в FEMAP можно задавать, используя геометрические элементы модели, а именно поверхности, которые могут вступить в контакт, или которые не дадут телам в процессе итерационного поиска зон контакта “потерять друг друга”.

Для этого сначала необходимо использовать команду **Connect**→**Automatic...**. Выбираются все тела, участвующие в контактных взаимодействиях (диск, лопатка, пластина), появляется диалоговая панель, на которой указываются допуски на захват (зазоры – в мм и перекосы – в градусах), а также тип свойств создаваемой модели: **Contact**. В автоматическом режиме будет создана модель контакта тел. Ее необходимо отредактировать.

Во-первых, полезно “привязать” названия к объектам (рис. 12). *Во-вторых*, создать в **Properties** два новых “свойства”: **2..Glued** и **3..Contact Blade-PI**. В **1..Contact** на вкладке **Linear** есть смысл расширить диапазон поиска контактных поверхностей при их деформировании: ввести в поле **Min Contact Search Dist** небольшое отрицательное значение. Еще есть смысл в поле **Max Status Iterations** увеличить количество итераций до получения заданной **Force Convergence Tol** точности в 0.01 (по умолчанию – 20). Уточнять точность есть смысл только после отработки модели. Так как контактное соединение работает в условиях вибрации (от лопатки), то трение будет вибрацией частично “сниматься”, но коэффициент трения в контактной паре “диск – лопатка” задавать нулевым нежелательно. В **3..Contact Blade – PI** достаточно ввести коэффициент трения контактной пары “лопатка – пластина”.

В-третьих, в **Connectors** для “склеенных” контактных пар (на рис. 12 – в **3.. – 7..**) нужно поменять **Properties** с **1..Contact** на **2..Glued**, а в **2.. –** на **3..Contact Blade – PI**.

На рис. 12 приведен окончательный вид части информационной панели **Model Info**.

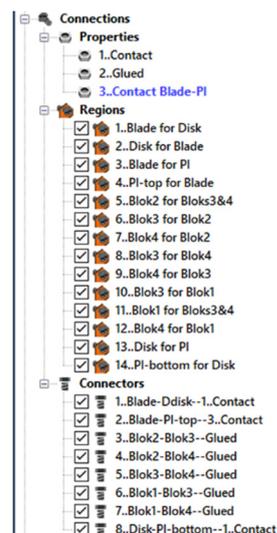


Рис. 12. Контактные ограничения (часть информационной панели **Model Info**)

Как показали опыты расчетов, сначала удовлетворительного результата может не получиться, поскольку в итерационном процессе решения контактной задачи алгоритм Nastran может потерять часть зоны контакта лопатки с диском и лопатки с пластиной. Для исправления ситуации оказалось достаточно ввести в возможные пары контакта еще несколько поверхностей. Для этого на панели **Model Info** в соответствующем поле **Regions** давали команду **Edit** и, при их отсутствии, добавляли (на рис. 12 в **1.. – 4..** и **14..**) в перечень геометрических поверхностей контактного региона поверхности, которые формально в контакте не участвуют (есть гарантированный зазор). Пример – на рис. 13.

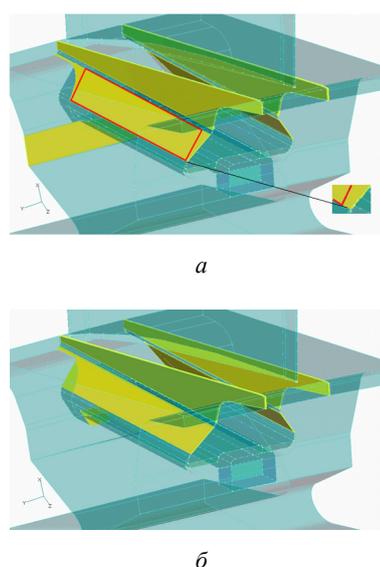


Рис. 13. Поверхности возможного контакта системы диск – лопатка в: диске (*а*); лопатке (*б*)

Проведение расчетов

В Femap/Nastran тип краевой задачи задавали как Static. Использовали ПК с такими параметрами: процессор i5-6500, накопитель HDD 1Тб Sata 7200 RPM, память DDR4 64 Гб 2133 МГц.

