

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(национальный исследовательский университет)»

**Моделирование процесса термоупругих деформаций  
заготовок методом конечных элементов  
в программном комплексе ANSYS**

Электронные методические указания  
к лабораторной работе

САМАРА  
2010

**Составители:** ИВЧЕНКО Алексей Викторович  
НЕХОРОШЕВ Максим Владимирович  
ПРОНИЧЕВ Николай Дмитриевич  
РАМЗАЕВА Елена Анатольевна  
СМЕЛОВ Виталий Геннадьевич  
СМИРНОВ Геннадий Владиславович

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по специальности: 160301 «Авиационные двигатели и энергетические установки», изучающих курсы: «Технология производства АД и ЭУ», «Технология машиностроения», «Технологические методы обеспечения надежности деталей ГТД», «Информационные технологии», и в рамках магистерской программы «Интегрированные информационные технологии в авиадвигателестроении» по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов».

Методические указания разработаны на кафедре производства двигателей летательных аппаратов.

**© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2010**

## Содержание

<i>Введение</i> .....	4
<b>ЗАДАНИЕ</b> .....	12
<b>ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ</b> .....	12
<b>ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ</b> .....	12
<b>1. Импорт модели лопатки</b> .....	12
<b>2. Разбиение объема лопатки</b> .....	13
<b>3. Разбиение модели лопатки на конечные элементы (наложение сеток)</b> .....	15
<b>4. Проведение стационарного теплового анализа</b> .....	17
<b>5. Проведение структурного анализа</b> .....	23
<b>6. Построение графиков деформации пера лопатки</b> .....	26
<b>7. Самостоятельная работа</b> .....	30
<i>Контрольные вопросы</i> .....	31
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</b> .....	32
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1</b> .....	33

Цель работы: определение величины и характера термоупругих деформаций в процессе электрохимической обработки рабочей лопатки компрессора из стали.

Для проведения расчётов используется модель лопатки компрессора двигателя НК14СТ – это рабочая лопатка первой ступени. Материал - сталь 13X11H2B2MФ. В процессе ЭХО лопатка базируется по замку и поджимается винтами по вспомогательной технологической прибыли, токоподвод осуществляется через замок лопатки. После закрепления осуществляется двусторонняя обработка пера лопатки с подвижными электродами.

### *Введение*

Электрофизические и электрохимические методы обработки составляют одно из направлений технического прогресса в современном машиностроении. Необходимость применения данных методов вызывается все возрастающим использованием во многих отраслях машиностроения жаропрочных, нержавеющей, магнитных и других сталей и сплавов. Обработка подобных материалов резанием ввиду особенностей химического состава, структуры, механических и теплофизических свойств, а также условий эксплуатации связана с рядом трудностей, малоэффективна, а в некоторых случаях невозможна.

В связи с этим применение в металлообрабатывающей промышленности электрофизических и электрохимических методов обработки непрерывно растёт. В ближайшие 5—10 лет из общего объема обработки механические способы составят 50%, электроэрозионные—10%, электролитическое шлифование—15%, электрохимическая обработка сложных поверхностей—25%.

В настоящее время все большее и большее распространение находит электрохимический метод размерной обработки деталей в проточном электролите (ЭХО). Обладая высокими технологическими возможностями, этот метод может быть успешно применен для формообразования деталей сложной формы, прошивки отверстий,

фасонных пазов и щелей, шлифования поверхностей деталей типа тел вращения, удаления заусенцев и других операций.

Электрохимический метод размерной обработки в проточном электролите был предложен советскими инженерами В. Н. Гусевым и Л. А. Рожковым в 1928 г.

С физической точки зрения в основе процесса размерной электрохимической обработки лежит явление анодного растворения. В период электролиза электроды рабочей ячейки подключаются к источнику постоянного тока (рис. 1). Отрицательный полюс источника, присоединенный к электроду, сдвигает его потенциал в отрицательную сторону вследствие увеличения концентрации электронов. Положительный полюс собирает электроны от подключенного к нему электрода (анода), что сдвигает его потенциал в положительную сторону. Такое отклонение потенциалов электродов от равновесных значений вызывает протекание электродных процессов: на катоде начинается восстановление катионов, на аноде — окисление металла.

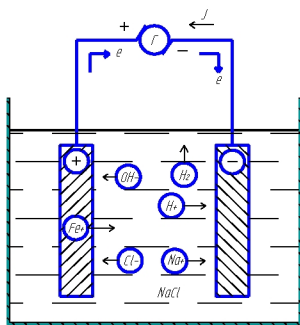
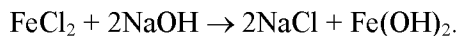


Рис.1. Схема электролиза

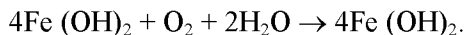
При электрохимической обработке стальных заготовок, например, в водном растворе NaCl процесс растворения материала анода протекает в следующей последовательности. Находящиеся в растворе ионы хлора, вступая в реакцию с железом, образуют хлористое железо.



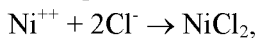
Хлористое железо далее вступает в реакцию со щелочью и образует хлористый натрий и гидрат закиси железа,



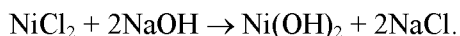
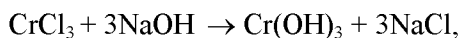
который под действием кислорода окружающей среды переходит в гидрат окиси железа и выпадает в нерастворимый осадок



При обработке никель-хромовых сплавов последовательность растворения металла аналогична. Ионы хлора увлекают в раствор катионы никеля и хрома с образованием хлористого никеля и хлористой соли трехвалентного хрома:



Здесь же в прианодном слое электролита диссоциированные соединения хлористого никеля и хрома вступают в реакцию со щелочью с выделением в осадок гидрата окиси хрома и гидрата закиси никеля:



Полученные гидраты окиси металлов соединяются в коллоидные частицы размером 0,1—10 *мкм* и располагаются вдоль анодной поверхности.

На катоде выделяется водород



Электрохимическая размерная обработка производится при малых расстояниях между электродами (0,2— 0,8 *мм*). Это позволяет осуществить копирование профиля катода (электрода-инструмента) на аноде (заготовке). Для повышенного съема металла с поверхности заготовки применяют большие плотности тока, которые могут достигать 10—100 *а/см<sup>2</sup>*. Между анодом и катодом для стабилизации электродных процессов и удаления продуктов растворения прокачивается электролит со скоростью 5—40 *м/сек*.

Процесс формообразования детали, происходит следующим образом. В начале обработки (рис. 2) участки профиля инструмента (катода) 1 расположенные на различных расстояниях от поверхности заготовки 2. От этих расстояний (зазоров) зависит величина тока, протекающего через каждый участок инструмента и соответствующий ему участок обрабатываемой поверхности заготовки. Чем больше ток,

тем выше скорость электрохимического растворения участка поверхности заготовки. В результате зазоры между электродами выравниваются, поверхность заготовки приобретает форму инструмента.

