

УДК 621.9.047

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

© 2014 М.В. Нехорошев, Н.Д. Проничев, Г.В. Смирнов

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

Лопатки компрессора являются наиболее сложными и ответственными деталями газотурбинного двигателя, что обуславливается стоимостью их изготовления, а также требованиями по надёжности и ресурсу. Перспективным способом изготовления лопаток является импульсная электрохимическая обработка (ЭХО), основные преимущества которой заключаются в отсутствии силового и теплового воздействия на обрабатываемую поверхность, в долговечности инструмента, в низких значениях параметров шероховатости при работе на высоких плотностях тока, в высокой точности копирования формы и в стабильности процесса при работе на достаточно малых межэлектродных зазорах. Изложены принципы для реализации модели электрохимического формообразования применительно к импульсной ЭХО, которые позволят реализовать инженерную методику имитации обработки и профилирование электрода-инструмента в условиях производства. При решении задачи электрохимического формообразования, с учётом факторов влияющих на процесс, предложен алгоритм описания процесса импульсной ЭХО, который базируется на применении численного метода при дискретизации обработки во времени и в пространстве. Данный алгоритм позволит автоматизировать профилирование электродов-инструментов при импульсной электрохимической обработке.

*Электрохимическая обработка, симуляция, детали газотурбинного двигателя, электролит.*

Развитие современного авиадвигателестроения требует применения новых высокопрочных материалов, разработки более сложных конструкций изделий, повышения технических требований к точности и качеству обрабатываемых поверхностей. Механическая обработка обладает целым рядом недостатков, в частности приводит к быстрому износу режущего инструмента, имеет ограничения по формообразованию сложнофасонных поверхностей, оказывает негативное силовое и температурное воздействие на обрабатываемую заготовку в зоне обработки. Технологические показатели при механической обработке в значительной степени зависят от физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Лопатки компрессора являются наиболее сложными и ответственными деталями газотурбинного двигателя (ГТД), что обусловлено стоимостью их изготовления, а также требованиями по надёжности и ресурсу. Перспективным способом изготовления лопаток следует признать при-

менение метода импульсной электрохимической обработки, основные преимущества которой формулируются следующим образом: отсутствие силового и теплового воздействия на обрабатываемую поверхность, долговечность инструмента, низкие значения параметров шероховатости при работе на высоких плотностях тока и высокая точность копирования формы и стабильность процесса при работе на достаточно малых межэлектродных зазорах (МЭЗ). При проектировании технологии ЭХО лопаток компрессора ГТД необходимо решить следующие основные задачи [1,2]:

- осуществить выбор состава электролита с учётом требуемой производительности, точности и качества обработанной поверхности;
- выбрать технологическое оборудование, исходя из площади обработки, электрических характеристик источника питания, кинематики станка и т.д.;

- назначить режимы обработки с учётом электрохимических характеристик системы «материал заготовки - электролит», а также величины и неравномерности припусков на обработку, точности геометрических параметров и т.д.;
- провести профилирование электрода-инструмента (ЭИ) для формообразования трактовых поверхностей лопатки;
- провести размерный анализ технологической системы и выбор схемы базирования;
- спроектировать технологическую оснастку с обеспечением защиты от травли поверхностей заготовки.

Данные задачи не поддаются теоретическому описанию в полной мере, так как процессы в межэлектродном промежутке являются очень сложными и могут быть решены лишь на основе системного подхода [2,3].

Накопленный опыт по созданию технологий ЭХО пера лопаток показывает, что расчёты профиля электрода-инструмента не обеспечивают требуемой точности. На производстве окончательную доводку операций ЭХО обеспечивают при опытной отработке, т.е. экспериментально дорабатывается профиль электрода-инструмента и корректируются режимы обработки.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что существующие методы проектирования операций электрохимического формообразования (ЭХФ) характеризуются низким качеством проектных решений, что приводит к необходимости выполнения большого объёма доводочных работ по корректировке формообразующих поверхностей ЭИ и уточнению режимов обработки и, как следствие, к снижению эффективности операций ЭХФ. Повысить эффективность проектирования операций сложного ЭХФ возможно с применением современных CAD/CAM/CAE систем, на основе единых трёхмерных геометрических моделей ЭИ и заготовки.

