

УДК 621.9.047

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД

© 2012 М. В. Нехорошев, Н. Д. Проничев

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

В статье рассмотрены модели, позволяющие проводить расчет электрического поля в любой труднодоступной зоне и определять фактическую длину линий тока, которая определяет скорость растворения анода. Разработанные модели положены в основу созданных отдельных внешних модулей по моделированию ЭХО сложных поверхностей.

*Формообразование, процесс, электрохимия, лопатка, программный модуль.*

Модель разрабатывалась для условий электрохимического формообразования при обработке с подвижным катодом-инструментом (КИ). Такая схема широко применяется в производстве.

Положение заготовки жестко 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. принято допущение: в пределах малого промежутка времени  $\Delta t$  зазор в каждой расчетной точке остается постоянным.

За промежуток 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  $V_\varepsilon$  прямо пропорциональна плотности тока на аноде:

$$V_\varepsilon = \frac{B_T \cdot \varepsilon}{\rho} i_A, \quad (1)$$

где  $B_T$  – выход по току;

$\varepsilon$  – электрохимический эквивалент;

$i_a$  – плотность тока на аноде;

$\rho$  – удельная плотность материала.

Задаваемое 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 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 МЭЗ (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 можно принять 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.

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 (рис. 1) и 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 расчетного - «FLUENT».

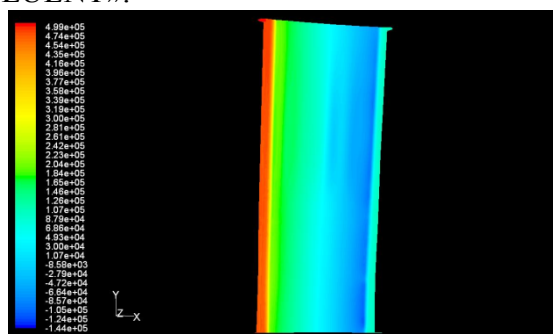


Рис. 1. Картина распределения давления по МЭЗ

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 (рис. 2).

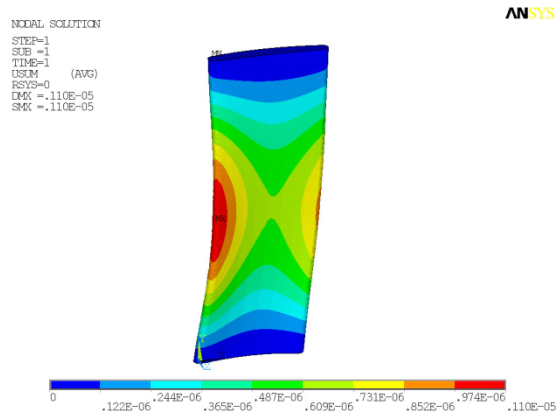


Рис. 2. Картина распределения деформаций по перу лопатки

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

По разработанной методике было произведено моделирование ЭХО для сечений пера лопатки ГТД (рис. 3).

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

Для автоматизации расчетов в ANSYS был создан комплекс программных модулей по моделированию процесса электрохимического формообразования пера лопатки ГТД.

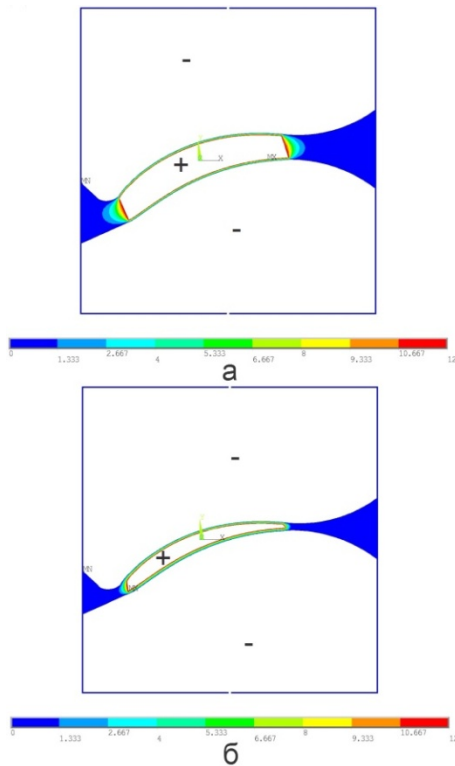


Рис. 3. Результаты моделирования пера лопатки ГТД: а - на начальном этапе обработки ( $t=0$ ); б - в процессе обработки ( $t=6$  мин)