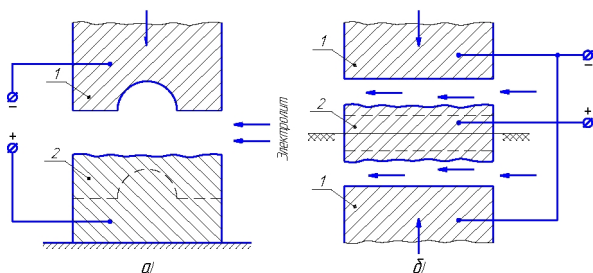


Рис. 2. Принципиальная схема электрохимической обработки деталей:  
а — односторонняя; б — двусторонняя

Электрод-инструмент для электрохимической обработки изготавливают из металлов с достаточно хорошей электропроводностью и высокой стойкостью против коррозии. Рабочая часть инструмента представляет собой несколько откорректированный негативный профиль детали. Величина корректирования профиля зависит от сложности формы детали, режимов обработки, направления движения электролита в зазоре и других причин. При нормальных условиях электролиза поверхность инструмента не изнашивается и имеет большой срок службы.

Электрохимическая обработка может осуществляться с неподвижными или подвижными электродами, с односторонней или двухсторонней обработкой заготовки. В практике используют все четыре схемы обработки (рис. 2).

При обработке с неподвижными электродами по мере снятия металла с анода межэлектродный зазор увеличивается; это приводит к уменьшению плотности тока, а следовательно, к снижению производительности. Кроме этого, понижается точность обработки, а в некоторых случаях и качество обработанной поверхности, поэтому обработка с неподвижными электродами обычно применяется в том случае, когда необходимо снять малые припуски с обрабатываемой поверхности заготовки.

При электрохимической размерной обработке в проточном электролите с подвижными электродами подача электродов может быть непрерывной или периодической.

Чаще всего подачу осуществляют перемещением электродов-инструментов. В этих схемах обработки стремятся сохранить величину минимального зазора в течение всего процесса обработки. Это позволяет получить более высокую производительность, точность и качество поверхности. Поэтому обработка с подвижными электродами находит более широкое применение, чем с неподвижными.

Выбор односторонней или двусторонней обработки зависит от характера выполнения операции и размеров обрабатываемых поверхностей и от конструкции детали.

Электрохимическая размерная обработка в проточном электролите обладает высокими технологическими возможностями. Важнейшим преимуществом электрохимической размерной обработки перед существующими методами обработки поверхностей деталей является то, что этим методом можно обрабатывать любые конструкционные стали и сплавы независимо от их химического состава и механических свойств. Целесообразно электрохимическую размерную обработку применять для изготовления деталей сложной формы, когда обработка резанием представляет большие трудности. Производительность электрохимической размерной обработки деталей сложных форм в 5—15 раз выше, чем при обработке резанием. При этом себестоимость операции снижается в 2—7 раз.

Электрохимическая размерная обработка обеспечивает высокое качество поверхности детали. После ЭХО в поверхностном слое обрабатываемой заготовки остаточные напряжения минимальны и лежат в пределах точности метода измерения. Вследствие этого усталостная прочность, например, для лопаток повышается на 5—15%. Правда, при обработке отдельных сталей наблюдается растравление по границам зерен в поверхностном слое на небольшой глубине. Этот недостаток может быть устранен соответствующим подбором режима и условий обработки или введением дополнительной операции механической, обработки.



Кроме вышесказанного, к положительным качествам электрохимического процесса в сравнении с механической обработкой относятся: несложное оборудование, долговечность электрода инструмента, меньшее время и затраты на подготовку производства, концентрация операций, что облегчает планирование, и др.

Исходными данными для выбора параметров электрохимической обработки являются: материал заготовки, требуемая точность и чистота обработки, размер и форма обрабатываемой поверхности, величина операционного припуска и точность заготовки.

Основными задачами технолога являются:

- 1). выбор электролита, т.е. его состава, концентрации, необходимой температуры, допустимой загрязненности и схемы подвода электролита;
- 2). определение оптимальных электролитических и гидродинамических режимов обработки, т.е. напряжения, плотности тока и скорости движения электролита;
- 3). выбор формы и размеров электрода-инструмента;
- 4). определение производительности операции.

При выборе электролита, режимов обработки и др., кроме исходных данных, необходимо учитывать: схему выпрямления тока, применяемую систему регулирования процесса, наличие вибрации электродов, модель оборудования, характер выполнения операции и другие условия.

Электрохимическая обработка не всегда может заменить существующие методы обработки. Например, при обработке деталей простых геометрических форм из конструкционных сталей электрохимическая обработка не может конкурировать с обработкой резанием по производительности, экономичности и другим показателям.

Технолог, располагая различными методами обработки, должен применять их рационально. При выборе метода обработки окончательное решение должно основываться на экономическом сравнении вариантов технологического процесса. При выборе экономической оценки вариантов технологического процесса следует

учитывать не только себестоимость изготовления деталей, но и другие не менее важные факторы, как, например надежность и ресурс деталей.

Экспериментальные исследования и результаты серийного производства показывают, что точность электрохимической размерной обработки без применения соответствующих мероприятий по ее повышению невысокая. Так, например, точность изготовления лопаток турбин и компрессоров средних размеров при действии многих из рассмотренных выше факторов составляет 0,4—0,8 мм. После применения ряда мероприятий точность этих же лопаток повышается до 0,15—0,2 мм. Однако и такая точность не является предельной.

Имеющиеся экспериментальные данные и опыт эксплуатации электрохимического оборудования показывают, что удельное значение каждой первичной погрешности в общем балансе (суммарной погрешности) не одинаково. Погрешности, вызванные упругими и температурными деформациями, составляют, приблизительно, 10—15%, а погрешности, обусловленные изменением параметров электролита на входе в межэлектродный зазор, лежат в пределах 30—40%. Погрешности, возникающие в результате изменения параметров электролита по мере прохождения его в зазоре, приблизительно равны 15—20%, а на долю погрешностей, связанных с, изменением гидродинамики электролита в зазоре и колебанием размеров заготовки, также приходится около 15—20%. Погрешности установки и настройки не превышают 10—15%.

К основным факторам, влияющим на возникновение погрешностей при ЭХО можно отнести деформации заготовки от воздействия гидродинамических сил потока электролита, деформации от внутренних остаточных напряжений возникающие при снятии припуска, а также термоупругие деформации, возникающие вследствие нагрева заготовки при протекании электрического тока.

Лопатки турбин и компрессоров являются наиболее ответственными деталями газотурбинных двигателей. Перо лопаток представляет собой фигуру переменного сечения, ограниченную

поверхностями сложного очертания и точно ориентированную в пространстве по отношению к замковой части. Точность изготовления пера находится в пределах 0,05—0,15 мм. Замковая часть, при помощи которой лопатки крепятся к дискам, изготавливается с точностью 0,01—0,02 мм.

В процессе ЭХО лопаток вследствие нагрева технологическим током, происходит деформация пера лопатки и, как следствие, изменяются эпюры межэлектродных зазоров, что приводит к перераспределению плотностей тока и скоростей электрохимического растворения.