Целью работы являлось создание основ проектирования процессов объём-

ного электрохимического формообразования для повышения качества проектных решений, сокращения объёма доводочных работ, трудоёмкости и сроков технологической подготовки производства.

Поставленная в работе задача создания цифровой модели процесса анодного высокоскоростного растворения поверхности заготовки в условиях реализации импульсной электрохимической обработки является сложной, требует отработки специальных инженерных подходов и принятия корректных допущений [4]. Данный процесс на всех этапах его протекания остаётся нестационарным. При этом на поверхности анода при коротких импульсах проявляются специфические эффекты, связанные с тем, что ионизация металла в начальный момент растворения (в каждом импульсе) зависит от количества электричества, протекающего в данный момент времени в каждой точке поверхности. Имеется критическое (минимальное) количество электричества, обуславливающее начало растворения, т.е. в модели должна быть задана кинетика процессов, протекающих на аноде в каждой точке при заданной форме импульса. Кроме длительности импульса количество электричества в точке будет зависеть от величины электродной поляризации, выхода по току, электропроводности электролита (с учётом нагрева и газонаполнения), а также длины силовых линий между данной точкой анода и катодом (это линия, проходящая перпендикулярно к поверхности анода и эквипотенциалам электрического поля в зазоре).

Методом конечных элементов при использовании различных пакетов можно проводить моделирование электрических полей в электролите и находить распределение потенциалов и направления токов, но для получения достоверных результатов необходимо задать начальные и граничные условия, учитывающие кинетику электродных процессов для заданной системы «металл-электролит».

При разработке моделей высокого уровня, адекватно описывающих процес-

сы формообразования при ЭХО для практики, важно не только провести моделирование электрического поля при изменении формы анода, но и определить форму катода-инструмента, при которой будет достигаться требуемая точность обработанной поверхности детали (анода).

При решении поставленной задачи с учётом анализа, приведённого выше, был предложен алгоритм описания процесса импульсной ЭХО (рис. 1), который базировался на применении численного метода при дискретизации обработки во времени и в пространстве.