Для достижения заданной точности решения в 1%, описанная модель диска с лопатками использовала от 11 до 26 контактных итераций: больше коэффициент трения системы “диск – лопатка” – больше итераций. Время счета: от часа до 2.5 часов соответственно. Реально задействовалось до 24 Гб оперативной памяти.

Результаты расчетов и их обработка

Анимация по полным перемещениям (рис. 14 а) показывает, что контактная сторона модели задана правильно: все объекты находятся на ожидаемых местах, полные перемещения составляют доли мм.

На рис. 14 б видна концентрация интенсивности напряжений в лопаточном замке, увеличивающаяся в сторону острого угла выхода паза на торец обода. Это согласуется с общепризнанными данными [1].

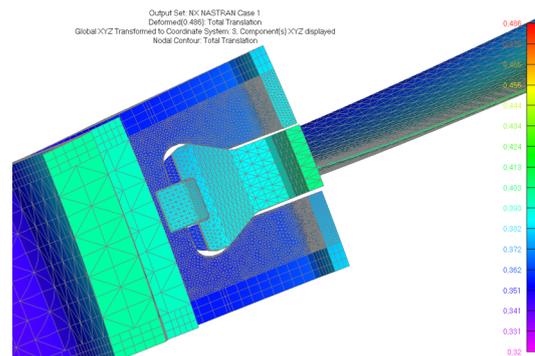
Кроме общей оценки НДС диска с лопатками, выполняемой стандартным образом, интерес представляет распределение контактных усилий в лопаточном замке. При этом кроме анализа цветовой гаммы контурного изображения усилий желательно иметь трехмерные графики, например, контактных усилий на поверхностях контакта диска (или лопатки). При расчетах в среде Femap/Nastran это оказалось проблемой, т.к. в ней нет возможности построить графики в виде поверхности.

Для построения трехмерных графиков контактных усилий на поверхностях контакта диска (или лопатки) необходимо задать в этих поверхностях локальные системы координат, чтобы выводить результаты (прежде всего – значения контактных усилий в узлах) в этих координатных системах.

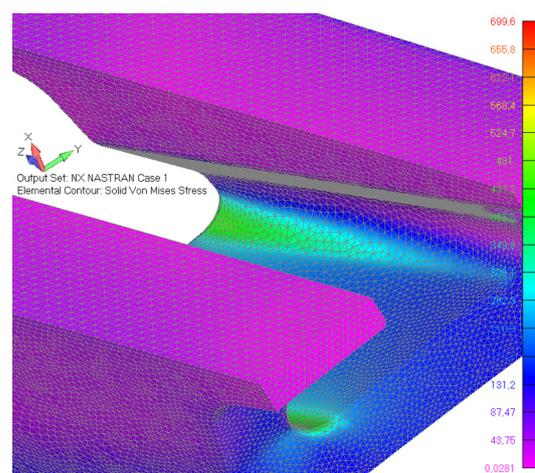
Аналогично можно поступить и на других плоских поверхностях.

Но для построения графика любой функции (F) в виде поверхности нужны не столбцы данных, а прямоугольная таблица значений функции F , причем: строки – вдоль оси X с *регулярным* шагом, и каждая новая строка – для очередного значения координаты Y и тоже с *аналогичным* шагом.

Поэтому кроме локальной координатной системы нужно создавать трехмерную конечно-элементную сетку с выходом ее узлов на контактную поверхность в виде регулярной сетки, причем размеры КЭ можно (тоже регулярно) сгущать к краям этой поверхности. Это достаточно просто сделать, если перед созданием сетки на будущей поверхности контакта выделить ее прямоугольную часть. Такую, как показанная на рис. 13 а контуром красного цвета (она



а



б

Рис. 14. Результаты решения: полные перемещения, мм, при анимации (а); концентрация интенсивности напряжений σ_{Mises} , МПа, на радиусном переходе в лопаточном замке (б)

же – на рис. 15 а). Важно не создавать при этом рядом поверхности с острыми входящими углами: достаточно отступить на небольшое расстояние (на тех же рисунках).

И еще нужна программа, которая сформирует указанную прямоугольную таблицу, используя узловые значения из узлов с регулярным расположением на поверхности. Очевидно, что построение такой таблицы из результатов на нерегулярной сетке было бы затруднено и приводило бы к сглаживанию поверхности графика.