Неравномерность температурного поля поверхности пера создаёт предпосылки для изменения эпюры скоростей электрохимического растворения. В процессе ЭХО в зазоре выделяется тепло, обусловленное теплотой Джоуля  $P_u$ , внутренним трением  $P_R$  в электролите и образованием тепла  $P_C$  вследствие химических процессов при снятии материала. Как упоминалось выше, общее тепло вызывает изменение электропроводности электролита, отбирается электролитом и теплопроводящим анодом и инструментом. Температура катода незначительно отличается от температуры электролита, поэтому тепловым потоком от катода к аноду можно пренебречь. Масса катода и его сечения сравнительно велики, следовательно, выделение Джоулева тепла в катоде будет ничтожно мало. Влияние тепловыделения в электролите на нагрев анода можно не учитывать при условии, что установка снабжена хорошим холодильником, стабилизирующим температуру электролита на входе в зазор.

Таким образом, основными факторами, влияющими на нагрев анода при ЭХО можно считать:

- тепловыделение в материале лопатки за счёт падения напряжения при протекании технологического тока;
- выделение тепла в электрическом контакте лопатки с токоподводом;
- выделение тепла на обрабатываемой поверхности пера вследствие перенапряжения анодной реакции.

В данной работе необходимо смоделировать процесс ЭХО лопаток с помощью КЭК Ansys и вычислить величину деформации пера,

возникающую вследствие нагрева заготовки в процессе обработки.

Реально аналогичные задачи могут решаться цеховыми технологами при оценке возможной точности деталей.

Метод компьютерного моделирования процесса теплового деформирования заготовки существенно сокращает затраты на технологическую подготовку производства.

## ЗАДАНИЕ

Необходимо произвести сопряжённый термоструктурный анализ для оценки возможных термоупругих деформаций в заготовках про ЭХО с последующим вариационным моделированием конвективного теплообмена между образцом и электролитом.

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Импорт модели лопатки в Ansys.
2. Разбиение объема лопатки.
3. Разбиение модели лопатки на конечные элементы (наложение сеток).
4. Проведение стационарного теплового анализа.
5. Проведение структурного анализа.
6. Построение графиков деформации пера лопатки.
7. Самостоятельная работа.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### *1. Импорт модели лопатки*

Построение объёмных моделей в среде конечно-элементного комплекса Ansys является весьма трудоёмкой задачей, поэтому модель заготовки лопатки была предварительно построена с помощью программы твердотельного моделирования **Solid Edge**. Модель заготовки лопатки была получена путём предварительного построения модели самой лопатки по конструкторскому чертежу и последующего наращивания технологической прибыли высотой 20мм на периферии лопатки. Для импортирования модели в конечно-элементный

комплекс Ansys используем формат Parasolid(\*.x\_t). Модель лопатки представлена на рисунке 3.

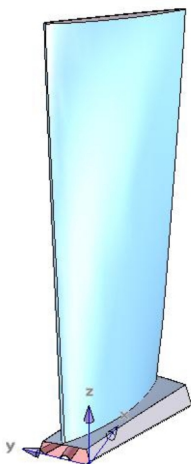


Рис. 3. Объёмная модель лопатки

1.1. Импорт модели.

**Utility Menu (UM) → File → Import → PARA... → Compressor 14.257-011.x\_t → OK**

Для выполнения данной команды необходимо наличие в рабочей директории Ansys-а файла **Compressor 14.257-011.x\_t**.

1.2. Отображение объёма лопатки.

**UM → Plot → Volumes**

## **2. Разбиение объёма лопатки**

Для последующего наложения сеток и задания нагрузок разбиваем объём лопатки на ряд отдельных элементов.

2.1. Отображение площадей ограничивающих внутренний объём лопатки.

**UM → Plot → Areas**

2.2. Отображение номеров площадей.

**UM → PlotCtrls → Numbering → Area Numbers**

2.3. Создание вспомогательной поверхности.

**Main Menu (MM) → Preprocessor → Modeling → Create → Areas → Arbitrary → Overlaid on Area**

После выполнения данной команды необходимо указать верхнюю поверхность замка лопатки (поверхность под номером 4), а также точки, определяющие новую поверхность - это точки расположенные в вершинах замка.

В результате произведённых действий получаем вспомогательную поверхность (поверхность под номером 12).

#### 2.4. Разбиение объема.

На данном этапе разбиваем объём лопатки вспомогательной поверхностью.

**MM → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Divide → Volume by Area**

После выполнения данной команды необходимо указать объём лопатки и построенную на предыдущем этапе поверхность под номером 12. Далее система разбивает модель лопатки на два объёма - перо и замок.

#### 2.5. Разбиение объема пера.

Для последующего приложения тепловых нагрузок разбиваем объём пера на ряд отдельных элементов. Разбиение объёма производим с помощью рабочей плоскости (**Working Plane**) и булевой операции разделения (**Divide**).

На данном этапе рабочая плоскость по умолчанию совмещена с глобальной декартовой системой координат, для разбиения объёма пера необходимо сместить её на определённое расстояние по оси Z (по высоте лопатки).

##### 2.5.1. **UM → WorkPlane → Offset WP by Increments...**

В открывшемся меню в поле **X,Y,Z Offsets** необходимо ввести 0,0,0.016 , и нажать **Apply**. В результате рабочая плоскость смещается на 16 мм по оси Z. Величина смещения соответствует высоте расположения профиля поперечного сечения пера, заданной в конструкторском чертеже лопатки.

**2.5.2. MM → Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans → Divide → Volume by WrkPlane**

В результате выполнения данной команды перо разбивается на два отдельных объёма.

Далее путём повторения пунктов 2.5.1 и 2.5.2 получаем перо разбитое на 13 отдельных объёмов, при этом рабочая плоскость один

раз смещается на 9 мм и далее на 18,5 мм для всех оставшихся объёмов (рис.4).

### 3. Разбиение модели лопатки на конечные элементы (наложение сеток)

На данном этапе накладываем упорядоченную сетку на объём пера лопатки и свободную сетку на замок.

#### 3.1. Выбор типа элементов.

Выбор типа элементов производится с помощью следующей команды:

**MM → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete**

Для наложения сеток необходимо выбрать следующие типы конечных элементов: **SOLID45, SOLID95**.

