

Для прогнозирования уровня надежности паяного соединения была использована математическая модель на основе  $\chi^2$  – распределения, которая позволила дать количественную надежность оценку паяного соединения при относительно малом времени испытаний и малой степени выборки по результатам испытаний, а также установить связь традиционных показателей надежности с полученными результатами испытаний. На языке теории групп можно сказать, что множество результатов испытаний выделяет с помощью оператора  $\chi^2$  ряд подмножеств. Элементы ряда образуют аддитивную группу. Выделение любого частичного объединения или хотя бы одного из элементов ряда дает аддитивную же подгруппу.

Проведение ускоренных испытаний с вышеизложенной математической

моделью позволило достаточно точно оценить возможность использования заданных параметров технологического процесса изготовления электронных узлов специального назначения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководящие указания по ускоренным методам испытаний на надёжность паяных соединений технологии поверхностного монтажа. IPC-SM-785. - Association Connecting Electronics Industries, 1992.- 44с.

Федоров, В.К. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств [Текст] / В.К. Федоров, Н.П. Сергеев, А.А. Кондрашин. –М.: Техносфера, 2005.-504 с.

УДК 621.9.047

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПЕРА ЛОПАТОК ГТД С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИИ ОТ ДЕЙСТВИЯ ПОТОКА ЭЛЕКТРОЛИТА

© 2012 Нехорошев М.В., Проничев Н.Д.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева  
(Национальный исследовательский университет), Самара

## INVESTIGATION OF LAWS ELECTROCHEMICAL FORMATION PEN BLADE GTE WITH REGARD TO STRAIN OF THE FLOW OF ELECTROLYTE

© 2012 Nekhoroshev M.V., Pronichev N.D.

In work the results of computer simulation of electrochemical shaping the blade turbine engines. The developed method is based on the theory of the electric field in the electrochemical cell and takes into account factors that influence the shaping of complex surfaces. It is based on the finite element method with the joint use of ANSYS and FLUENT software and allows you to define the geometry of the blade in a non-uniform removal allowance. The adequacy of the developed method is confirmed by comparing the results of physical experiments and computer simulation of electrochemical machining (ECM).

Формообразование, процесс, электрохимия, лопатка, математическая модель

Модель разрабатывалась для условий электрохимического формообразования при обработке с подвижным катодом-инструментом (КИ).

Такая схема широко применяется в производстве.

Положение заготовки жёстко связано с неподвижной системой координат, изменения скорости

растворения протекают на движущейся границе. Поэтому обрабатываемая поверхность заготовки разбивается на конечное число элементарных участков. Эти элементарные участки перемещаются относительно выбранной системы координат согласно описанным закономерностям. Межэлектродный зазор  $Z$  (МЭЗ) имеет переменное значение по длине межэлектродного канала.

Расчет перемещения точек растворяющейся поверхности заготовки проводится в дискретном режиме, т.е. приняты допущения, что: в пределах малого промежутка времени  $\Delta t$  зазор в каждой расчетной точке остается постоянным.

За промежутки времени  $\Delta t$  КИ переместится на расстояние  $\Delta Z_K$ , за это же время точки поверхности заготовки переместятся на расстояния  $\Delta Z_a$ .

Известно, что скорость растворения поверхности анода при ЭХО  $V_3$  прямо пропорциональна плотности тока на аноде:

$$V_3 = \frac{B_T \cdot \varepsilon}{\rho} i_a, \quad (1)$$

где  $B_T$  – выход по току;

$\varepsilon$  – электрохимический эквивалент;

$i_a$  – плотность тока на аноде;

$\rho$  – удельная плотность материала.

Количество расчетных точек на поверхности анода позволяет принять закон изменения профиля между соседними точками близким к линейному при  $t=0$ ;  $\varphi_K=0$ ;  $\varphi_A=U$ .

Следовательно, зная распределение плотности тока по поверхности анода, можно найти распределение скоростей движения точек анода в процессе формообразования. В процессе растворения поверхности заготовки снимается неравномерный припуск и происходит перераспределение скоростей растворения в различных точках. Такое моделирование позволяет провести программный комплекс ANSYS.

Исходными данными для анализа служат удельное сопротивление среды (электролита) и значения потенциалов на электродах.

Важно учесть, что с течением времени в связи с изменением формы МЭК (в результате растворения анода и

перемещения КИ) состояние системы меняется, и функция распределения потенциала  $U$  в пространственных переменных постоянно принимает новые значения. При решении задач ЭХО удобно разбить все время обработки на малые промежутки  $\Delta t$ . В течение каждого такого промежутка времени параметры процесса считаются постоянными, а катод-инструмент – неподвижным. Следовательно, процесс растворения при постоянном движении катода-инструмента раскладывается на последовательность кратковременных режимов с неподвижным катодом. Такое преобразование называется дискретизацией по времени.

Однако в процессе ЭХО на заготовку оказывает силовое влияние поток электролита, вызывающий деформации заготовки. Эти деформации оказывают существенное влияние на точность формообразования пера лопатки ГТД. В связи с этим в разработанную методику была включена модель, позволяющая оценивать величину деформаций заготовки в зависимости от параметров потока электролита.