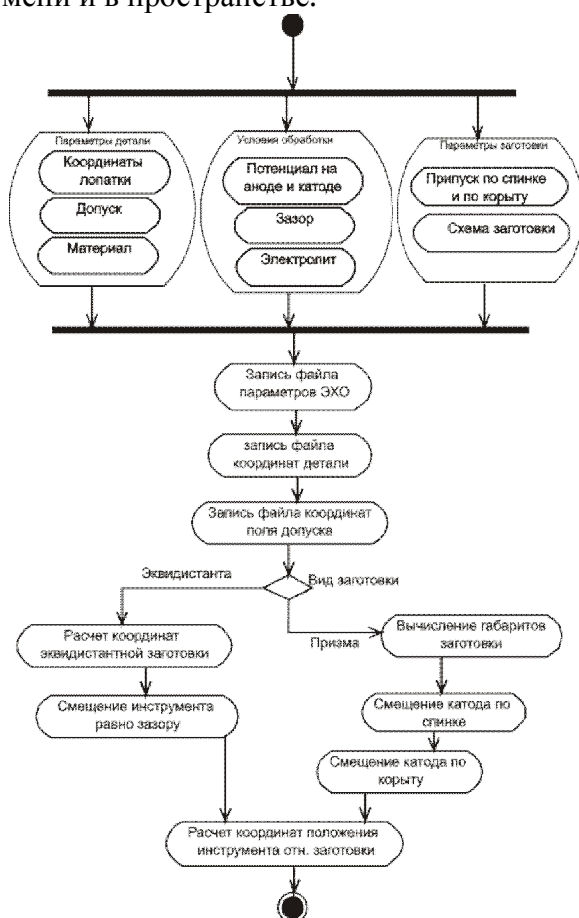


Рис. 1. Основной алгоритм электронной модели, реализуемой в среде ANSYS

Комплекс ANSYS состоит из ряда модулей, называемых процессорами, каждый из которых предназначен для реализации отдельных этапов проведения расчёта методом конечных элементов (КЭ): подготовка системы КЭ, выполнение расчёта, геометрическая интерпретации результатов. Комплекс ANSYS имеет один препроцессор, один процессор решения,

два постпроцессора и несколько вспомогательных процессоров.

Система организации функций комплекса ANSYS в виде модулей-препроцессоров, отчасти определяет структуру макросов параметрического моделирования процесса ЭХО. Каждый макрос предназначен для выполнения одним процессором. С другой стороны, для обеспечения управляемости программного кода, разработанные макросы реализуют законченный прецедент (этап прецедента) электронной модели.

На рис. 2 представлена диаграмма основного алгоритма подготовки, расчёта и получения результатов в среде ANSYS.

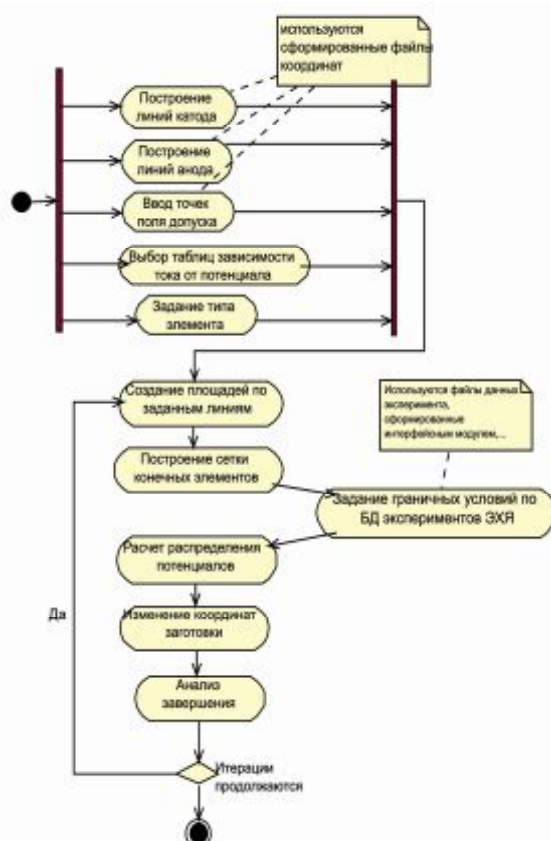


Рис. 2. Алгоритм электронной модели ЭХО, реализуемой в среде ANSYS для импульсной ЭХО

Рассмотрим расчётные блоки более подробно.

#### Блок материалов

Блок материалов представляет из себя базу данных, содержащую характеристики выбранных материалов и электролитов, зависимости выхода по току от

МЭЗ, зависимости тока от величины потенциалов на электродах. Зависимости заданы в табличной форме. Таблицы ANSYS – эффективное средство хранения данных. В случае запроса промежуточного значения, не содержащегося в явной форме в таблице, ANSYS интерполирует и выдаёт результат. Параметры нагружения, время дискредитации вводятся из файла параметров ЭХО и соответствуют значениям, введённым пользователем. Свойства электролита задаются через удельное сопротивление, определяемое из значений базы данных по коду электролита, указанному в файле параметров ЭХО.

Параметры материала заготовки определяются электрохимическим эквивалентом и плотностью материала, которые находятся из базы данных по коду материала, указанному в файле параметров ЭХО.

#### *Блок построения линий анода*

Исходные координаты точек анода вводятся из файла координат заготовки.