#### 3.2. Назначение типа элементов.

**MM → Preprocessor → Meshing → Mesh Attributes → Picked Volumes**

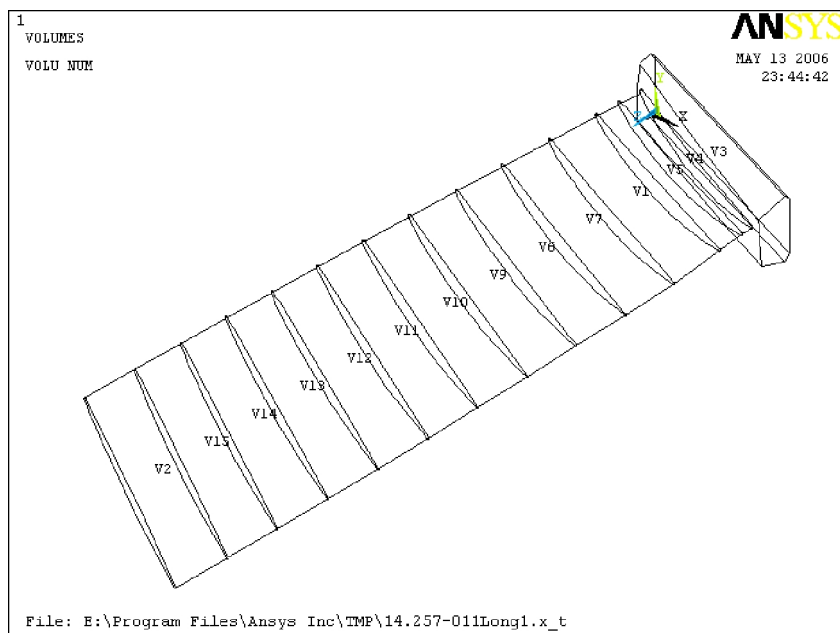


Рис. 4. Модель лопатки разбитая на объёмы

С помощью данной команды присваиваем каждому объёму свой тип элемента. Для пера лопатки - **SOLID45**, для замка - **SOLID95**.

### 3.3. Наложение сеток.

3.3.1. Отображаем линии ограничивающие внутренний объём лопатки:

**UM → Plot → Lines**

3.3.2. Отображаем номера линий:

**UM → PlotCtrls → Numbering → Line Numbers**

3.3.3. Разбиваем линии.

**MM → Preprocessor → Meshing → SizeCtrls → ManualSize → Lines → Picked Lines**

Для определения размера конечных элементов по ширине указываем линии основания пера лопатки (линии с номерами 2 и 3), в появившемся окне в поле **NDIV** необходимо ввести 100 и в поле **SPACE** – 40.

3.3.4. Накладываем упорядоченную сетку на перо лопатки:

**MM → Preprocessor → Meshing → Mesh → VolumeSweep → Sweep**

С помощью данной команды необходимо последовательно наложить сетку на объёмы составляющие перо (объёмы с номерами 4,5,1,7,6,9,10,11,12,13,14,15,2).

3.3.5. Накладываем свободную сетку на замок лопатки:

**MM → Preprocessor → Meshing → Mesh → Volumes → Free**

3.3.6. Меняем тип элементов на замке лопатки:

**MM → Preprocessor → Meshing → Mesh → Modify Mesh → Change Tets → 95 to 92**

В результате выполнения данной команды все конечные элементы (**SOLID95**) составляющие замок лопатки преобразуются в **SOLID92**, кроме элементов непосредственно связанных с пером лопатки. Данная операция позволяет ускорить процесс расчёта, так как вычисления с использованием элемента **SOLID95** требуют больших ресурсов системы.

Модель лопатки разбитая на конечные элементы представлена на рис. 5.



#### 4. Проведение стационарного теплового анализа

Для расчёта термоупругих деформаций пера лопатки необходимо проведение сопряжённого последовательного термоструктурного анализа. Сопряжённым является анализ, учитывающий взаимодействие (сопряжение) между двумя или более инженерными дисциплинами (областями).

Для нашего случая расчёт сводится к решению стационарного теплового анализа и последующего вычисления термоупругих деформаций с помощью структурного (прочностного). Результаты решения стационарного теплового анализа (температурный градиент) являются исходными данными для структурного.

На данном этапе с помощью стационарного теплового анализа получим распределение температуры в теле лопатки.

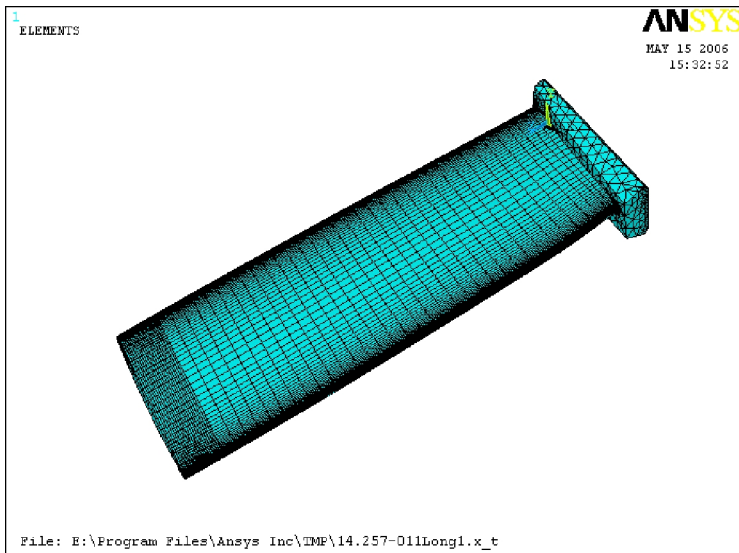


Рис. 5. Модель лопатки разбитая на конечные элементы

##### 4.1. Задание свойств материала.

Материал лопатки сталь 13X11H2B2MФ.

Для теплового анализа необходимо задать коэффициент теплопроводности и удельную теплоёмкость материала.

4.1.1. Задание коэффициента теплопроводности.

**MM → Preprocessor → Material Props → Material Models → Thermal → Conductivity → Isotropic**

В поле **KXX** ввести 23,05 (дж/м·с·к).

4.1.2. Задание удельной теплоёмкости.

**MM → Preprocessor → Material Props → Material Models → Thermal → Specific Heat**

В поле **C** ввести 460 (дж/кг·к).

4.2. Приложение тепловых нагрузок.

Лопатка в процессе ЭХО базируется по замку и поджимается винтами по вспомогательной технологической прибыли. Токоподвод осуществляется по подошве замка. При протекании электрического тока через лопатку происходит выделение Джоулева тепла, также имеет место тепловыделение в пятне контакта электрода с лопаткой. В свою очередь на пере лопатки происходит анодное растворение металла в среде электролита и соответственно процесс теплообмена твёрдое тело - жидкость.

В среде Ansys-а этот процесс можно описать заданием температурной нагрузки по поверхности контакта с электродом, объёмным тепловыделением в теле лопатки и конвективным теплообменом по перу лопатки.

4.2.1. Отображение площадей ограничивающих внутренний объём лопатки.

**UM → Plot → Areas**

4.2.2. Отображение номеров площадей.

**UM → PlotCtrls → Numbering → Area Numbers**

4.2.3. Смена типа элементов.

**MM → Preprocessor → Element Type → Element Type → Switch Elem Type → Struc to Thermal**

Данная команда меняет структурные элементы **SOLID45**, **SOLID92**, **SOLID95** на соответствующие им тепловые **SOLID70**, **SOLID87**, **SOLID90**.

4.2.4. Задание общей температуры окружающей среды.

