

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ПЕРА ЛОПАТКИ И РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИИ ПЕРА ЛОПАТКИ ПОСЛЕ СНЯТИЯ СЛОЯ С ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

Курушин А.М., Смирнов Г.В., Казандаев В.В., Смелов В.Г.
Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

В процессе проектирования технологии изготовления компрессорных лопаток на стадии выбора того или иного способа обработки пера возникает проблема определения деформации пера после обработки в результате удаления слоя материала с остаточными напряжениями. Обычно эта сложная технологическая задача решается либо путем экспериментальной обработки партии лопаток и их последующего измерения, что чрезвычайно дорого и сопряжено со значительными затратами времени, либо расчетным путем по известным методикам, разработанным для компрессорных лопаток на кафедре «Сопротивление материалов» для ППД, использующих экспериментально полученные на образцах эпоры распределения остаточных напряжений и систему уравнений, связывающую деформации центров тяжести в каждом из сечений лопатки с изгибающими моментами и нормальными усилиями возникающих от действующих остаточных напряжений. (Эпора действующих остаточных напряжений соответствовала разнице эпор до и после соответствующей обработки). Второй путь хотя и менее дорогостоящий, но затратен по времени и вследствие этого не может быть рекомендован для практического использования на производстве. Нами решалась задача моделирования процесса деформации оси пера лопатки в результате удаления слоя с локализованными в нем остаточными напряжениями с помощью современных программных средств с целью максимального сокращения времени и упрощения для практического использования. В качестве средства моделирования был использован программный комплекс Ansys 5.7, позволяющий осуществлять структурный анализ конечно-элементной (КЭ) модели тела при динамическом и статическом нагружении. Первая часть задачи - задание остаточных напряжений в поверхностном слое модели. Оно может быть осуществлено с помощью нагружения начальными напряжениями (Initial Stress Loading), то есть, заданием начальных напряжений, как нагрузки. Постоянные напряжения назначались с использованием команды `ISTRESS`. С помощью команды `ISWRITE` записывался как результат файл начальных напряжений. При использовании команды `ISFILE` начальные напряжения считывались из входного текстового файла, с ее же помощью уничтожались начальные напряжения. Формирование заданной эпоры остаточных напряжений в

поверхностном слое обрабатывалось на плоской КЭ модели пластины (SOLID42) толщиной 3,5 мм, высотой 139,9 мм, шириной 35 мм (что соответствовало осредненным параметрам лопатки).

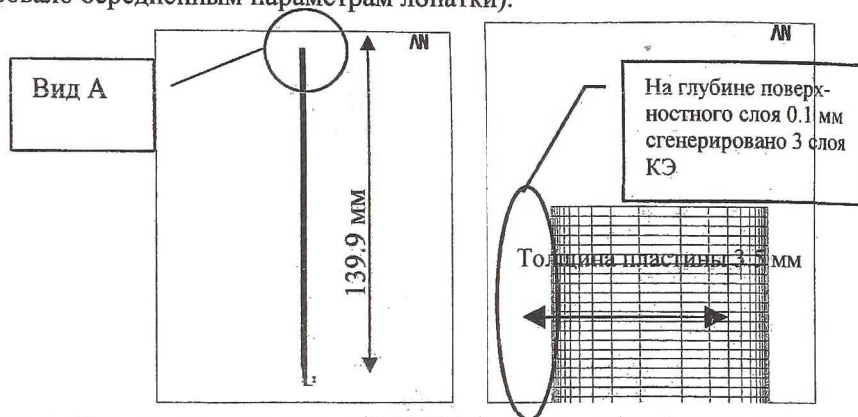


Рис.1. КЭ – модель пластины (SOLID42): слева - общий вид, справа – увеличенный

По глубине поверхностного слоя в 0,1 мм было сгенерировано 3 слоя конечных элементов (КЭ), которые нагружались тензором напряжений, вдоль оси пластины по длине (σ_y) соответствовала уровню остаточных напряжений на соответствующей глубине эпюры в поверхностном слое (см. рис. 2).

