

УДК 621.9.047

РАЗРАБОТКА АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ

Дюльдина Н.Е.^{*}, Нехорошев М.В.^{**}, Проничев Н.Д.^{***}

*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва,
Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия*

^{} e-mail: spanchbobik04@mail.ru*

*^{**} e-mail: maxnogood@gmail.com*

*^{***} e-mail: pdla@ssau.ru*

Для совершенствования технологического процесса изготовления деталей авиадвигателей предлагаются новые технологические решения, связанные с использованием аддитивных технологий. Предложена возможность использования электрода-инструмента (ЭИ), изготовленного на 3D-принтере, с последующей металлизацией его рабочей поверхности. Основное внимание уделено исследованию процесса электроосаждения металла на пластмассовую форму. Разработана компьютерная модель процесса электрохимического формирования металлических покрытий повышенной толщины на форму ЭИ, изготовленную из полимерных материалов.

Ключевые слова: нетокопроводящий электрод для электрохимической обработки, электроосаждение токопроводящего покрытия на полимерный электрод, рабочая поверхность электрода.

При создании современных авиационных двигателей широко используются новые материалы, предлагаются оригинальные конструкции, формируемые на основе 3D-моделирования и инженерного анализа.

Производство сегодня должно развиваться на основе сквозного использования компьютерных технологий, применения специального автоматизированного оборудования, инженерного анализа и технологий с использованием моделей высокого уровня. Для практической реализации таких разработок необходимы новые технологические реше-

ния, которые должны базироваться на моделировании всех этапов технологической подготовки производства (ТПП), применении аддитивных и гибридных технологий, использовании специальных методов обработки, основанных на достижениях физики высоких энергий.

Использование импульсной электрохимической обработки (ЭХО) при формообразовании сложнопрофильных поверхностей деталей, которые изготавливаются из специальных труднообрабатываемых материалов (например, лопатки компрессора авиационного двигателя) в полной мере отвечает запросам отрасли.

В [1] была разработана модель рабочих процессов, протекающих в химических источниках тока. Проведено исследование влияния тока разряда на коррозию анода, изготовленного из алюминия.

В [4–6] решались вопросы моделирования процесса формообразования при ЭХО автоматизированного профилирования электрода-инструмента (ЭИ), создания параметрической модели обработки профиля ЭИ на станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

Авторы [3] провели исследования влияния материала и технологического процесса изготовления анода на энергетические, поляризационные и коррозионные характеристики.

Однако для дальнейшего совершенствования технологии ЭХО сложных поверхностей, а также расширения области использования этого метода представляет интерес формирование новых технических решений получения ЭИ с применением аддитивных технологий.

Были рассмотрены два варианта таких решений:

— «выращивание» ЭИ по их 3D-моделям методом селективного лазерного сплавления из металлических порошковых материалов;

— «выращивание» ЭИ на 3D-принтере из полимерных материалов с последующим нанесением на рабочую поверхность токопроводящего (металлического) слоя заданной толщины.

Анализ технологических возможностей первого метода показал, что полученный профиль требует существенной доработки, что снижает эффективность применения технологии. Поэтому в работе рассматривался вариант изготовления ЭИ по второму методу.

Применение гибридной технологии должно обеспечивать высокую точность профиля, сформированного при выращивании мастер-модели на 3D-принтере с последующей металлизацией рабочей поверхности. Полученный ЭИ должен обеспечивать заданные эксплуатационные характеристики:

— возможность подвода значительного рабочего тока на операции ЭХО;

— отсутствие отслаивания токопроводящего слоя;

— обеспечение высокой точности позиционирования ЭИ при переналадке, а также отсутствие смещений и деформаций от действия потока электролита.

Наиболее сложной технологической задачей является обеспечение точности формы профилированной поверхности в процессе гальванического осаждения слоя повышенной толщины.

Толщина, плотность и структура гальванических покрытий могут быть разными в зависимости от состава электролита и условий протекания процесса.

Учет специфических особенностей протекания электрохимических процессов при осаждении металлического слоя на поверхности большой кривизны приводит к необходимости создания моделей высокого уровня для компьютерной отработки технологий.

Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) обеспечивают возможности моделирования процесса осаждения для отработки технологических режимов.