**MM → Preprocessor → Loads → Define Loads → Settings → Uniform Temp**

В поле **TUNIF** ввести 293(k)

**4.2.5. Приложение температурной нагрузки.**

Задаём значение температуры в пятне контакта электрода с заготовкой.

**MM → Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Ter-mal → Temperature On Areas**

Необходимо указать нижнюю поверхность замка (поверхность с номером 9).

В поле **VALUE** ввести 523(k).

**4.2.6. Задание конвективного теплообмена.**

Задаём конвективный теплообмен на поверхностях непосредственно контактирующих с электролитом. В среде Ansys этот процесс определяется заданием коэффициента теплоотдачи и температуры контактирующей с телом среды.

Значение коэффициента теплоотдачи зависит от многих факторов – это температура электролита и заготовки, скорость течения электролита, площадь обрабатываемой поверхности и ряда других, поэтому определение коэффициента теплоотдачи теоретическим путём не представляется возможным.

В данной работе коэффициент теплоотдачи выбираем используя экспериментальные данные таблицы 1, где представлена зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры воды при течении в цилиндрической стальной трубе.

Таблица 1

**Значения коэффициента теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>°С**

Температура,(°С)	21,1	93,3	148,9	204,4	260,0
Коэфф. Теплоотдачи	2419,7	2300,4	1999,4	1562,0	1255,3

Используя данные таблицы строим графическую зависимость (рис. 6) и приняв температуру электролита равной 30°С определяем коэффициент теплоотдачи.

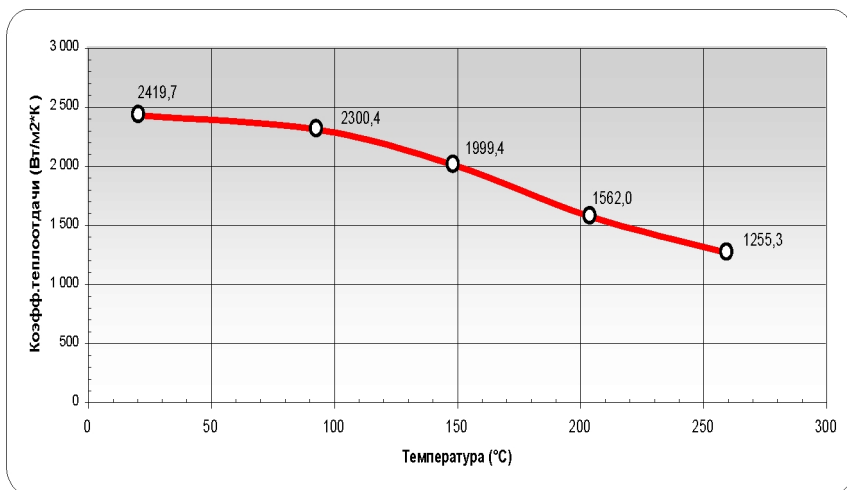


Рис.6. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры воды

Задаём конвективный теплообмен:

**MM → Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Thermal → Convection On Areas**

Далее необходимо указать поверхности образующие спинку и корытце лопатки.

В открывшемся меню задаём коэффициент теплоотдачи (**Film Coefficient**) и температуру электролита (**Bulk Temperature**).

В поле **VAL1** ввести 2400(Вт/м²·k).

В поле **VAL2I** ввести 303(k).

4.2.7. Задание начальной температуры заготовки.

**MM → Preprocessor → Loads → Define Loads → Settings → Reference Temp**

В поле **TREF** ввести 293(k)

4.2.8. Задание Джоулева теловыделения (объёмной нагрузки).

Расчёт Джоулева тепла в пере производился с помощью табличного процессора **Microsoft Excel** по следующим формулам:

- мощность теплового источника определяется как отношение тепла, выделившегося в данном элементарном объёме  $dQ$  к величине этого объёма  $dV$ :

$$q_x = \frac{dQ}{dV}. \quad (1)$$

В свою очередь

$$dQ = I_{xi} R_{\Delta x}, \quad (2)$$

где  $I_{xi}$  - ток, протекающий по проводнику через сечение  $x_i$ ,

$R_{\Delta x}$  - сопротивление элементарного участка;

$$R_{\Delta x} = \rho \frac{\Delta x}{F_n}, \quad (3)$$

здесь  $F_n$  - площадь поперечного сечения,  $\rho$  - удельное сопротивление материала,  $\Delta x$  - высота элементарного объёма.

Для расчётов по данным формулам в среде **SolidEdge** определялись площади поперечного сечения  $F_n$ ; значения высот каждого элементарного объёма соответствуют расстояниям между поперечными сечениями пера, заданным в конструкторском чертеже лопатки; величина удельного сопротивления материала была принята равной 0,0001 Ом·м; значение тока протекающего через лопатку определялось по известной плотности тока подводимого через пятно контакта ( $a = 5 \text{ A/cm}^2$ ).

Расчёт Джоулева тепловыделения в замке лопатки производился аналогично, при этом замок типа ласточкин хвост имеющий довольно сложную пространственную форму, представлялся как параллелепипед равного объёма.

Задание Джоулева тепловыделения:

**MM → Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Termal → HeatGeneration → On Volumes**

Далее необходимо поочерёдно указать объёмы и соответствующие им значения Джоулева тепла :

V3 – 2324959

V4 – 39952721

V5 – 41824029

V1 – 44093164

V7 – 48495703

V6 – 55328663

V9 – 60641752

V10 – 64952511

V11 – 78111040

V12 – 84769192

V13 – 99086509

V14 – 118936679

V15 – 141529996

V2 – 141529996

Результат нагружения представлен на рисунке 7.

4.3. Проведение расчёта.

**MM → Solution → Solve → Current LS**

После выполнения данной команды система производит расчёт стационарного теплового анализа.

4.4. Отображение результатов расчёта.

**MM → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Nodal Solu → DOF Solution → Temperature**

Данная команда отображает распределение температуры в теле лопатки (Рис.8).

Полученный результат необходимо сохранить в виде графического файла: **PlotCtrls → Hard Copy → To File**

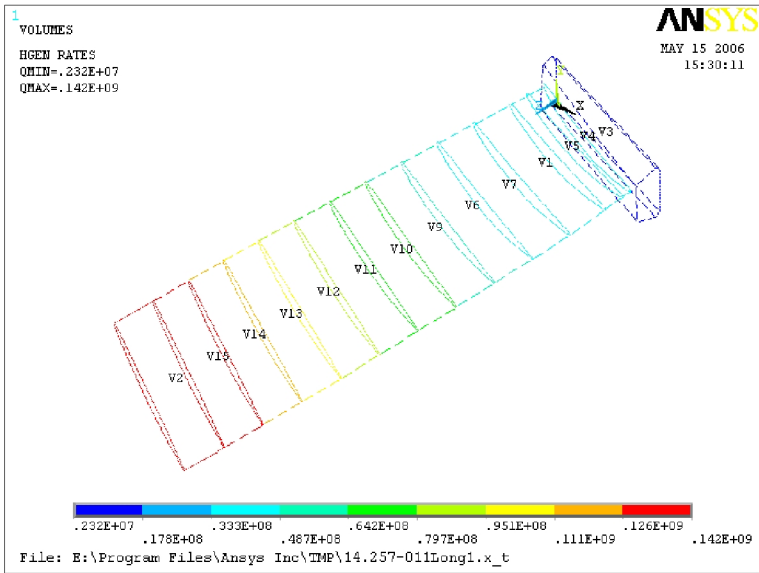


Рис.7. Распределение Джоулева тепла в теле лопатки

## 5. Проведение структурного анализа

На данном этапе используя результаты стационарного теплового анализа производим расчёт тепловых деформаций пера лопатки.