Следует отметить, что разработанная модель справедлива для лопаток любого размера. Характер обработки лопаток различных типоразмеров определяется диапазоном давлений и зазоров, используемых при обработке данных классов.

Расчетная модель включает в себя две итерации:

1. решение гидродинамической задачи;
2. расчет величины деформаций.

Первая итерация заключается в решении гидравлической задачи и получении картины течения жидкости в МЭЗ при ЭХО (см. рисунок 1), и как следствие распределения давлений на спинке и корытце лопатки. Для моделирования гидродинамической задачи использовался комплекс «FLUENT». Программа «FLUENT» состоит из двух модулей: проектного – «GAMBIT», предназначенного для создания конечно-элементной модели и непосредственно расчетного – «FLUENT».

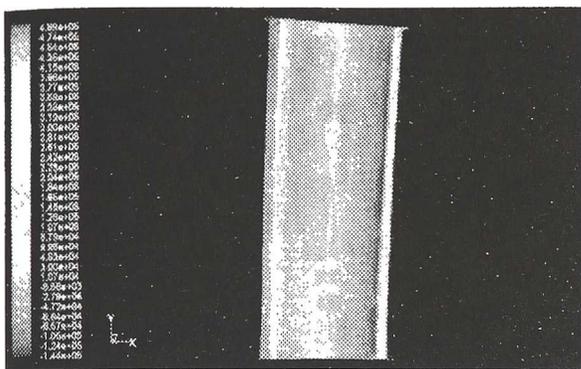


Рисунок 1 – Картина распределения давления по МЭЭ

Так как перо лопатки имеет аэродинамический профиль, то формируется разность давлений по спинке и корыту, приводящая к возникновению подъемной силы, что приводит к деформациям лопатки под действием гидравлических сил. На второй итерации разность давлений, полученная при расчете во FLUENT, прикладывалась в качестве граничных условий при решении задачи в ANSYS (см. рисунок 2).

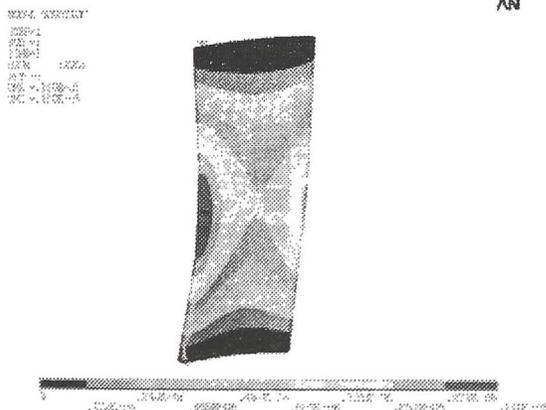


Рисунок 2 – Картина распределения деформаций по перу лопатки

Для автоматизации расчета в программах ANSYS и FLUENT был написан макрос, который обеспечивает выполнение условий моделирования (рисунок 3).

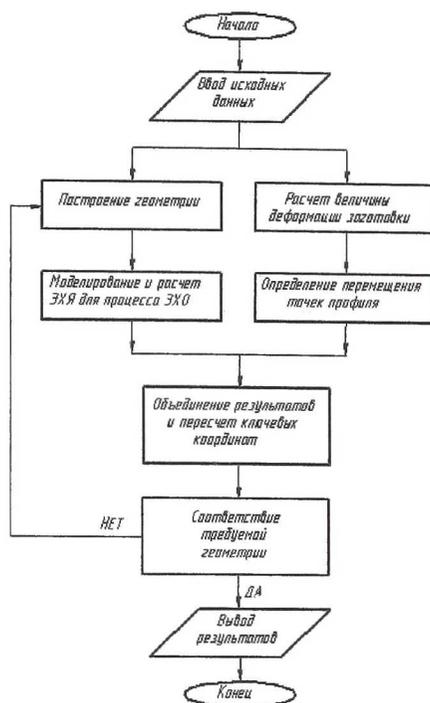


Рисунок 3 – Блок-схема моделирования электрохимического формообразования пера лопатки ГТД

По разработанной методике было произведено моделирование ЭХО для сечений пера лопатки ГТД (см. рисунок 4).

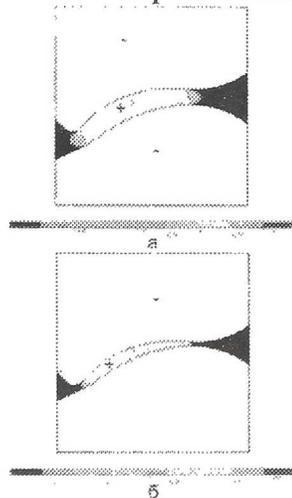


Рисунок 5 – Результаты моделирования пера лопатки ГТД: а – на начальном этапе обработки (t=0); б – в процессе обработки (t=6 мин)

Проведенные исследования позволили создать методику компьютерного моделирования электрохимического формообразования пера лопатки ГТД. Полученные результаты позволяют создать программный комплекс по моделированию данного процесса, что позволит сократить время и затраты при технологической подготовке производства при вводе новой номенклатуры лопаток.