Таким образом, объектом исследования является процесс электроосаждения металла на полимерную мастер-модель для изготовления ЭИ. Применение САПР обеспечивает решение научных и инженерных задач с использованием метода конечных элементов. Моделирование условий протекания токов при осаждении — это малозатратный метод, позволяющий исследовать, оптимизировать и контролировать различные процессы. В результате расчета при моделировании электрохимического осаждения можно наблюдать распределение тока на поверхности электродов, а также изучить толщину и распределение осаждаемого слоя на профилированной поверхности.

Для моделирования процесса электроосаждения был использован специальный модуль Electrodeposition. В нем есть инструменты для задания физических параметров электрохимической ячейки. Уравнения математической физики, решаемые в данном пакете, позволяют моделировать влияние первичного, вторичного и третичного распределения тока.

Для исследования процесса электроосаждения была разработана расчетная схема, представленная на рис. 1.

Ответственным этапом создания информационной модели процесса осаждения, обеспечивающей высокую точность полученных результатов, является задание исходных данных. Пример формирования таблицы параметров для расчета приведен в табл. 1. Далее можно переходить к загрузке геометрической 3D-модели объекта (изделия), которая должна быть получена в процессе осаждения.

Эта модель должна быть построена по результатам расчетов в номинальных значениях (рис. 2).

Для упрощения расчета эксперимент проводился с использованием геометрической 2D-модели электрохимической ячейки. Также для сокращения времени расчета была использована симметрия расчетной области.

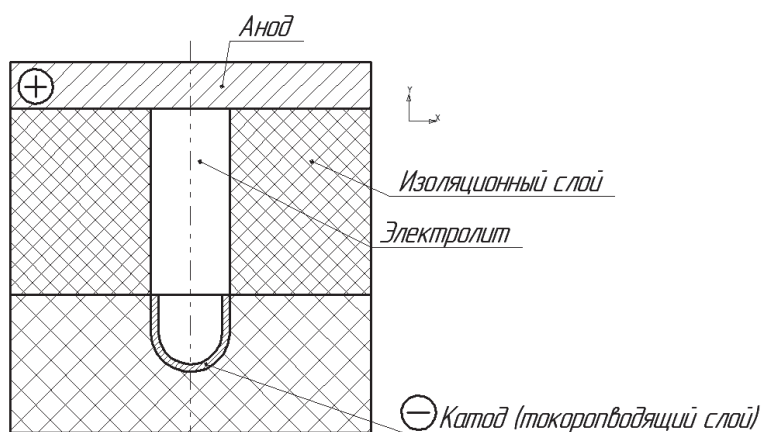


Рис. 1. Расчетная схема

Таблица 1

Пример формирования таблицы параметров для расчета

Обозначение	Значение	Описание
ϕ	10 В	Потенциал катода
I_{avg}	4 А/дм ²	Средняя плотность тока катода
σ	10 См/м	Удельная электрическая проводимость электролита
μ_{Cu}	63,5 г/моль	Молярная масса меди
ρ_{Cu}	8960 кг/м ³	Плотность меди

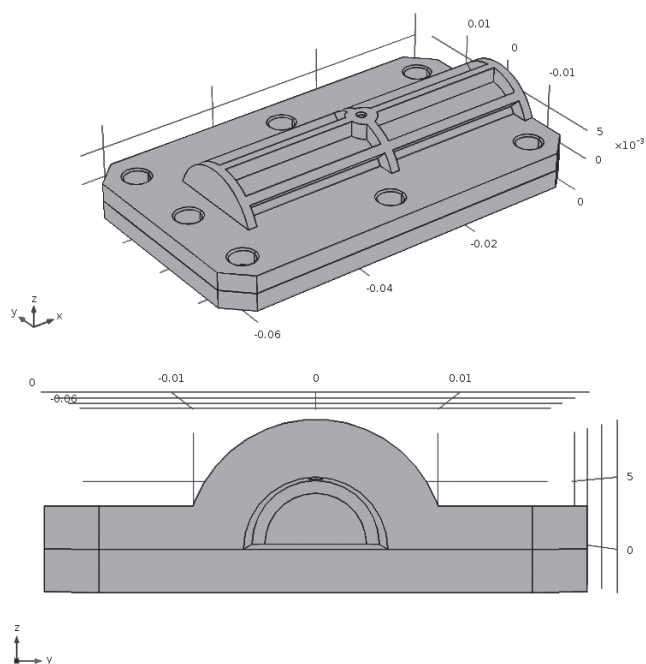


Рис. 2. Геометрия модели электрохимической ячейки

Для разработки адекватной модели процесса осаждения необходимо выбрать геометрические характеристики электрохимической ячейки, ее конфигурацию, материал анода и катода, а также электрохимические свойства электролита; кроме того, необходимо задать потенциал на электродах. Выб-