### 5.1. Смена типа элементов.

**MM → Preprocessor → Element Type → Element Type → Switch Elem Type → Termal to Struc**

Данная команда меняет тепловые элементы на соответствующие им структурные.

### 5.2. Задание свойств материала.

Для структурного анализа необходимо задать дополнительные свойства материала. Задаём модуль упругости и коэффициент Пуассона :

**MM → Preprocessor → Material Props → Material Models → Structural → Linear → Elastic → Isotropic**

В поле EX ввести  $2,15e11$  (Па).

В поле **PRXY** ввести 0,3.

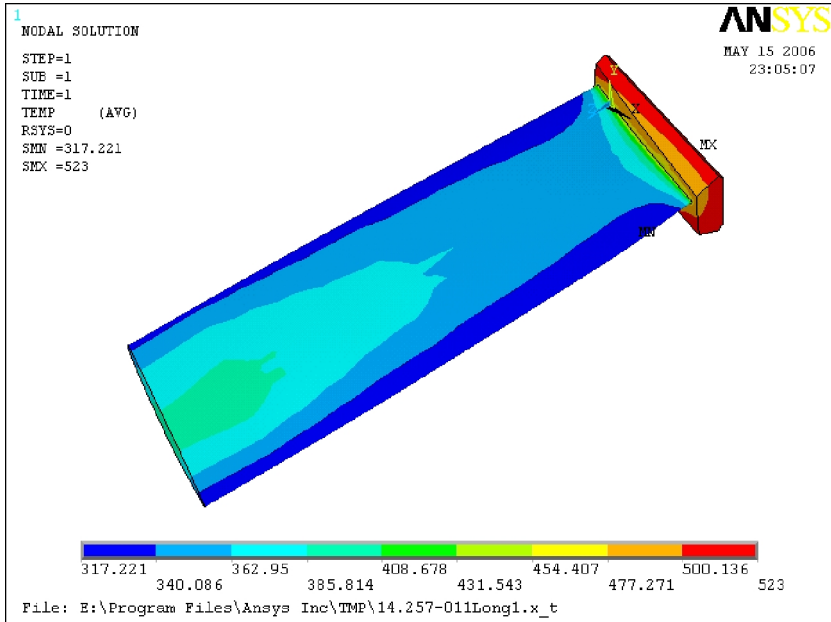


Рис. 8. Распределение температуры в теле лопатки при температуре в пятне контакта 250°C (523K) и Джоулевым тепловыделением

Задаём коэффициент линейного расширения :

**MM** → **Preprocessor** → **Material Props** → **Material Models** → **Structural** → **Thermal Expansion** → **Secant Coefficient** → **Isotropic**  
В поле **ALPX** ввести  $11.7e-6$  (1/k).

Задаём плотность материала :

**MM** → **Preprocessor** → **Material Props** → **Material Models** → **Structural** → **Density**

В поле **DENS** ввести  $7800$  (кг/м<sup>3</sup>).

### 5.3. Приложение нагрузок.

Лопатка в процессе ЭХО базируется по замку и поджимается винтами по вспомогательной технологической прибыли. В среде Ansys зададим жесткую заделку по замку предполагая, что наибольшая величина деформации будет на пере лопатки, а



деформации замка относительно мала. Поджатие винтами имитируем заданием поузлового ограничения по всем степеням свободы. Также на данном этапе зададим температурный градиент, полученный в результате стационарного теплового анализа.

#### 5.3.1. Удаление всех нагрузок.

Удаляем все нагрузки оставшиеся после стационарного теплового анализа :

**MM → Preprocessor → Loads → Define Loads → Delete → All Load Data → All Loads & Opts**

#### 5.3.2. Отображение площадей ограничивающих внутренний объём лопатки.

**UM → Plot → Areas**

#### 5.3.3. Задание заделок.

**MM → Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Structural → Displacement → On Areas**

Указываем все поверхности замка.

**MM → Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Structural → Displacement → On Nodes**

Указываем несколько узлов расположенных на поверхности технологической прибыли.

#### 5.3.4. Задание температурного градиента.

**MM → Preprocessor → Loads → Define Loads → Apply → Structural → Temperature → From term Analy**

Нажать **Browse**, затем в рабочей папке **Ansys** указать файл с именем **file.rth** - это файл с результатами стационарного теплового анализа.

#### 5.4. Проведение расчёта.

**MM → Solution → Solve → Current LS**

После выполнения данной команды система производит расчёт структурного анализа.

#### 5.5. Отображение результатов расчёта.

**MM → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Nodal Solu → DOF Solution → Displacement vector sum**

Данная команда отображает деформированную вследствие температурной нагрузки модель лопатки и величины суммарного смещения профиля пера от номинального положения (рис.9).

## *6. Построение графиков деформации пера лопатки*

Построение производим для случая, когда величина деформации максимальна, то есть при задании температуры в пятне контакта и Джоулева тепловыделения. Строим распределение величин деформаций по высоте лопатки для входной и выходной кромок, так как наибольшее смещение профиля наблюдается именно там (рис. 9).

### 6.1. Выбор узлов.

Выбираем узлы расположенные на входной и выходной кромках :

**UM → Select → Entities**

Затем **Lines → By Num/Pick**, нажать **Apply** и указать линии входной и выходной кромок.

Затем **Nodes → Attached to → Lines,all**, нажать **Apply** и **Plot**.

В результате чего на экран будут выведены узлы принадлежащие входной и выходной кромкам.

### 6.2. Отображение номеров узлов.

**UM → PlotCtrls → Numbering → Node Numbers**

### 6.3. Назначение узлов для построения графиков.

**MM → General Postproc → Path Operations → Define Path → By Nodes**

Необходимо последовательно указать узлы входной кромки от втулочного сечения пера лопатки к периферийному и задать имя пути, например VhodnKг. Повторяем данную операцию для выходной кромки и задаём имя VihodnKг.

### 6.4. Отображение назначенных путей.

**MM → General Postproc → Path Operations → Plot Path**

Данная команда выводит на экран все назначенные ранее пути (рис.10).