Отработали такой алгоритм построения трехмерных графиков контактных усилий на поверхностях контакта (КЭ расчеты – в среде Femap/Nastran):

- в среде Femap отделили на контактной плоскости ее прямоугольную часть, как показано на рис. 13 а. На ней сделали разметку, которая позволила получить на этой части поверхности регулярное расположение узлов (рис. 15 а);

- позиционировали рабочую плоскость (**Work-plane**) на отделенной прямоугольной части контактной

ной плоскости в замке диска (рис. 13 а), направив локальную ось X вдоль длинной прямой границы поверхности контакта;

- создали локальную координатную систему в рабочей плоскости. При этом ее координата Z автоматически перпендикулярна плоскости контакта, а ось X направлена вдоль оси X рабочей плоскости;

- создали группу (**Group**), в которую поместили номера узлов поверхности контакта (УПК) прямоугольной ее части;

- с помощью команды **Tools**→**Parameters...** поменяли в списке **Coord Sys** координатную систему (КС) на созданную локальную. **Важно:** в назначенной КС будут выполняться все последующие действия с геометрическими объектами;

- с помощью команды **Modify**→**Update Other**→**Node Definition CSys** поменяли координатную систему для УПК на созданную локальную КС;

- пересчитали (**Model**→**Output**→**Process...**→**Convert**→**Select Output to Process**) эквивалентные напряжения (можно и любые другие) в узлы из группы УПК;

- создали (**Model**→**Output**→**Vector...**→**New Vector...**) вектор X в выходном наборе данных. Заполнили его (**Model**→**Output**→**Fill...**) значением координаты X для УПК (функцию **xnd(!i)**);

- аналогично создали вектор Y в выходном наборе данных и заполнили его значением координаты Y для УПК (функцией **ynd(!i)**);

- с помощью панели инструментов **Panes** вызвали диалоговую панель **Data Table**;

- дали команду (**List**→**Output**→**Results to Data Table...**) заполнения таблицы локальными координатами X и Y УПК (векторы X и Y), контактных усилий (вектор **225..Contact Pressure**) и эквивалентных напряжений (вектор **90000..Avg – Converted Vec 60031**) в них. В таблицу столбцами была помещена, кроме выбранной, еще и излишняя информация. Эти столбцы можно скрыть с помощью команды **Show/Hide Columns** или просто в дальнейшем проигнорировать;

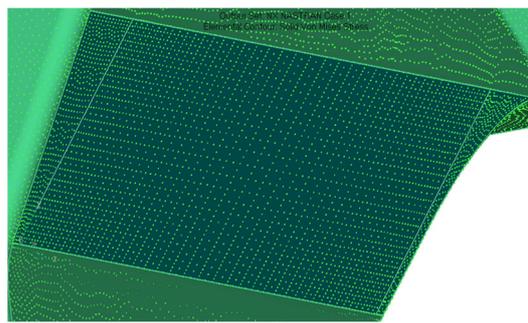
- передали (варианты **Copy to Clipboard** или **Save to a File**) полученную таблицу в текстовый редактор, провели контекстную замену запятых на точки (в C++ разделитель целой и дробной части в вещественных числах – точка), потом аналогично заменили табуляторы – разделители на запятые, сохранили в файл;

- с помощью специально созданной программы (**Tables**) преобразовали таблицу из формата столбцов в двумерный формат, причем значения в центрах сторон КЭ, выходящих на поверхность контакта (см. рис. 15 а), получили как среднее из значений в восьми поверхностных узлах каждого актуального КЭ. Таблицы записали в текстовые файлы отдельно: таблица контактных усилий и таблица эквивалентных напряжений. В них разделители – пробелы. **Важно:** как показано на рис. 15 б, кроме данных актуальной функ-

ции, таблица должна содержать столбец и строку (первые числовые) с координатами узлов;

- в Excel версии до 2007 года поменяли разделитель целой и дробной части вещественных чисел на точку (**Сервис**→**Параметры**→**Международные**);