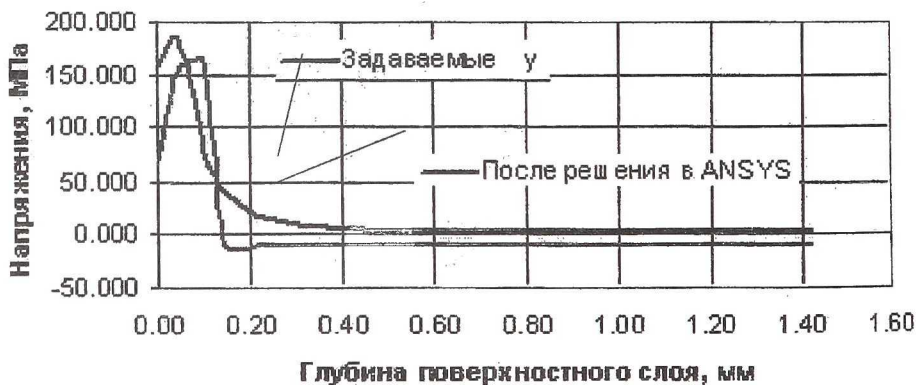


Рис. 2. Распределение напряжений по глубине поверхностного слоя в пластине и лопатке задаваемые и после решения упругой задачи в ANSYS

Ось Y глобальной системы координат направлена по высоте пластины. После задания напряжений по слоям конечных элементов решалась упругая задача о получении эпюры напряжений по всей толщине в резуль-

тате приложения начальных напряжений в трех слоях КЭ. В данной модели в качестве свойств материала задавались модуль упругости, коэффициент Пуассона в соответствии с рабочей температурой ЭХО (20...40°C). Для формирования и последующего считывания файла начальных напряжений были созданы 3 выборки элементов, каждая из которых содержала соответствующий слой элементов. Выборки имели имена слоев: LAYER1, LAYER2, LAYER3. Для записи трех файлов (по количеству слоев, в которых задавались начальные напряжения), содержащих номера конечных элементов запускался макрос *writing*. Для записи файла Init.Str.txt, в котором последовательно записываются начальные напряжения для элементов, содержащихся в выборках LAYER1 (2,3) запускалась программа Init.Str.exe. Результатом ее выполнения явился текстовый файл начальных напряжений, пригодный для считывания. Считывание осуществлялось путем выборки, содержащей только слои, в которых задаются начальные напряжения. С помощью команды ISFILE, READ In.Str.txt.0 считывался файл начальных напряжений, который находился в рабочей директории. Перед запуском на решение включается возможность записи файла начальных напряжений с именем Jobname.ist., как результатов решения структурного анализа с помощью команды ISWRITE,on. Решение задачи — эпюра распределения напряжений по глубине поверхностного слоя представлена на рис. 2. Незначительная разница эпюр за счет сжимающих реактивных напряжений в сердцевине пластины не существенна, т. к. их доля всего 5 % от растягивающих в поверхностном слое.

На следующем этапе осуществлялось решение задачи о деформации оси пера лопатки после снятия слоя с остаточными напряжениями. Была создана конечно — элементная модель пера лопатки, состоящая из конечных элементов SOLID45 (кирпичи). КЭ модель ориентировалась так, чтобы ось Y глобальной системы координат совпадала с прямой, проведенной через центры тяжести корневого и периферийного сечения пера (рис.3). Для получения заданного поля остаточных напряжений на глубине поверхностного слоя 0.1 мм было сформировано три слоя КЭ. Нагружение действующими остаточными напряжениями в пере производилось в соответствии с методикой для пластины. То есть, были заданы начальные напряжения в трех поверхностных слоях в соответствии с действующими остаточными напряжениями (рис. 2). После решения упругой задачи в ANSYSe было получено распределение остаточных напряжений в пере лопатки (рис.2). Для моделирования съема слоя материала с поверхности пера делалась выборка элементов и узлов, принадлежащих объему сердцевины пера после съема поверхностного слоя (или можно сделать элементы и узлы поверхностного слоя неактивными). Задача запускалась на решение, после ее завершения производилась необходимая постпроцессорная обработка результатов.

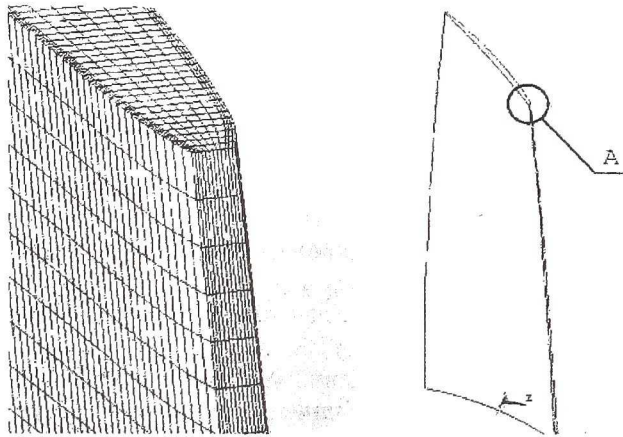


Рис. 3. Конечно-элементная модель компрессорной лопатки

В результате были получены деформации пера лопатки в виде перемещений центров тяжести профилей пера по высоте лопатки (Рис.4).