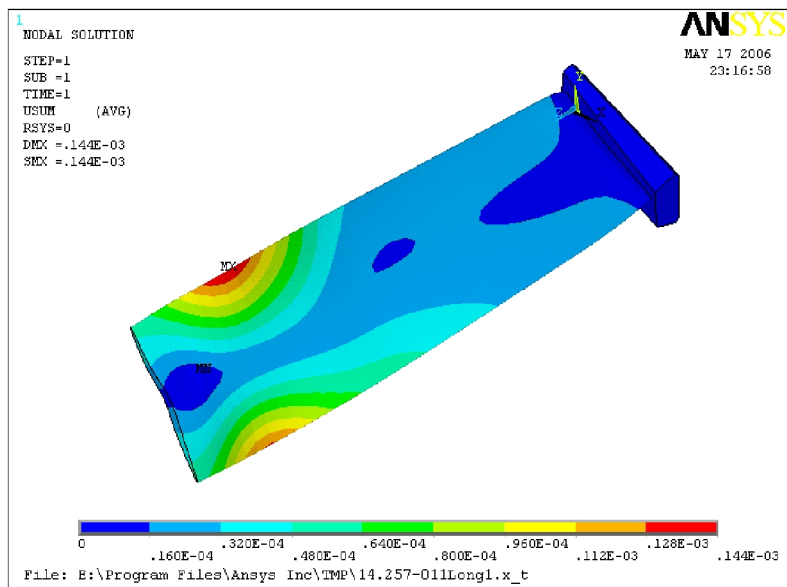


Рис. 9. Деформированная модель лопатки

6.5. Выбор необходимого пути.

Выбираем путь для построения графика :

**MM → General Postproc → Path Operations → Recall Path**

Выбираем путь с именем VhodnKг.

6.6. Выбор отображаемого параметра.

Назначаем параметр, который будет откладываться по второй оси графика :

**MM → General Postproc → Path Operations → Map onto Path**

Затем **DOF Solution → Translation USUM**

6.7. Отображение графиков.

**MM → General Postproc → Path Operations → Plot Path Item → On Graph**

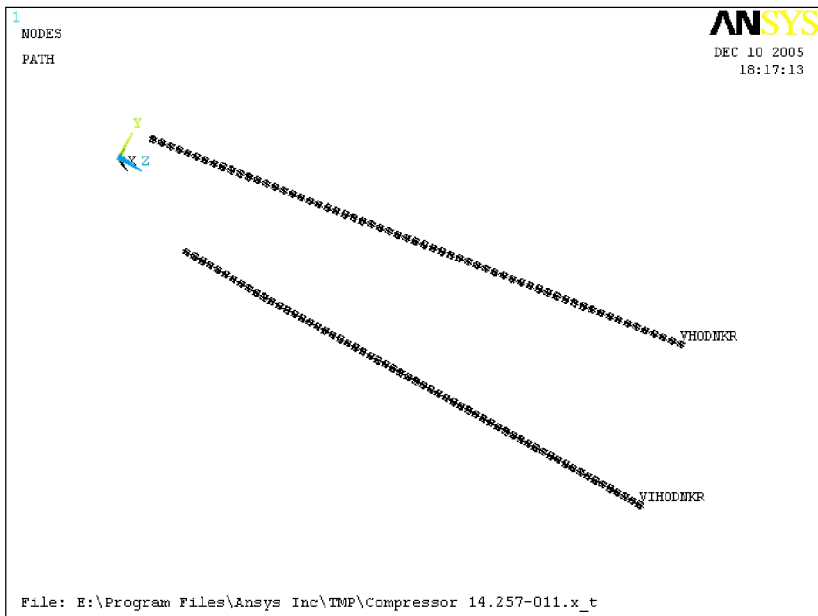


Рис.10 Пути для построения графических зависимостей

После чего система выводит на экран график распределения величин деформаций по высоте лопатки на входной кромке (рис.11).

Повторяя действия, описанные в пунктах 6.5 - 6.7 получаем график для выходной кромки (рис.12).

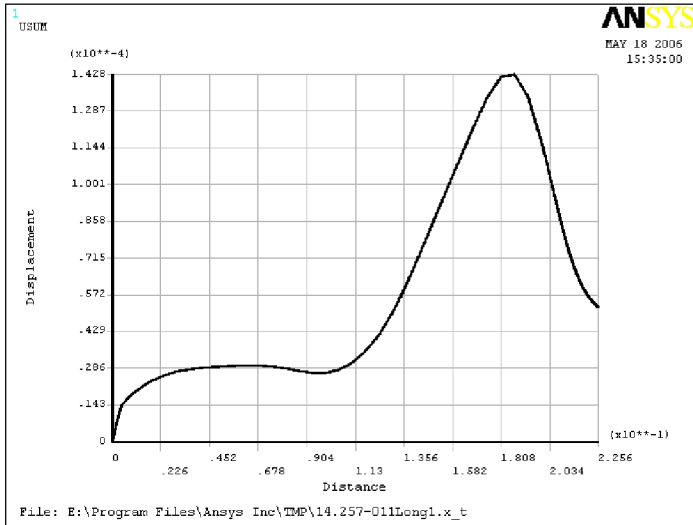


Рис. 11 График деформаций пера лопатки по высоте (входная кромка)

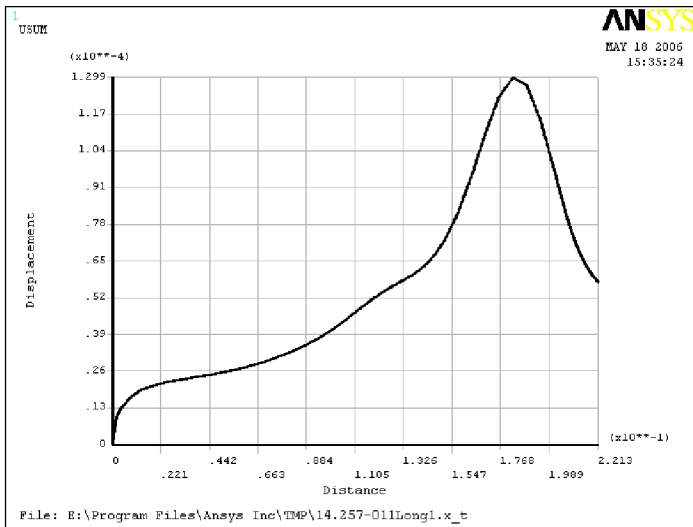


Рис. 12. График деформаций пера лопатки по высоте (выходная кромка)

## *7. Самостоятельная работа*

На данном этапе необходимо произвести расчёт деформаций модели лопатки для двух различных вариантов конвективного теплообмена. Расчёт будет производиться автоматически путём запуска макроса из основного меню программы.

Для проведения расчётов необходимо внести изменения в текст макроса **MacrosLopatka.txt** находящегося в рабочей директории программы. В строке **SFA,P51X, ,CONV,2400,303** путём варьирования значений 2400 и 303 (2400-значение коэффициента теплоотдачи; 303-температура электролита) производим изменение параметров конвективного теплообмена и, как следствие этого появляется возможность отслеживать изменение тепловых деформаций образца.

Значения коэффициента теплоотдачи и температуры электролита подбираем, используя данные графика представленного на рис.5.

Запуск макроса осуществляется с помощью команды:

**Utility Menu → File → Read Input from → MacrosLopatka.txt →OK.**

Текст макроса представлен в приложении 1.