ранный программный продукт позволяет задавать все эти характеристики технологической системы. Пример формирования исходных данных для расчета представлен на рис. 3.

Затем из библиотеки материалов выбираются материалы катода и анода. В соответствии с заданными требованиями по характеристикам ЭИ было рассмотрено формирование медного покрытия при использовании медного анода.

Далее необходимо задать свойства анода и катода. Здесь осуществляется задание основных физических параметров электродов электрохимической ячейки: молярная масса и плотность материала, температурный потенциал и др.

Значительное влияние на ход процесса электроосаждения оказывает кинетика электродных процессов, поэтому следующим шагом разработки модели является ввод параметров электродных реакций. На этом этапе задаются плотность обменного тока, коэффициенты переноса анодного и катодного зарядов, равновесный потенциал электродных реакций системы.

Последним этапом моделирования является построение сетки конечных элементов (рис. 4).

После задания всех параметров и характеристик процесса был проведен расчет, в результате которого получены следующие результаты: распределе-

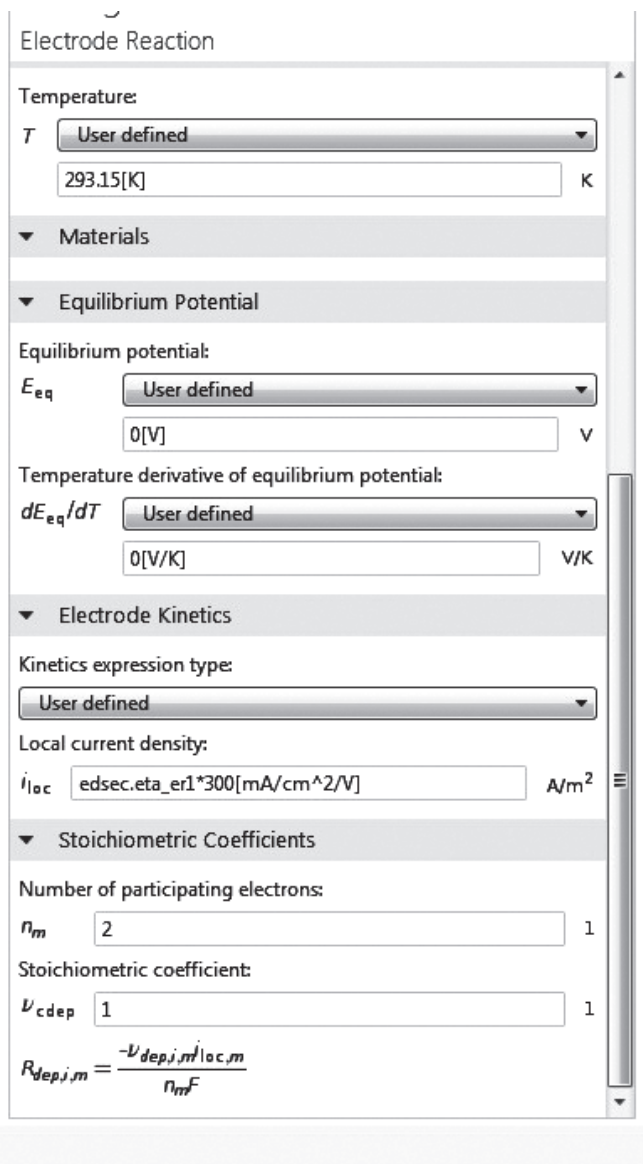


Рис. 3. Пример формирования исходных данных для расчета

ние потенциала в электрохимической ячейке (в электролите), представленное на рис. 5, а также изображение осажденного слоя катода (рис. 6). Толщина покрытия задается диаграммой, каждому тону соответствует определенная толщина покрытия.

