

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИИ ПЕРА ЛОПАТКИ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Смирнов Г.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Электрохимическая размерная обработка пера является важнейшей операцией технологического процесса изготовления лопаток компрессора с точки зрения обеспечения заданной точности взаимного расположения пера лопатки относительно замка.

Проектирование операции ЭХО обычно сводится к решению нескольких основных задач: подбору оптимального состава электролита, обеспечивающего, выявлению оптимальных режимов обработки, выработку требований к заготовке под ЭХО. Решение каждой из этих задач является плодом значительного объема трудоемких и дорогостоящих исследований. Не умаляя важности каждого из составляющих решений, отметим, что при разработке требований к заготовке приходится охватывать исследованиями всю предшествующую обработку пера, начиная от заготовительного этапа как по части припуска по перу и его неравномерности, так с точки зрения величины, знака и характера распределения остаточных напряжений в поверхностном слое. Дело в том, что на точность формообразования пера после ЭХО существенное влияние оказывает именно уровень и характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое пера перед ЭХО. Поэтому для ответа на вопросы о величине минимального припуска и его максимально допустимой неравномерности по перу перед ЭХО, а также об оптимальной обработке пера под ЭХО требуется объемные экспериментальные исследования на образцах и на натуральных лопатках, которые обычно под силу коллективу исследователей разного профиля в течение весьма длительного времени. Нами была поставлена задача с помощью современных средств компьютерного моделирования разработать достаточно простую в использовании стандартными ПЭВМ методику определения деформации оси пера лопатки в результате удаления слоя с локализованными в нем остаточными напряжениями. Эпюра действующих остаточных напряжений соответствовала разнице эпюр до и после соответствующей обработки. Данная методика помогла бы осуществить быстрый анализ поведения пера лопатки после ЭХО при различных исходных эпюрах остаточных напряжений, соответствующих различным методам предварительной обработки пера. Таким образом, моделированием заменялась бы самая трудоемкая и дорогостоящая часть исследования на натуральных лопатках. При этом открывалась возможность

многовариантного проектирования технологии предварительной обработки пера различных типоразмеров лопаток с оценкой ожидаемой точности расположения пера относительно замка после ЭХО. В качестве средства создания такой методики был использован программный комплекс Ansys 5.7. Задача об определении деформации оси пера лопатки состоит из трех относительно самостоятельных частей. Первая, и наиболее сложная часть – задание остаточных напряжений в поверхностном слое модели. Оно может быть решено достаточно просто и быстро с помощью нагружения начальными напряжениями (Initial Stress Loading), то есть, задать начальные напряжения, как нагрузку. 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 эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое отработывалось на модели – тонкой пластине. Толщина ее соответствовала средней толщине лопатки (3,5 мм). 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. 1).

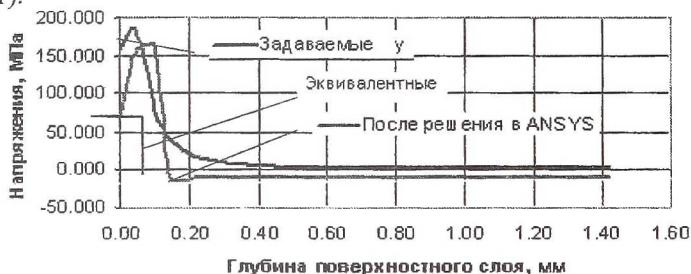


Рис. 1. Распределение напряжений по глубине поверхностного слоя в пластине и лопатке задаваемые и после решения упругой задачи в ANSYS, эпюра эквивалентных напряжений на глубине слоя 0.1 мм

После задания напряжений по слоям конечных элементов решалась упругая задача о получении эпюры напряжений по всей толщине в результате 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 С). Решение задачи – эпюра напряжений по глубине поверхностного слоя представлена на рис. 1.

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. 2).

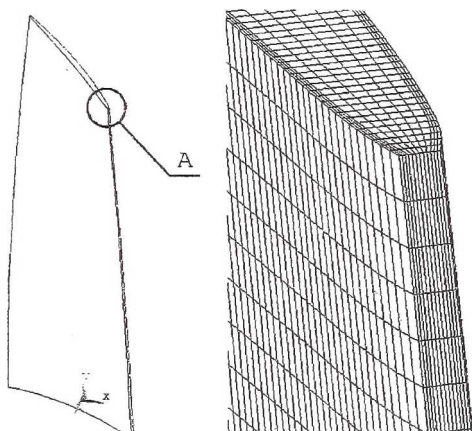


Рис. 2. Конечно-элементная модель компрессорной лопатки

Для получения заданного поля остаточных напряжений на глубине поверхностного слоя 0.1 мм было сформировано три слоя КЭ. Задание остаточных напряжений в пере производилось в соответствии с методикой для пластины. То есть были заданы начальные напряжения в трех поверхностных слоях в соответствии с заданным распределением остаточных напряжений (см. рис. 1). После решения упругой задачи в ANSYSe было получено распределение остаточных напряжений в пере лопатки (рис. 1). Для моделирования съема слоя материала с поверхности пера делалась выборка элементов и узлов, принадлежащих объему пера после съема поверхностного слоя. В результате были получены деформации пера лопатки в виде перемещений центров тяжести профилей пера по высоте лопатки (рис. 3). Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными ранее экспериментально.