### *Содержание отчёта*

1. Результаты решения последовательного термоструктурного анализа, а также графики деформаций входной и выходной кромок для лопатки компрессора.
2. Выводы по проделанной работе.

### *Контрольные вопросы*

1. В чём заключаются основные преимущества метода ЭХО?
2. Какое физическое явление лежит в основе метода ЭХО?
3. В чем заключается сущность анодного растворения?
4. Перечислите основные виды ЭХО.
5. Когда нецелесообразно применять метод ЭХО?
6. Какие типы анализов использовались для расчёта термоупругих деформаций?
7. Какие типы конечных элементов использовались при выполнении расчётов?
8. Для чего производилось разбиение моделей образца и лопатки на отдельные объёмы?
9. Что является результатом решения стационарного теплового анализа?
10. Назовите два основных вида тепловыделения при ЭХО.
11. Чем в среде Ansys-а определяется конвективный теплообмен?
12. От чего зависит коэффициент теплоотдачи при ЭХО?
13. Для чего решается данная задача и какую цель она преследует?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин – М.: Машиностроение, 1976.
2. Головачев В.А. и др. Электрохимическая размерная обработка деталей сложной формы. - М.: Машиностроение, 1969. – 200 с.
3. Петров Ю.Н. и др. Особенности формирования погрешностей при электрохимической размерной обработке импульсными токами // Электронная обработка металлов.- 1974. - № 5.
4. Беляев М.А., Филимошин В.Г. К вопросу об исследовании технологических параметров способа локализации процесса ЭХО при катодной защите // Электрохимическая обработка: Сб. - Вып. 63. - Куйбышев, 1976.
5. Дмитриев Л.Б. Исследования влияния некоторых факторов на точность геометрической формы при размерной электрохимической обработке // Технология машиностроения / ТПИ. - Тула, 1971. - Вып.21.
6. Дмитриев Л.В. Технологические основы повышения точности размерной электрохимической обработки: Докторская диссертация.-Тула, ТПИ. 1975.-403с.
7. Корчагин Г.Н., Макаров В.А. Повышение точности электрохимического формообразования длинномерных деталей // Электронная обработка материалов. - 1974. - № 3.



МАКРОС ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЁТА ТЕРМОУПРУГИХ  
ДЕФОРМАЦИЙ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА

```

FINISH
/Clear,Start
/REPLOT
/units,si ! Система единиц СИ

/REPLOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,,0
/REPLOT,RESIZE
~PARAIN,Compressor 14.257-011,x_t,,SOLIDS,0,0 ! Импорт модели
/NOPR
/GO
VPLOT ! Отображение объёма
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
/VIEW,1,,-1
/ANG,1
/REP,FAST
/USER, 1
/VIEW, 1, -0.686928025935 , -0.389757113598 , 0.613367165395
/ANG, 1, 43.4073086762
/REPLO
/ZOOM,1,SCRN,0.058827,-0.487918,0.378982,-0.726022
    
```

### **! Задание типа элементов**

ET,1,SOLID45

!\*

ET,2,SOLID95

!\*

FLST,3,4,3

FITEM,3,5

FITEM,3,7

FITEM,3,8

FITEM,3,6

ASUB, 4,P51X

VSBA, 1, 14

VPLOT

/AUTO,1

/REP,FAST

### **!Задание свойств материала (сталь 13X11H2B2MФ)**

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,DENS,1,,7800

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,1,,2.15e11

MPDATA,PRXY,1,,0.3

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

UIMP,1,REFT,,

MPDATA,ALPX,1,,11.7e-6

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,KXX,1,,23.05

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0  
MPDATA,C,1,,460

**! Наложение сеток**

/ZOOM,1,SCRN,0.022176,-0.488458,0.326860,-0.692815  
FLST,5,2,4,ORDE,2  
FITEM,5,6  
FITEM,5,-7  
CM,\_Y,LINE  
LSEL,,,P51X  
CM,\_Y1,LINE  
CMSEL,,\_Y

**!\* Перо**

LESIZE,\_Y1,,,30,,,,1 !Линии основания.

!\*

FLST,5,1,4,ORDE,1  
FITEM,5,28  
CM,\_Y,LINE  
LSEL,,,P51X  
CM,\_Y1,LINE  
CMSEL,,\_Y

!\*

LESIZE,\_Y1,,,60,,,,1 !Высота.

!\*

TYPE, 1  
MAT, 1  
REAL,  
ESYS, 0  
SECNUM,

!\*

CM,\_Y,VOLU  
VSEL,,,, 2  
CM,\_Y1,VOLU

```

CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VSWEEP,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
! Замок
TYPE, 2
MAT, 1
REAL,
ESYS, 0
SECNUM,
!*
MSHAPE,1,3D
MSHKEY,0
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 3
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1 !Запуск
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
! Проведение стационарного теплового анализа
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1

```

/REP,FAST

EPlot

!\*

TCHG,95,92,0

ETCHG,STT

APLOT

TUNIF,293,

TREF,293,

FLST,2,2,5,ORDE,2

FITEM,2,9

FITEM,2,11

!\*

/GO

DA,P51X,ALL,473

FLST,2,3,5,ORDE,3

FITEM,2,1

FITEM,2,2 !!!!!!!

FITEM,2,4

/GO

!\*

SFA,P51X,1,CONV,180,303 ! Задание конвекции

ALLSEL,ALL

FINISH

/SOL

/STATUS,SOLU

SOLVE

**! Отображение результатов стационарного теплового анализа**

FINISH

/POST1

!\*

/EFACET,1

PLNSOL, TEMP,, 0

**! Структурный анализ**

FINISH

/PREP7

ETCHG,TTS **! Смена типа элементов**

LSCLEAR,ALL

FLST,5,2,5,ORDE,2

FITEM,5,1

FITEM,5,-2

ASEL,U, , ,P51X

FLST,2,12,5,ORDE,3

FITEM,2,3

FITEM,2,-13

FITEM,2,15

!\*

/GO

DA,P51X,ALL,

ALLSEL,ALL

/REPLOT

LDREAD,TEMP,, , , 'T-E-deformations','rth',' ' **! Приложение**

**градиента температуры**

!\*

/PSF,DEFA, ,1,0,1

/PBF,TEMP, ,1

/PIC,DEFA, ,1

/PSYMB,CS,0

/PSYMB,NDIR,0

/PSYMB,ESYS,0

/PSYMB,LDIV,0

/PSYMB,LDIR,0

/PSYMB,ADIR,0

/PSYMB,ECON,0

/PSYMB,XNODE,0

/PSYMB,DOT,1

/PSYMB,PCONV,

/PSYMB,LAYR,0

```
/PSYMB,FBCS,0
!*
/PBC,ALL, ,1
/REP
!*
FINISH
/SOL
/STATUS,SOLU
SOLVE ! Запуск решения структурного анализа
FINISH
! Отображение результатов структурного анализа
/POST1
!*
/EFACET,1
AVPRIN,0,
PLNSOL, U,SUM, 2,1.0
FINISH
```