Как известно [7], при прохождении тока через электрохимическую ячейку возникает перенапряжение электродов, в результате которого происходит сдвиг потенциалов на электродах, т.е. поляризация. В [2] рассмотрены эффект поляризации и поляризационные характеристики для никелевых катодов.

Анализ полученных результатов показал, что сформированное покрытие имеет переменную толщину и это приводит к искажению теоретического профиля. Кроме того, на острой кромке произошло более интенсивное осаждение, обусловленное электрохимическими процессами. В зоне D–E отклонение толщины сформированного профиля ЭИ от теоретического профиля составляет 335 мкм (рис. 7, табл. 2). Исходя из этого, необходимо проводить механическую доработку профиля.

На рис. 7 представлена схема сравнения толщины сформированного профиля с теоретическим профилем.

Выводы

Задача обеспечения точности и равномерности нанесения покрытия на рабочую поверхность электрода является актуальной. Ее решение возможно лишь на основе изучения параметров, определяющих кинетику электродных реакций.

Данный подход позволяет получить более полную информацию о формообразовании поверхности электрода-инструмента, а также существенно

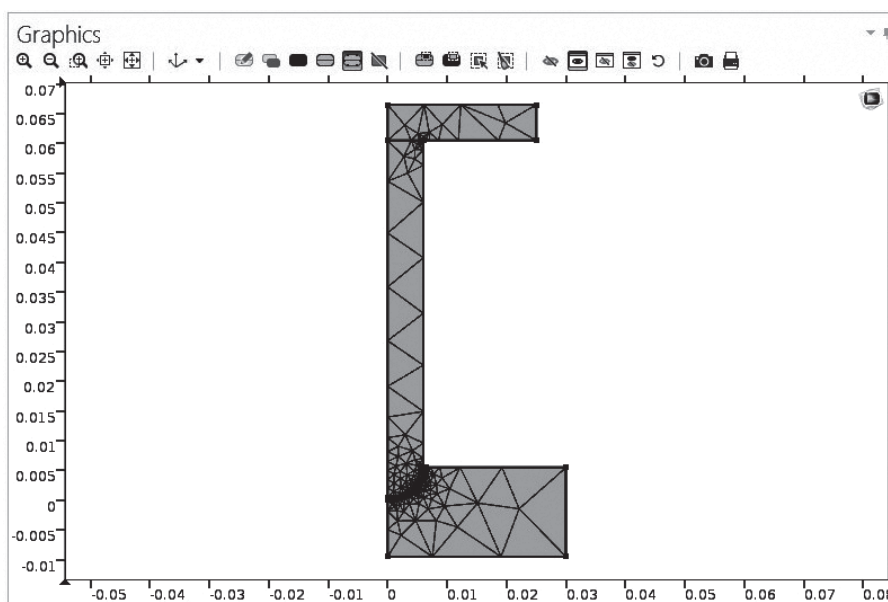


Рис. 4. Сетка конечных элементов

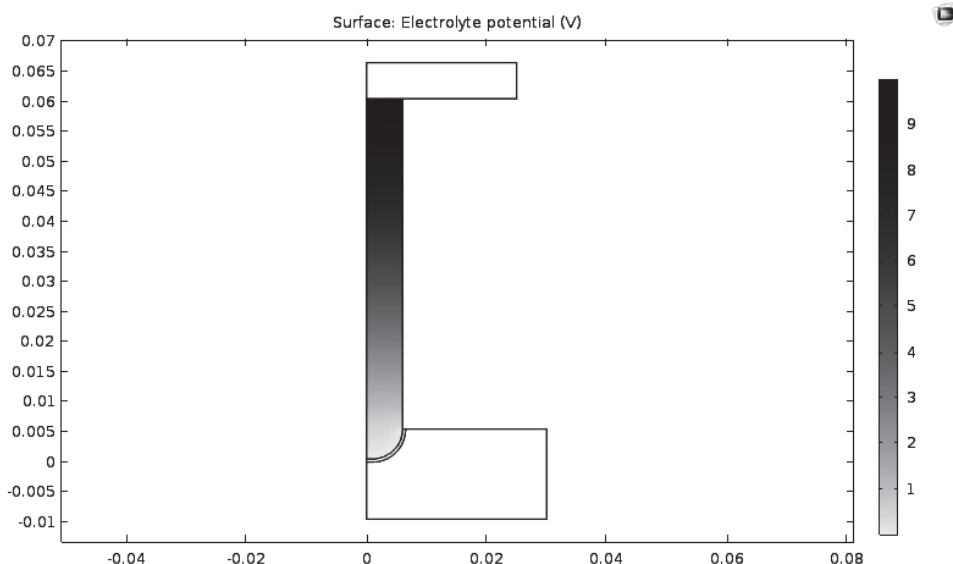


Рис. 5. Распределение потенциала электрического поля в электролите

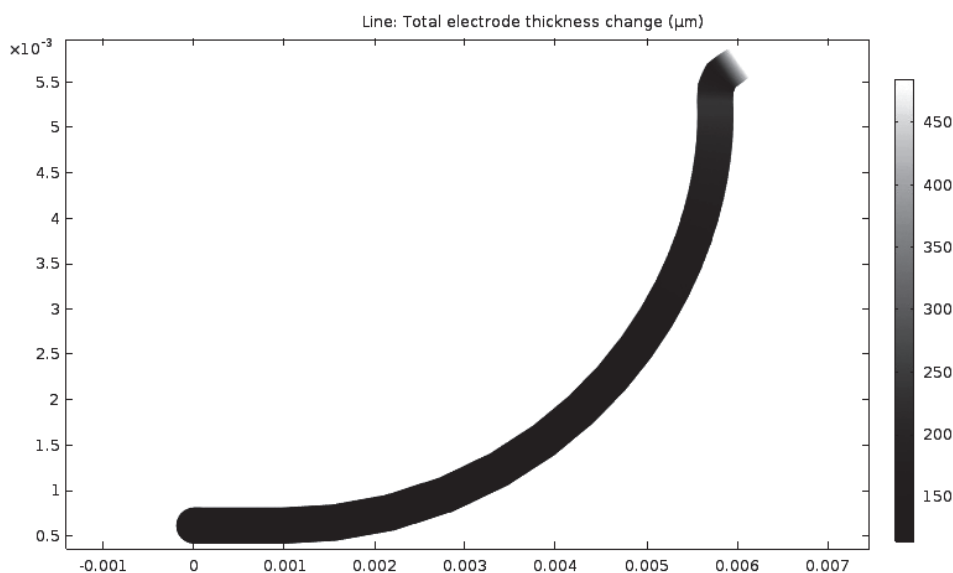


Рис. 6. Изображение осажденного слоя катода

Таблица 2

Отклонение толщины сформированного профиля от теоретического профиля

Точка	A	B	C	D	E
Погрешность, мкм	0	90	100	80	335

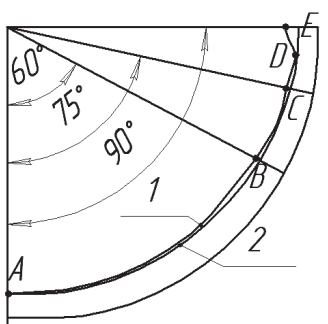


Рис. 7. Схема сравнения толщины сформированного профиля с теоретическим профилем: 1 — кривая, которая сравнивалась с теоретическим профилем; 2 — кривая, соответствующая требованиям к точности электрода-инструмента; A, B, C, D, E — точки, принадлежащие кривой 1

сократить объем исследований при внедрении технологии ЭХО. Для более точного изучения следует провести физический эксперимент, изучить структуру покрытия, т. е. провести проверку в условиях реального эксперимента.