В электронной модели реализованный программный код построен по блочному принципу. Вся модель разделена на логически завершенные этапы, называемые блоками. Это обеспечивает, с одной стороны, простоту ориентирования в теле программы, а с другой, и позволяет вносить поправки в каждый отдельный блок без изменения остальных, что дает возможность для последующих модификаций.

Электронная модель представляет собой пакет, состоящий из трёх взаимосвязанных модулей.

1. *Внешний модуль ввода исходных данных.* Модуль реализован программными средствами среды Borland Delphi, использующей язык программирования Object Pascal. Модуль выполняет две задачи. Первая – создание файла исходных данных, в которой заносится информация о технологических параметрах эксперимента. Вторая и более трудоемкая – расчет ключевых координат геометрии модели на основании данных о профиле лопатки с чертежа. Модуль осуществляет поворот системы координат на заданный угол с пересчетом координат спинки и корытца исходной лопатки, а также

создает массивы точек профиля с учетом припуска под обработку, рабочего зазора и поля допуска. Все эти данные в дальнейшем значительно оптимизируют работу основного модуля, связанную с построением геометрии электродов.

2. *Внешний модуль первичной геометрии.* Наиболее важными участками при построении геометрии модели являются сплайны профилей корытца и спинки анода-заготовки и соответствующих им участков катодов-инструментов. При изменении исходных данных о геометрии лопатки меняются координаты точек, лежащих на указанных сплайнах. При этом независимо от количества характерных точек, указанных на чертежах различных лопаток, программа должна сохранять работоспособность и адекватность построения модели.

3. *Основной модуль.* Он представляет собой набор макросов ANSYS, написанных на языке APDL. Главный макрос включает в себя программный код, добавляющий на панель инструментов кнопку быстрого запуска и запускающий остальные блоки-макросы. В тексте главного макроса описан цикл, который при необходимости приводит к многократному выполнению соответствующих блоков до тех пор, пока не будет выполнено условие конца обработки.

Разработанный модуль позволяет проводить эксперименты по исследованию производительности процесса ЭХО и располагает для этого широкими возможностями для ввода данных. Пользователем задается геометрия обрабатываемой детали и основные технологические параметры режима обработки: рабочий зазор, материал лопатки и электролит, напряжение на электродах, параметры потока электролита.

Допускается моделирование процесса обработки в первичном поле распределения потенциалов (без учета поляризации), во вторичном поле, учитывающем перераспределение потенциалов, а также с учетом гидродинамических нагрузок.

В результате выполнения работы получены следующие результаты.

1. Разработана методика, позволяющая производить в программе

ANSYS расчеты электрических полей в электрохимической ячейке в условиях ЭХО. Проведенные расчеты в программе ANSYS подтвердили результаты, полученные на электропроводной бумаге, и показали, что компьютерная модель полностью отражает закон распределения потенциалов (токов) в электрохимической ячейке.

2. На основании проведенных исследований была создана база данных, содержащая характеристики материалов и электролитов, кривые выхода по току и поляризационные кривые. Данные графики заданы в табличной форме для последующих итерационных расчетов в ANSYS.

3. Разработана методика расчета в программе ANSYS посредством макросов. Данная методика облегчила расчет и его автоматизацию в программе ANSYS. Написаны макросы, обеспечивающие выполнение условий моделирования.

4. Разработаны программные модули для комплекса программ с целью моделирования процессов формообразования типовых элементов и сложных поверхностей деталей (перо лопатки ГТД) электрохимическим методом. Проведено исследование работоспособности и применимости разработанных модулей путем сравнения с результатами реального эксперимента. Полученный комплекс программ может использоваться на производстве технологом-электрохимиком, что позволит существенно сократить время на подготовку производства.