С помощью функций ANSYS по введенным координатам строится сплайн, который подвергается дискретизации на более мелкие отрезки (определяются координаты большего числа точек).

Полученные координаты соединяются линиями, образующими контур заготовки.

*Блок построения линий катода* полностью аналогичен *блоку построения линий анода*.

*Блок определения координат допуска*

Исходные координаты, соответствующие точкам лопатки с учётом верхнего и нижнего отклонений, вводятся из файла координат верхнего допуска и файла координат нижнего допуска.

#### *Блок задания типа элемента*

Для реализуемой модели необходим плоский (2-D) элемент. Из множества элементов, относящихся к магнитно-электрическому анализу, к плоским элементам относятся лишь Plane53, Plane121 и Plane230. После анализа элементов и их свойств выбран Plane230 как наиболее со-

ответствующий условиям решаемой задачи.

#### *Блок построения геометрии*

Используя массив сформированных линий модели, макрос строит замкнутые площади. Всего формируется 5 областей: 4 вспомогательных области вокруг катода и основная область, в которой размещается контур заготовки.

#### *Блок построения сетки КЭ*

Для построения сетки конечных элементов (КЭ) выбран свободный режим построения с размером ячейки 0,0002 м. Свободный режим построения сетки КЭ необходим, т.к. конфигурация анода, положение инструмента и размеры протока изменяются автоматически в процессе моделирования. Размер ячейки задаётся на основе проведения большого количества экспериментов.

Все вышеуказанные блоки выполняются препроцессором PREP7.

#### *Расчёт распределения потенциалов*

Расчёт по методу КЭ выполняется с помощью специального модуля ANSYS – SOLUTION.

В блоке выполняется задание нагрузок и определение граничных условий, затем запускается функция решателя ANSYS. Для задания нагрузок и определения граничных условий электронной модели выбран режим нагружения линий. На линиях катода и анода последовательно задаются напряжения с учётом их поляризации.

#### *Блок изменения контура заготовки*

Процесс формообразования анода рассматривается как последовательность малых отрезков времени. Поверхность анода представляется в виде совокупности точек.

За малый отрезок времени точки поверхности перемещаются в зависимости от плотности тока, возникающей на прилегающей области. В результате перемещения всех точек получается новая геометрия поверхности анода.

Алгоритм расчёта перемещения точек анода значительно влияет на резуль-

таты моделирования. На рис. 3 демонстрируется схема предлагаемого алгоритма.

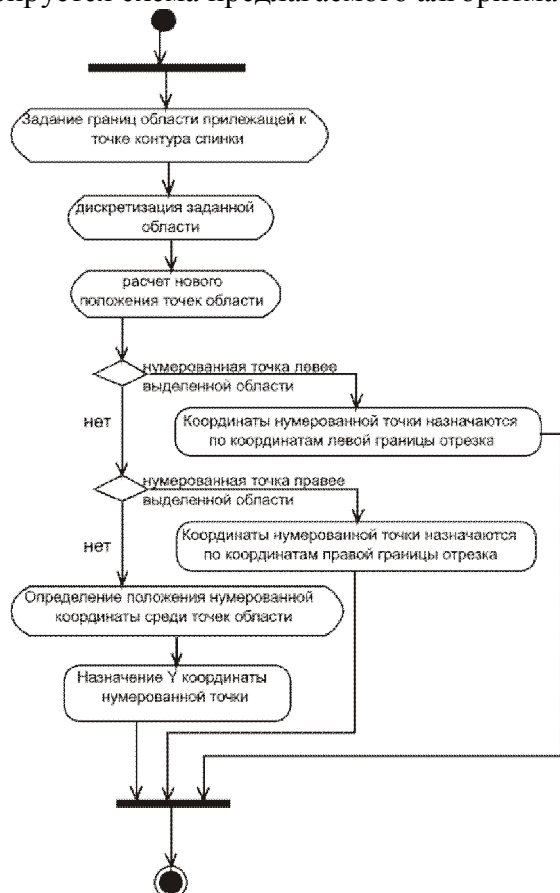


Рис. 3. Алгоритм расчёта перемещений точек заготовки со стороны спинки

При растворении перемещение контура заготовки должно происходить «в тело заготовки». При этом изменяется расположение  $X$  координат точек контура спинки. Это может приводить к вырождению КЭ, получению сетки КЭ с дефектными элементами. Преодоление этих трудностей потребовало разработки более сложного алгоритма.