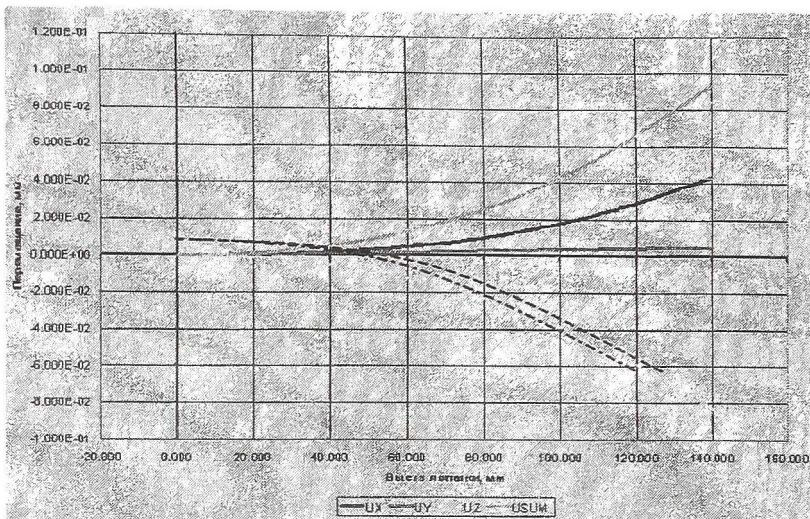


Рис. 3. Перемещение центров тяжести профилей пера лопатки в зависимости от высоты лопатки мм по осям OX (UX), OY - (UY), OZ - (UZ), суммарные - (USUM),. ---- - экспериментально измеренные после съема слоя 0.1 мм; - - - - - рассчитанные с применением эквивалентной эпюры напряжений по оси OZ

Главным недостатком используемой методики решения задачи является резко возрастающая сложность задания начальных напряжений при усложнении формы эпюры остаточных напряжений.

Однако, с точки зрения технологии ЭХО для оценки конечной деформации пера не важен вид эпюры остаточных напряжений, гораздо важнее их общий уровень, определяющий величину деформаций. В работах В.Ф. Павлова доказывается возможность замены в расчетах деформации реально полученной эпюры остаточных напряжений упрощенной эквивалентной по величине конечной деформации. В этом случае реальная эпюра заменяется эквивалентной простой формы, например, прямоугольника. Основание прямоугольника соответствует глубине снимаемого слоя, а высота – интегральной средней, т. е. частному от деления площади под кривой реальной эпюры на глубину снимаемого слоя (рис.1,г). Тогда задача по моделированию процесса деформирования пера лопатки существенно упрощается. Во-первых, вместо нескольких слоев КЭ в модели (в рассмотренном выше случае их было три) достаточно иметь один слой, нагруженный эквивалентными остаточными напряжениями. Во-вторых, объем последующей выборки элементов и узлов, моделирующей съем материала, также резко сокращается. В

результате машинное и операторское рутинное время на решение задачи уменьшается в несколько раз. Увеличение времени на предварительную обработку эпюры остаточных напряжений с целью получения эквивалентной, несопоставимо меньше получаемого выигрыша по времени. Нами был проведен расчет деформаций оси пера, в котором использовалась эпюра эквивалентных напряжений. Результаты расчета представлены на рис. 3. Сравнение результатов показывает высокую степень сходимости как с измеренными деформациями, так и с зависимостью, полученной моделированием при использовании реальной эпюры остаточных напряжений. Это свидетельствует о правомерности использования эквивалентной эпюры для ускорения и упрощения расчетов деформации. Кроме того, следует отметить, что использование эквивалентной эпюры является более методически верным. Так как эквивалентные напряжения объективно отражают суммарное воздействие всей эпюры, на рассматриваемой глубине исходя из методики их определения, нежели текущие значения напряжений, взятые из реальной эпюры и приложенные к каждому слою.

Таким образом, методика определения деформации после удаления слоя материала на пере лопатки с помощью ПК ANSYS 5.7 выглядит следующим образом.

1. Строится электронная модель пера лопатки, разбивается на конечные элементы, например SOLID 45.
2. Задаются свойства материала лопатки при температуре ЭХО: модуль упругости (EXX), плотность (DENS); коэффициент Пуассона (NUXY).
3. Вычисляется эпюра действующих остаточных напряжений (разность между эпюрами до и после анализируемой обработки).
4. Определяется эквивалентная эпюра напряжений.
5. К верхнему слою элементов прикладываются эквивалентные напряжения, толщина верхнего слоя равна величине съема.
6. Закрепляется корневое сечение и решается упругая задача.
7. Делается выборка элементов и узлов объема пера без верхнего слоя, в результате решения выводятся данные по перемещениям центров тяжести сечений пера лопатки по трем основным осям. Данная методика может быть использована в качестве универсального инструмента при анализе вновь проектируемого технологического процесса, при назначении того или иного метода обработки пера с целью оценки ожидаемой деформации пера. При этом, требуется только электронный чертеж лопатки и экспериментальные эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое до и после рассматриваемой обработки.