#### Библиографический список

1. Шманев, В.А. Технология электрохимической обработки деталей в авиадвигателестроении [Текст]: Учебное пособие./ В.А. Шманев, В.Г. Филимошин, А.Х. Каримов и др. – Москва: «Машиностроение», 1986. – 168 с.
2. Мороз, И.И. Электрохимическая обработка металлов [Текст]: Учебное пособие./ И.И. Мороз и др. – Москва: «Машиностроение», 1969. – 208 с.
3. Давыдов, А.Д. Высокоскоростное электрохимическое формообразование

[Текст]: Учебное пособие./ А.Д. Давыдов, Е.Н. Козак – Москва: Наука, 1990. – 272 с.

4. Щербак, М.В. Основы теории и практики электрохимической обработки металлов и сплавов [Текст]: Учебное пособие / М.В. Щербак и др. – Москва: «Машиностроение», 1981. – 263 с.

5. Головачёв, В.А. Электрохимическая размерная обработка деталей сложной формы [Текст]: Учебное пособие. / В.А. Головачёв и др. – Москва: «Машиностроение», 1969. – 198 с.

6. Де Барр, А.Е. Электрохимическая обработка [Текст]: Учебное пособие. / А.Е. Де Барр, Д.А. Оливер – Москва: «Машиностроение», 1975. – 183 с.

7. Wen-Ta, Tsai. Electrochemical polarization and pitting behaviour of Fe-Al-Mn alloys in chloride solutions [Text]: [Journal](#). / Wen-Ta Tsai, Jing-Bang Duh, Ju-Tung Lee – [Journal of Materials Science](#), 1987, №10, p. 3517-3521.

8. Мирзоев, Р.А. Катодный потенциал и падение напряжения в прикатодном слое электролита в процессе размерной электрохимической обработки [Текст]: Журнал. / Р.А. Мирзоев, Н.К. Свечкопал, А.Г. Лукина – Физика и химия обработки материалов, 1971, №5. С. 131 – 134.

9. Антропов, Л.И. Теоретическая электрохимия [Текст]: Учебное пособие./ Л.И. Антропов – Москва: «Высшая школа», 1969. – 512 с.

10. Pattavanitch, J. Modelling of the electrochemical machining process by the boundary element method [Text]: [Journal](#)./ J. Pattavanitch, S. Hinduja and J. Atkinson – [CIRP Annals - Manufacturing Technology](#), 2010, V. [59](#), p. 243-246.

11. Гнусин, Н.П. и др. Физическая и математическая постановка задачи об электрических полях в электролитах [Текст]: Сборник трудов «Основы теории расчета и моделирования электрических полей в электролитах»./ Н.П. Гнусин, Н.П. Поддубный, А.И. Маслий – Новосибирск: «Наука», 1972.

## **DEVELOPMENT OF AUTOMATED SOFTWARE MODULE FOR MODELLING OF FORMING PART OF ELECTROCHEMICAL GTE**

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

Samara State Aerospace University  
named after S.P. Korolyov (National Research University)

In the article the models that allow the calculation of the electric field at any inaccessible area and to determine the actual length of the flow lines, which determines the rate of dissolution of the anode. The developed models as a basis to create a separate plug-ins for modeling complex surfaces ECHO.

*Forming of process, electrochemistry, shoulder, software module.*

### **Информация об авторах**

**Нехорошев Максим Владимирович**, ассистент кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [maxnogood@gmail.com](mailto:maxnogood@gmail.com). Область научных интересов: технология производства авиадвигателей.

**Проничев Николай Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [pdla@ssau.ru](mailto:pdla@ssau.ru). Область научных интересов: технология производства авиадвигателей.

**Nekhoroshev Maxim**, Assistant Professor of Production of aircraft engines department Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [maxnogood@gmail.com](mailto:maxnogood@gmail.com). Area of research: Technology of aeroengine.

**Pronichev Nikolai**, Ph.D., Professor of Production of aircraft engines department Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [pdla@ssau.ru](mailto:pdla@ssau.ru). Area of research: Technology of aeroengine.