Для расчёта нового положения точки первоначально определяется некая область прилежащих узлов, т.е. для каждой нумерованной точки контура выделяется отрезок прилежащих к ней точек. Границы отрезка задаются от предыдущей точки контура до следующей точки контура. В выделенной области дискретизируются точки слева и справа. Рассчитываются координаты точек области.

Специальным образом определяются границы отрезка. В этом случае слева (для

первой нумерованной точки) или справа (для последней нумерованной точки) границы выделяемой области определяются по координатам точек контура корыта.

По известным соотношениям рассчитываются новые координаты точек области в зависимости от скорости электрохимического растворения, плотности тока, соответствующей рассчитанной по методу КЭ величине потенциала в ближайшем к точке узле сетки КЭ. Действие выполняется в блоке «Расчёт нового положения точек области» (рис. 3).

Для каждой точки определяется ближайший узел сетки конечных элементов. Значение потенциала в точке принимается равным значению потенциала, рассчитанному для ближайшего конечного элемента.

По величине потенциала с помощью интерполяционной таблицы определяется плотность тока.

Новые координаты точки определяются из соотношений:

$$X_i = X_i - \Delta X_i,$$

$$Y_i = Y_i - \Delta Y_i.$$

$\Delta X_i$ ,  $\Delta Y_i$  рассчитываются аппроксимацией кривой зависимости съёма материала от плотности тока.

Далее проверяется соотношение координат исходной точки контура спинки и рассчитанных координат прилегающей области. Если координата исходной точки находится вне области, то изменяется  $X$  координата исходной точки и соответствующая ей  $Y$  координата (рис. 3).

Если исходная координата точки находится внутри области, то изменяется только её  $Y$  координата. Для определения нового значения  $Y$  координаты  $X$  координата нумерованной точки должна удовлетворять соотношению:

$$X_i \leq X \leq X_i + 1,$$

где индекс  $i$  указывает номер отрезка, внутри которого находится координата нумерованной точки.

Действие выполняет в блоке «Определение положения нумерованной координаты среди точек области» (рис. 3).

**Блок проверки завершения расчёта**

Реализован в виде отдельного макроса. Результаты анализа в блоке изменяют значение вспомогательной переменной, используемой для выбора логики продолжения алгоритма.

В блоке проверяется соотношение координат точек заготовки и соответствующих им точек с координатами допусков.  $X$  координаты этих точек могут не совпадать (в результате пересчёта координат точек заготовки), и поэтому выполняется процедура поиска интервала точек допуска, к которому можно отнести точку на контуре заготовки (рис. 4).