- в Excel считали созданную двумерную таблицу (каждую таблицу – отдельно) с помощью команды **Данные**→**Импорт внешних данных**→**Импортировать данные** – в Excel версии до 2007, или **Данные**→**Из текста** – в Excel версии 2007 (с разделителями – пробелами). В Excel версии 2007 года при импорте на шаге 3 инициировали кнопку “**Подробнее...**”



а

The 2D table of forces (pressure) on a rectangular surface of contact

X	Y				
0	0.00000	0.07845	0.15690	0.24002	0.32313
2.51769	523.38020	528.64400	191.04600	217.35820	0.00000
2.48147	266.82610	272.13869	169.01820	142.52412	34.87162
2.44524	149.66110	133.68890	214.84500	96.61731	216.43660
2.40666	172.77260	120.72031	170.34820	158.77625	192.57390
2.36808	34.39775	38.07892	51.96997	112.85540	214.56360

б

Рис. 15. Прямоугольная часть контактной поверхности с регулярной КЭ сеткой (а); часть двумерной таблицы с контактными усилиями (б)

и поменяли разделитель целой и дробной части вещественных чисел на точку. Назначили всем ячейкам с числами “числовой” формат данных (не обязательная операция, лишь улучшающая читабельность данных);

- очистили ячейку, что под буквой X на рис. 15 б. Выделили все ячейки с числовыми данными (в том числе и пустую под буквой X на рис. 15 б), дали команду на построение графика типа **Поверхность**. Первые строку и столбец Excel принял за координаты, для чего и очищалась ячейка.

Описанный алгоритм был реализован в виде макроса в Femap и программы **Tables** (операции в Excel не программировали). В качестве примера, на рис. 16 показаны полученные в Excel 2003 результаты графики на контактной поверхности лопаточного замка, расположенной со стороны рабочей поверхности лопатки. На них $X \in [0, 11.48]$ мм и $Y \in [0, 2.52]$ мм. В контактной паре “диск – лопатка” коэффициент трения задавали равным 0.1.

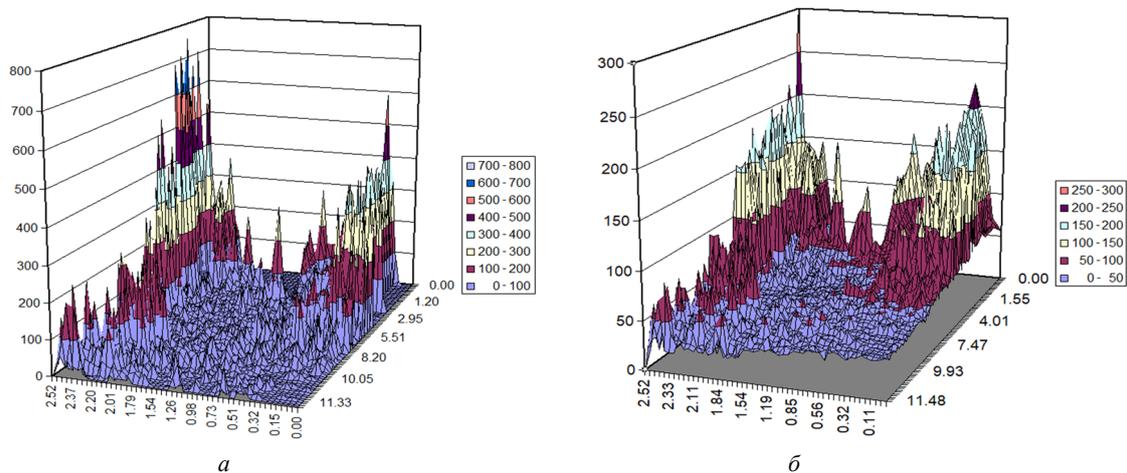


Рис. 16. Значения контактных усилий, Н (а) и эквивалентных напряжений, МПа (б) в узлах на контактной поверхности лопаточного замка

Выводы

По результатам работы можно сделать такие выводы:

1. Подробно описанная методика подготовки уточненных расчетов дисков авиационных двигателей со съемными лопатками методом конечных элементов в трехмерной постановке в среде Femap/Nastran позволяет получить результаты с хорошей точностью на относительно небольших компьютерных мощностях.

