

DOI: [10.34220/2311-8873-2023-4-19](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-4-19)



УДК 621.03

UDC 621.03

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ
ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУЙНОЙ
ЭЛЕКТРОЛИТНО -ПЛАЗМЕННОЙ
ОБРАБОТКИ**

**ELECTROPHYSICAL REGULARITIES
OF JET ELECTROLYTE-PLASMA
PROCESSING**

✉¹ **Попов Александр Иннокентьевич**
к.т.н., доцент Высшей школы машиностроения,
Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого Санкт-Петербург,
(РФ) e-mail: popov_ai@spbstu.ru

✉¹ **Popov Alexander Innokentievich**
Ph.D., Higher School of Mechanical
Engineering, Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University Saint Petersburg, (RF)
e-mail: popov_ai@spbstu.ru

Москалец Артем Анатольевич,
к.т.н., доцент Высшей школы машиностроения,
Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого Санкт-Петербург,
(РФ) e-mail: moskalets_aa@spbstu.ru

Moskalets Artem Anatolievich,
Ph.D., Higher School of Mechanical
Engineering, Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic Univer. St. Petersburg, (RF)
e-mail: moskalets_aa@spbstu.ru

Беляков Сергей Владимирович,
аспирант Московского государственного
технического университета имени Н.Э. Баумана,
Москва, (РФ) e-mail: gidravlik2013@ya.ru

Belyakov Sergey Vladimirovich,
post-graduate student of the Federal State
Budgetary Educational Institution of Higher
Education «Bauman Moscow State Tech.
University» e-mail: gidravlik2013@ya.ru

Мурашов Юрий Васильевич,
к.т.н., доцент Высшей школы
электроэнергетических систем, Санкт-
Петербургского политехнического университета
Петра Великого Санкт-Петербург, (РФ) e-mail:
murashov_yuv@spbstu.ru

Murashov Yuri Vasilievich,
Ph.D., Higher School of Electric Power
Systems, Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University St. Petersburg, (RF)
e-mail: murashov_yuv@spbstu.ru

Веселовский Анатолий Платонович,
к.т.н., доцент Высшей школы
электроэнергетических систем, Санкт-
Петербургского политехнического университета
Петра Великого Санкт-Петербург, (РФ)
e-mail: veselovskij_ap@spbstu.ru

Veselovsky Anatoly Platonovich,
Ph.D., Higher School of Electric Power
Systems, Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University St. Petersburg, (RF)
e-mail: veselovskij_ap@spbstu.ru

Попова Диана Александровна,
ассистент Высшей школы машиностроения, Санкт-
Петербургского политехнического университета
Петра Великого Санкт-Петербург, (РФ) e-mail:
a.diana.popova@gmail.com

Popova Diana Alexandrovna,
assistant of the Higher School of Mechanical
Engineering, Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University St. Petersburg, (RF)
e-mail: a.diana.popova@gmail.com

Иванова Галина Валерьевна,
старший преподаватель, Высшей школы
машиностроения, Санкт-Петербургского
политехнического университета Петра
Великого Санкт-Петербург, (РФ) e-mail:
ivanova_gv@spbstu.ru

Яковицкая Марина Валентиновна,
к.т.н., доцент Высшей школы машиностроения,
Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого Санкт-Петербург,
(РФ) e-mail: yakovitskaya@spbstu.ru

Радкевич Михаил Михайлович,
д.т.н., профессор Высшей школы
машиностроения, Санкт-Петербургского
политехнического университета Петра Великого
Санкт-Петербург, (РФ) e-mail:
radkevich_mm@spbstu.ru

Аннотация. Данная работа посвящена выявлению электрофизических закономерностей процесса струйной электролитно-плазменной обработки материалов. Проведены электростатические исследования в программном комплексе COMSOL Multiphysics® 5.2. Проведена оценка влияния напряжения между электродами, геометрическими параметрами трубки полого катода, формы образующейся капли и высоты межэлектродного промежутка на напряженность и распределение электрического поля. Выполнено уточнение данных по величине и расположению максимальной напряженности электрического поля. Показано, что исследуемые параметры существенно влияют на морфологию поверхности в зоне формирования электрического разряда, что подтверждается результатами проведенных экспериментов. Реализовано численное моделирование электрических процессов в зоне обработки струи при различных параметрах. Показано, что имеет место наличие конкурирующих механизмов съема материала. Проведено моделирование поверхности для различных методов механической обработки и рассчитаны параметры слоя подлежащего удалению. Результаты исследований могут быть применены для разработки технологических процессов струйной электролитно-плазменной обработки турбинных лопаток.