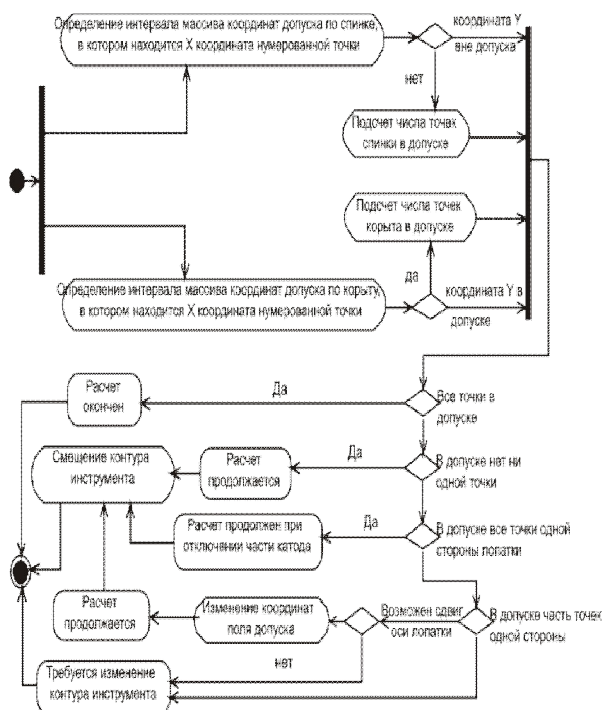


Рис. 4. Алгоритм проверки результатов итерации

При сравнении координат точек заготовки и координат допусков подсчитывается количество точек в допуске. В зависимости от результатов этого подсчёта выявляется наступление следующих прецедентов модели (рис. 4).

**Блок смещения инструмента**

Блок выполняется в случае продолжения итерационного процесса моделирования (рис. 5).

Реальный инструмент ЭХО обеспечивает постоянную величину зазора между анодом-заготовкой и катодом-инструментом. В электронной модели по-

стоянная величина зазора имитируется пересчётом координат инструмента.

Сдвиг координат инструмента зависит от минимального расстояния между координатами точек заготовки и соответствующей ей (координаты  $X$  совпадают) точкой контура инструмента.

Величины расстояний определяются отдельно по спинке и по корытцу.

Сдвиг отключённой части катода не производится.

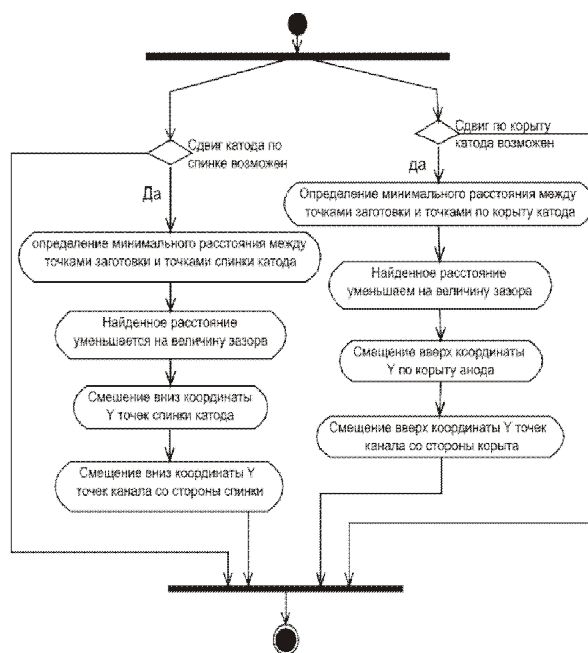


Рис. 5. Алгоритм перемещения инструмента

Контур протока определяются точками, координаты которых зависят от координат габаритных точек инструмента. После изменения координат точек инструмента требуется пересчёт координат вспомогательных точек области.

**Блок изменения контура инструмента**

На рис. 6 приведена схема алгоритма, предлагаемого для корректировки формы инструмента. Для изменения контура инструмента проверяется соотношение координат заготовки и координат массива допусков. Исходными для изменения являются координаты инструмента в начальном положении (данные вводятся из файла). Последовательное изменение координат проводится отдельно для контура спинки и контура корытца.