2. Подробно описанная методика построения графика типа “Поверхность” позволяет вместо цвето-

вой картины получить рельефную поверхность распределения выбранных функций на основной (прямоугольной) части зоны контакта лопаточного замка в диске.

3. Результаты проведенных расчетов показали, что распределение контактных усилий в контактной паре “диск – лопатка” весьма неравномерно в обоих направлениях.

При варьировании рабочих параметров облопаченного диска наблюдали значительные изменения в распределении контактных усилий в контактной паре “диск – лопатка”, для изучения которых необходим дополнительный комплекс исследований.

References

- [1] N.G. Burago, A.B. Zhuravlev, I.S. Nikitin, “The analysis of a state of stress of contact system “disc-blades” of the gas-turbine engine”, *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*, vol. 4, no. 2, pp. 5–16, 2011. doi: 10.7242/1999-6691/2011.4.2.11
- [2] I.A. Birger, *Raschet na prochnost' aviatsionnykh GTD*. Moscow, Russia, Mashinostroenie, 1984
- [3] Y Nakamura, S. Takakhasi, “The analysis of stresses arising under the influence of centrifugal forces in type connection “a tail of a swallow”, *Nihon kikai gakkai rombunshu*, t. A51, no. 466, pp.1620–1630, 1985.
- [4] D.V. Khronin, *Design and designing of air gas-turbine engines*, Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1989.
- [5] G.S. Skubachevskii, *Aviatsionnye gazoturbinnye dvigateli, konstruktsiya i raschet detalei*. 8-e izd. [Aviation gas-turbine engines, design and calculation of details. 8 ed.], Mashinostroenie, Moscow, Russia. 1996.
- [6] Yu.S. Vorob'ev, “Problems of the numerical analysis of rotor machines with blades”, in Proc. *Dinamika rotornykh system*, Kamenets-Podol'skii, 1996, Ukraine, pp. 89 – 91.
- [7] A.A. Inozemtsev, V.L. Sandratskii, *Gazoturbinnye dvigateli* [Gas-turbine engines], OAO “Aviadvigatel”, Perm', Russia, 2006.
- [8] V.P. Danil'chenko et al., *Proektirovanie aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei. Monografiya* [Designing of air gas-turbine engines. The monography], SPTs RAN, Samara, Russia, 2008.
- [9] M.P. Boyce, “Gas turbine engineering handbook”, *Butterworth-Heinemann*, Elsevier, Amsterdam, Boston, XXXIV, 2012
- [10] T.O. Vale, G.C. Villar, J.C. Menezes, “Methodology for Structural Integrity Analysis of Gas Turbine Blades”, *Journal of Aerospace Technology and Management*, no. 4 (1), pp. 51–60, 2012. doi: 10.5028/jatm.2012.04014311
- [11] L. Witek, “Numerical simulation of fatigue fracture of the turbine disc”, *Fatigue of Aircraft Structures*, vol.1, pp. 114–122, 2013. doi: 10.2478/v10164-012-0063-4
- [12] V.S. Chigrin, *Konstruktsiya i prochnost' aviatsionnykh dvigatelei* [Design and strength of aero-engines], AO “Motor Sich”, KhAI, Zaporozh'e, Khar'kov, Ukraine, 2017.

- [13] K.N. Rudakov and Shakib Khamed, “Razrabotka metodiki raschetov diskov gazoturbinykh dvigatelei metodom konechnykh elementov v trekhmernoi postanovke” [Working out of a technique of calculations of discs of gas-turbine engines by a method of finite-elements in three-dimensional statement], *Vestnik NTUU “KPI”. Serija mashinostroenie*, no.53, pp. 88–95, 2008.
- [14] K. Rudakov and A. Shandura, “Chisel'ne obruntuvannya zastosuvannya zmishanikh 3D-modelei PKM pri rozrakhunkakh boltovykh z'ednan'” [Numerical Ground of Application of mixed 3D-Modelley Composites at Computations of Bolted Joints], *Journal of Mechanical Engineering NTUU “Kyiv Polytechnic Institute”*, no. 2(74), pp. 67–76. 2015.
- [15] Y.N. Dyfuchyn, and K.N. Rudakov, “Chisel'ne modelyuvannya boltovykh z'ednan' z PKM. Povidomlennya 1. Stvorennya zmishanikh 3D-modelei” [Numerical Modelling of Bolted Joints from Composite. The Message 1. Creation of the Mixed 3D-Models], *Journal of Mechanical Engineering NTUU “Kyiv Polytechnic Institute”*, no. 2(77), pp. 100–107, 2016. doi: 10.20535/2305-9001.2016.77.76975.
- [16] K.N. Rudakov, *FEMAP 10.2.0. Geometricheskoe i konechno-elementnoe modelirovanie konstruktzii* [FEMAP 10.2.0. Geometrical and FEM of designs], Kyiv, Ukraine, 2011. [Online]. Available: <http://www.cad.dp.ua/stats/FEMAP-102.php>
- [17] *Neutral.pdf*. [Online]. Available: <https://vdocuments.mx/femap-neutral-file-format.html>.