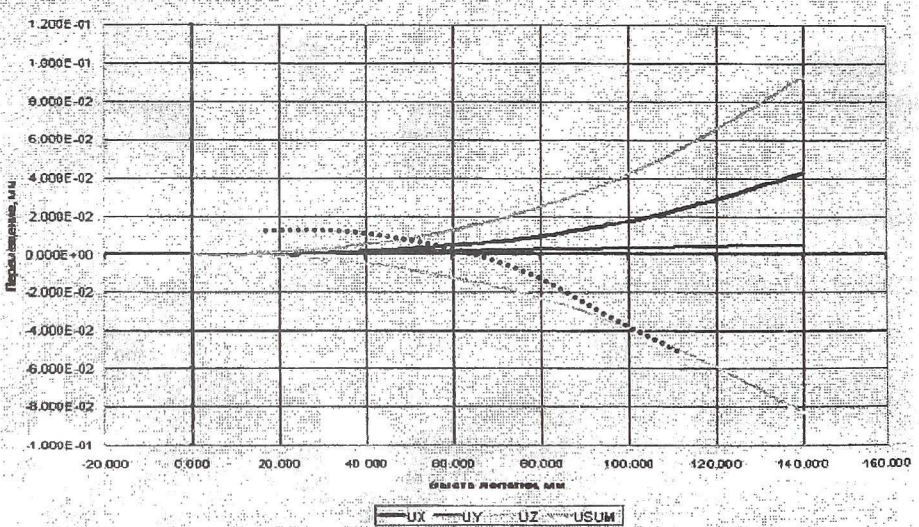


Рис.4. Перемещение центров тяжести профилей пера лопатки в зависимости от высоты лопатки мм по осям OX - (UX), OY - (UY), OZ - (UZ), суммарные - (USUM), --- измеренные после съема слоя 0.1 мм на лопатках компрессора из ЭИ961

Из рис.4 видно, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными ранее экспериментально.

Вторым способом моделирования остаточных напряжений в поверхностном слое является способ связанного термоструктурного анализа с помощью КЭ модели комплекса ANSYS. В его основу положено известное положение о том, что с помощью термообработки детали с определенными режимами в поверхностном слое детали можно получить некоторые остаточные напряжения. Знак напряжений и их величина (форма эпюры) зависит от режима термообработки. Величина подводимого тепла, скорость его подвода и скорость последующего охлаждения – это те параметры, изменяя которые можно получить нужную эпюру остаточных напряжений. Для этого был проведен ряд итераций подбора режимов термообработки, при этом последовательно производился тепловой нестационарный анализ детали. В качестве нагрузки в тепловом анализе использовался конвективный теплообмен, определяемый коэффициентом теплоотдачи и средней температурой среды, а в структурном анализе узловая температура по результатам теплового анализа и закрепление. В качестве модели использовалась та же пластина, что описана выше. Для проведения анализа задавались теплофизические и структурные свойства материала модели в зависимости от температуры: теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона, а также зависимости деформирования материала от температуры (по терминологии ANSYS - общие мультилинейные кривые, кинематическое упрочнение). В каждом шаге итерации были приняты следующие изменения граничных условий конвективного теплообмена во времени (табл.1).

Таблица 1

Изменение граничных условий конвективного теплообмена во времени

Номер итерации	1					
Коэф. теплоотдачи, Вт/м ² Град	80000	80000	80000	80000	50	50
Средняя температура среды, °С	600	600	600	600	20	20
Время, с	0.00	0.25	1.00	10.00	60	1200
Номер итерации	2					
Коэф. теплоотдачи, Вт/м ² Град	130000	130000	130000	130000	50	50
Средняя температура среды, °С	600	600	600	600	20	20
Время, с	0.00	0.25	1.00	10.00	60	1200
Номер итерации	3					
Коэф. теплоотдачи, Вт/м ² Град	160000	160000	160000	160000	50	50
Средняя температура среды, °С	600	600	600	600	20	20
Время, с	0.00	0.25	1.00	10.00	60	1200

Тепловой нестационарный анализ проводился в следующем порядке:

1. Строилась КЭ модель пластины из тепловых элементов PLANE55

2. Задавались свойства материала ЭИ961 теплофизические и механические.
3. Создавалась компонента, содержащая узлы модели, лежащие на поверхности пластины (с помощью команды CM, Sname, Entity).
4. Создавался командный файл, содержащий команды ANSYS, для проведения нестационарного теплового анализа в соответствии с программой теплового нагружения в каждом шаге итерации.
5. Проводился тепловой нестационарный анализ.