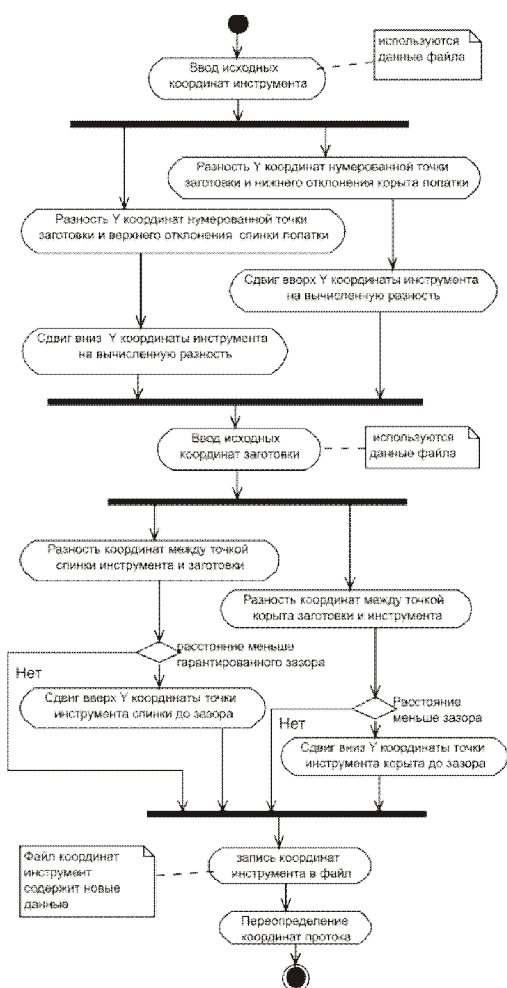


Рис. 6. Алгоритм изменения контура инструмента

После изменения контура инструмента численный эксперимент должен начаться заново, и поэтому с помощью данных файла восстанавливается исходная форма заготовки.

Для предотвращения ситуации, когда области инструмента и заготовки пересекаются, необходимо проверить соотношение координат точек заготовки и инструмента. При выявлении такой ситуации требуется скорректировать положение инструмента.

Новые координаты инструмента записываются в файл, что позволит повторить процедуру корректировки инструмента.

Данные этого файла по окончании процесса расчёта будут содержать координаты искомого инструмента. Примеры расчёта профиля электродов - инструментов показаны на рис. 7.

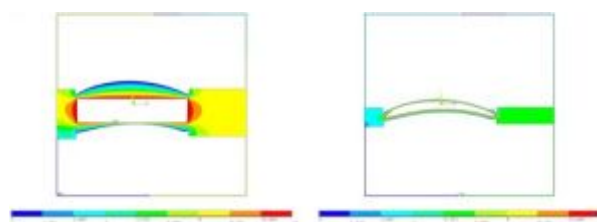


Рис. 7. Примеры расчёта профиля электродов-инструментов в начальный и конечный момент времени

Для реализации данной модели при использовании импульсной ЭХО необходимо получить зависимости тока и напряжения от МЭЗ для данного вида обработки и провести коррекцию исходного кода некоторых макросов.

При рассмотренном подходе расчёт в пределах временного цикла позволил принять ряд инженерных допущений:

- в интервалах малого временного шага в каждой расчётной точке характеристики электрохимического процесса (электропроводность электролита, выход по току, величина электродных потенциалов на аноде и катоде) принимаются постоянными;
- длительность и скважность импульсов, амплитудное значение напряжения на электродах задаются постоянными в соответствии с рекомендациями для данной электрохимической системы;
- граничное условие на поверхности анода задаётся в виде условной эквивалентной величины ( $\varphi_{ЭКВ}$ ), которая зависит от плотности тока и определяется экспериментально для системы «металл-электролит» и заданных параметрах импульсного источника питания.

Таким образом, в работе заложены принципы для реализации модели электрохимического формообразования применительно к импульсной ЭХО, которые позволят реализовать инженерную методику имитации обработки и профилирование электрода-инструмента в условиях реального производства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010 г. (шифр темы 2013-218-04-4777).