Procedure of the updated calculations of disks of aero – engines with removable blades a finite element method in three – dimensional statement in the environment of Femap/Nastran

Konstantin Rudakov

Problematic. At adaptation of a design of discs of rotor of air gas-turbine drives (GTD) it is necessary to conduct, in particular, strength calculations for what to create the computer models corresponding to stated designs (delineations) and operation conditions. If creation of a geometrical part of model does not call special difficulties the algorithm of creation of an is finite-element grid models for carrying out of calculations of performances of the disc stress-strain conditions (SSC) with blades can be modified taking into account development of programs for calculate.

Purpose of the study. To offer the algorithms allowing with the set exactitude to calculate performance of the SSC of discs with blades on personal computers, and also to represent outcomes in the form of schedules of type “surface”.

Implementation methodology. On an example of the disc of 2nd stage of the compressor of GTD the algorithm of construction of a three-dimensional is finite-element grid of the disc of GTD from the separate blocks which have been “pasted together” in a unified grid has been created. Numerical calculations (a contact problem of thermoelasticity, isotropic materials) are carried out. For preparation of construction of schedules of type “surface” the interface program of transformation of the table of columns in the two – dimensional table is created.

Research results. Are created and explicitly techniques of reaching of research objectives are described.

Conclusions. The created techniques allow to carry out on the limited computer powers exact enough control calculations of discs with blades in three – dimensional statement, to conduct visualisation of distribution of stresses and contact forces of a zone of a contact “disc-blades” in the form of schedules of type “surface”.

Keywords: the aircraft engine disc; rated model; a contact problem; stress concentration; a technique.

Методика уточнених розрахунків дисків авіаційних двигунів зі знімними лопатками методом кінцевих елементів у тривимірній постановці в середовищі Femap/Nastran

К. М. Рудаков

Проблематика. При доробці конструкції дисків роторів авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) необхідно, зокрема, проводити розрахунки міцності, для чого створювати комп'ютерні моделі, що відповідають затвердженим конструкціям (кресленням) й умовам експлуатації. Алгоритм створення скінченно-елементної сітки моделі для проведення розрахунків характеристик напружено-деформованого стану (НДС) диска з лопатками необхідно модифікувати з урахуванням розвитку розрахункових програм.

Ціль дослідження. Запропонувати алгоритми, що дозволяють із заданою точністю розраховувати характеристики НДС дисків з лопатками на персональних комп'ютерах, а також представляти результати у вигляді графіків типу “поверхня”.

Методика реалізації. На прикладі диска 2-го ступеня компресора ГТД було створено алгоритм побудови тривимірної скінченно-елементної сітки диска ГТД із окремих блоків, “склеєних” у єдину сітку. Проведено чисельні розрахунки (контактна задача термопружності, ізотропні матеріали). Для підготовки побудови графіків типу “поверхня” створена інтерфейсна програма перетворення таблиці зі стовпців у двовимірну таблицю.

Результати дослідження. Створено й докладно описані методики досягнення цілей дослідження.

Висновки. Створені методики дозволяють на обмежених комп'ютерних потужностях проводити достатньо точні перевірочні розрахунки дисків ГТД з лопатками у тривимірній постановці, провести візуалізацію розподілу напружень і контактних зусиль зони контакту “диск – лопатка” у вигляді графіків типу “поверхня”.

Ключові слова: диск авіадвигуна; розрахункова модель; контактна задача; концентрація напружень; методика.