Библиографический список

1. Огорокова Н.С., Пушкин К.В., Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Моделирование физико-химических процессов в источниках тока с алюминиевым анодом в составе энергетических установок для авиационно-космических систем // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 5. С. 65-71.
2. Кравченко Л.Л., Огорокова Н.С., Пушкин К.В., Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Влияние свойств катода гидронного источника тока с алюминиевым анодом на эффективность его работы в режиме генератора водорода // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 3. С. 74-81.
3. Жук А.З., Илюхин А.С., Огорокова Н.С., Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Исследование влияния технологии изготовления анодов воздушно-алюминиевых химических источников тока из сплава алюминий-индий на их энергетические и коррозионные характеристики // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 2. С. 198-208.
4. Нехорошев М.В., Проничев Н.Д., Смирнов Г.В. Методика создания трёхмерных твёрдотельных моделей электродов-инструментов для импульсной электрохимической обработки деталей газотурбинных двигателей в САД-системе с их параметрической связью с программным модулем профилирования // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2015. Т. 14. № 3-2. С. 418-424.
5. Нехорошев М.В., Проничев Н.Д., Смирнов Г.В. Автоматизированное профилирование электродов-инструментов при импульсной электрохимической обработке // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2014. № 5-3(47). С. 158-166.
6. Nekhoroshev M.V., Pronichev N.D., Smirnov G.V. Computer Simulation of High-Speed Anodic Dissolution Processes of Geometrically-Complex Surfaces of GTE Details. Computer Simulation of High-Speed Anodic Dissolution Processes of Geometrically-Complex Surfaces of GTE Details // The Open Mechanical Engineering Journal. 2014. № 8. С. 436-440.
7. Феттер К. Электрохимическая кинетика / Под ред. Щеголевой В.И. — М.: Химия, 1967. — 856 с.

DEVELOPING ADDITIVE TECHNOLOGY OF TOOL ELECTRODE MANUFACTURING FOR AIRCRAFT ENGINES PARTS MACHINING

Dyul'dina N.E.^{*}, Nekhoroshev M.V.^{**}, Pronichev N.D.^{***}

*Samara National Research University named after academician S.P. Korolev,
34, Moscovskoe shosse, Samara, 443086, Russia*

** e-mail: spanchbobik04@mail.ru*

*** e-mail: maxnogood@gmail.com*

**** e-mail: pdla@ssau.ru*

Abstract

The paper offers new technological solutions for gas turbine engines (GTE) manufacturing. These solutions are based on special processing methods using and additive technology implementation. To improve technological process of GTE parts manufacturing the authors suggest new technology of polymeric tool electrode (TE) fabrication with subsequent metal coating of its work surface using electrodeposition method. The most complex problem consists in ensuring accuracy of the profiled surface in the process of electrodeposition of a metal layer.

The objective of the work is developing computer model of the process of electrodeposition of metal on a dielectric TE for electrochemical machining (ECM).

This presented method consists in creating the information model, and studying the main process parameters of electrochemical deposition: electrolyte and electrode surface potentials, electrode reaction behavior,

thickness and uniformity of the coating. While analytic model development parameters of electrode reaction, such as the exchange current density; electrochemical anodic and cathodic transfer coefficients; system electrode reaction equilibrium potential were determined. Besides, the above-mentioned method includes comparison of the formed profile with theoretical one.

The developed information model demonstrates that the metal coating possesses a variable thickness. On the boundary of cathode with electrode junction a thickening, stipulated by electrochemical processes, was formed. Here, in this zone the thickness deviation of the formed profile from a theoretical one is 355 μm . This implies that a minor mechanical processing is needed.

The developed technology allows carry out technological regimes and using the ECM obtain more detailed information on surface shaping.

Keywords: dielectric electrode for electrochemical machining, conductive coating electrodeposition on polymer electrode, working surface.

References

1. Okorokova N.S., Pushkin K.V., Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2012, vol. 19, no. 5, pp. 65-71.
2. Kravchenko L.L., Okorokova N.S., Pushkin K.V., Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 74-81.
3. Zhuk A.Z., Ilyukhin A.S., Okorokova N.S., Sevruk S.D., Farmakovskaya A.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2013, vol. 20, no. 2, pp. 198-208.
4. Nekhoroshev M.V., Pronichev N.D., Smirnov G.V. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2015, vol. 14, no. 3-2, pp. 418-424.
5. Nekhoroshev M.V., Pronichev N.D., Smirnov G.V. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2014, no. 5-3(47), pp. 158-166.
6. Nekhoroshev M.V., Pronichev N.D., Smirnov G.V. Computer Simulation of High-Speed Anodic Dissolution Processes of Geometrically-Complex Surfaces of GTE Details. Computer Simulation of High-Speed Anodic Dissolution Processes of Geometrically-Complex Surfaces of GTE Details. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2014, no. 8, pp. 436-440.
7. Vetter K.J. *Electrochemical Kinetics: Theoretical and Experimental Aspects*. New York, Academic Press Inc., U.S., 1961, 789 p.