Результатом каждого шага итерации теплового нестационарного анализа являлся файл *.rth, содержащий узловые температуры на каждом шаге решения. Эти результаты затем использовались в структурном нестационарном анализе, путем непосредственного приложения узловых температур из предварительно проведенного теплового анализа (из файла *.rth) и закреплением пластины. В связи с тем, что по результату этого анализа необходимо определить величину остаточных напряжений на поверхности детали, то искомой величиной напряжений будут напряжения на последнем шаге (после снятия тепловой нагрузки, т. е. после полного остывания детали).

На рис. 5 показаны полученные в результате структурного анализа распределения остаточных напряжений по глубине пластины в каждом из трех шагов итерации. Как видно из рисунка, полученные в последнем шаге

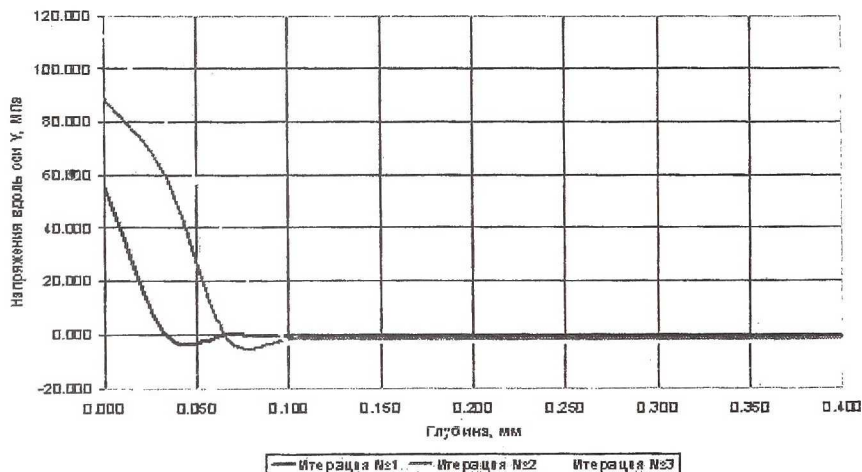


Рис.5. Распределения напряжений по глубине поверхностного слоя, полученные в трех итерациях структурного анализа

итерации распределения остаточных напряжений по глубине наиболее близко описывают действительную, полученную экспериментально на об-

разцах (рис.2). Однако начальный участок смоделированной эпюры имеет незначительные отличия – в ней отсутствует характерный подслоный максимум. Подводя итоги, можно отметить следующее.

В работе показаны два метода моделирования остаточных напряжений в поверхностном слое с помощью КЭ комплекса ANSYS. Первый – метод непосредственного задания величины начальных напряжений (с помощью начальных напряжений In.Stress). Второй - метод моделирования с помощью связанного нестационарного термоструктурного анализа (моделирование “теплового удара”).

Сравнивая оба метода с точки зрения их практического использования на конкретной задаче, можно отметить, что для КЭ моделей, состоящих из большого числа объемных элементов наиболее приемлемым является метод с использованием начальных напряжений, как наиболее быстрый, а часто и единственно возможный. Дело в том, что при проведении структурного анализа модели, состоящей более, чем из 200...250 тыс. КЭ. Результаты моделирования съема поверхностного слоя с остаточными напряжениями показали, что деформационные кривые хорошо согласуются с экспериментальными данными.

УСКОРЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ КОРРОЗИИ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГТД

Гишваров А.С., Давыдов М.Н.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

В условиях постоянного роста надежности и ресурса газотурбинных двигателей особую актуальность приобретают вопросы ускоренной оценки ресурсных возможностей основных элементов двигателя, что позволяет, в конечном итоге, более оперативно управлять их надежностью и ресурсом, сокращая временные и материальные затраты. Известно, что надежность и ресурс ГТД определяются в основном элементами «горячей» части двигателя (рабочими и сопловыми лопатками, дисками и т.д.), подверженными действию статического, циклического, повторно-статического и усталостного нагружений, а для лопаток также действию процессов газовой коррозии.

В данной работе рассматривается метод ускоренного моделирования высокотемпературной сульфидно-оксидной газовой коррозии лопаток ГТД, выполненных из жаропрочного сплава ЖС6К.

Моделирование проводилось на сопловых лопатках 1 ступени турбины вспомогательного газотурбинного двигателя ТА-6А, изготовленных из сплава ЖС6К. Основная цель исследования сводилась к получению ре-