### Библиографический список

1. Проничев Н.Д., Нехорошев М.В., Смелов В.Г. и др. Обработка технологии электрохимической прошивки отверстий с использованием компьютерного моделирования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Спец. выпуск «Актуальные проблемы машиностроения». 2009. № 5. С. 221-224.
2. Шманев В.А., Филимошин В.Г., Каримов А.Х. и др. Технология электрохимической обработки деталей в авиадвигателестроении. М.: Машиностроение, 1986. 168 с.
3. Нехорошев, М.В. Компьютерное моделирование процесса электрохимического скругления острых кромок // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Спец. выпуск «Актуальные проблемы машиностроения». 2009. № 5. С. 206-209.
4. Шитарев И.Л., Смирнов Г.В., Смелов В.Г., Нехорошев М.В. Разработка имитационной модели процесса электрохимической обработки пера лопаток авиадвигателей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Спец. выпуск «Актуальные проблемы машиностроения». 2009. № 5. С. 248-251.

### 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: компьютерное моделирование электрохимической обработки. CAD и CAE компьютерное моделирование технологических процессов.

**Проничев Николай Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государствен-

ный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [pdla@ssau.ru](mailto:pdla@ssau.ru). Область научных интересов: наводораживание поверхности титановых сплавов при ЭХО.

**Смирнов Геннадий Владиславович**, 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: локализация процесса растравливания при ЭХО.

### AUTOMATED PROFILING OF TOOL ELECTRODE IN ELECTROCHEMICAL PULSE MACHINING

© 2014 M.V. Nekhoroshev, N.D. Pronichev, G.V. Smirnov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

Compressor blades are the most complex and critical parts of a gas turbine engine. It is driven by the cost of their production, as well as the requirements in terms of reliability and service life. A promising method for manufacturing the blades is a pulse electrochemical machining (ECM), the main advantages of which are the lack of power and thermal effects on the treated surface, the longevity of the tool, at low values of roughness parameters when working at high current densities in high-precision copy form and stability during operation of the process at a sufficiently small interelectrode gaps. In this paper we have set out the principles for the implementation of the model applied to the electrochemical shaping pulse echo that will deliver engineering simula-

tion methodology for processing and profiling tool electrode in a real production. In solving the problem of electrochemical formation, taking into account the factors influencing the process was proposed algorithm describing the process of pulse echo, which was based on the use of a numerical method for sample processing in time and space. This algorithm will automate profiling tool electrode during pulse electrochemical treatment.

*Electrochemical Machining (ECM); simulation; aero engine components; electrolyte.*

### References

1. Pronichev N.D., Nekhoroshev M.V., Smelov V.G., Koshelev V.V. Working off the technique of holes electrochemical insertion with the use of computer simulation // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2009. No. S. P. 221-224. (In Russ.)
2. Shmanev V.A., Filimoshin V.G., Karimov F.H. et al. *Tekhnologiya elektrokhimicheskoi obrabotki detalei v aviadvigatelestroenii* [Electrochemical machining technology in aircraft engine]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1986. 168 p.
3. Nekhoroshev M.V. Computer simulation the process of electrochemical acute crimps rounding off // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2009. No. S. P. 206-209. (In Russ.)
4. Shitarev I.L., Smirnov G.V., Smelov V.G., Nekhoroshev M.V. Development of a simulation model of the process of electrochemical machining pen blades of aircraft engines // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2009. No. S. P. 248-251. (In Russ.)

### About the authors

**Nekhoroshev Maxim Vladimirovich**, assistant of the production of aircraft engines department, Samara State Aerospace University. E-mail: [maxnogood@gmail.com](mailto:maxnogood@gmail.com). Area of Research: Computer simulation of electrochemical machining. CAD and CAE computer modeling of technological processes.

**Pronichev Nikolai Dmitrievich**, Doctor of Science (Engineering), Professor of production of aircraft engines, Samara State

Aerospace University. E-mail: [pdla@ssau.ru](mailto:pdla@ssau.ru). Area of Research: hydrogen absorption surface of titanium alloys at ECM.

**Smirnov Gennady Vladislavovich**, Doctor of Science (Engineering), Professor of production of aircraft engines, Samara State Aerospace University. E-mail: [pdla@ssau.ru](mailto:pdla@ssau.ru). Area of Research: localization process etching at ECM.