Ключевые слова: СТРУЯ, ЭЛЕКТРОЛИТ, ЭЛЕКТРОСТАТИКА, МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ, ТОКОПОДВОД, ТУРБИНАЯ ЛОПАТКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Ivanova Galina Valerievna,
Senior Lecturer, Higher School of
Mechanical Engineering, Peter the Great St.
Petersburg Polytechnic University St.
Petersburg, (RF)
e-mail: ivanova_gv@spbstu.ru

Yakovitskaya Marina Valentinovna,
Ph.D., Higher School of Mechanical
Engineering, Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University St. Petersburg, (RF)
e-mail: yakovitskaya@spbstu.ru

Radkevich Mikhail Mikhailovich,
Doctor of Technical Sciences, Professor of
the Higher School of Mechanical
Engineering, St. Petersburg Polytechnic
University of Peter the Great St. Petersburg,
(RF) e-mail: radkevich_mm@spbstu.ru

Annotation. This work is devoted to revealing the electrophysical regularities of the process of jet electrolytic-plasma processing of materials. Electrostatic studies were carried out in the COMSOL Multiphysics program. The influence of the voltage between the electrodes, the geometrical parameters of the hollow cathode tube, the shape of the drop, and the height of the interelectrode gap on the strength and distribution of the electric field is estimated. The data on the magnitude and location of the maximum electric field strength have been refined. It is shown that the studied parameters significantly affect the surface morphology in the zone of formation of an electric discharge, which is confirmed by the results of the experiments. The modeling of the treatment zone with a jet of electrolyte plasma was performed for different parameters. It is shown that there are competing mechanisms of material removal. Surface modeling for different types of machining was carried out and the parameters of the layer to be removed were calculated. The research results can be applied to the development of technological processes for jet electrolytic-plasma treatment of turbine blades.

Keywords: JET, ELECTROLYTE, ELECTROSTATICS, SURFACE MORPHOLOGY, CURRENT LEAD, TURBINE BLADE, MODELING.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Возрождение технологического суверенитета России возможно, как за счет снижения доли импорта готовых технологических решений, так и за счет применения отечественных наукоемких технологий, позволяющих снизить затраты на производство и получить более качественную продукцию [1-5].

Одной из таких технологий является технология струйной электролитно-плазменной обработки поверхностного слоя металлических изделий. На сегодня существует две основных разновидности данной технологии. Первой и наиболее распространенной технологией является обработка изделий в электролитической ванне с помощью полного погружения изделия в проводящий электролит (метод погружения) [6-12]. Второй на сегодня еще довольно редко применяемой технологией является обработка поверхностного слоя изделия направленной (сфокусированной) струей электролита в необходимую область обработки, в зоне которой формируется пароплазменная оболочка, образованная электромагнитным полем (струйный метод) [13-22]. Метод погружения характеризуется высокой скоростью обработки в электролитической ванне, а также возможностью обработки сложных криволинейных поверхностей изделия за технологический цикл 5-10 мин. При этом площадь поверхности изделий может составлять 1-2 м². К недостаткам метода можно отнести скругление кромок на ребрах и вершинах, наличие дефектов в виде эрозионных лунок в середине поверхности, необходимость в значительной мощности источников тока, которые увеличивают стоимость обработки и обеспечивают большой объем паров электролита, что снижает экологическую безопасность работ. Струйная электролитно-плазменная обработка является альтернативой методу обработки в электролитической ванне. Струйная обработка характеризуется локальным воздействием пароплазменной оболочки на поверхность изделия, что позволяет проводить обработку только в технологически обоснованных областях. Струйная обработка обладает определенными преимуществами, такими как возможность создания в заданной области пароплазменной оболочки с более высокими показателями напряженности электрического поля между катодом и анодом (изделием) по сравнению с методом погружения, более высокой скоростью удаления поверхностных слоев [8-17], более высокой скоростью достижения заданных параметров шероховатости, достижением более высокого качества поверхностного слоя согласно получаемым значениям параметра шероховатости Ra, большей глубиной съема материала анода [18], более высокой экологичностью процесса и на несколько порядков меньшей мощностью затрачиваемой на процесс обработки. Однако применение струйных методов сдерживается за счет необходимости автоматизации процесса, а также недостатка знаний для разработки промышленно готовой технологии. Цель работы – установить связь между электрофизическими закономерности и изменениями морфологии поверхности после струйной электролитно-плазменной обработки.

2 Материалы и методы

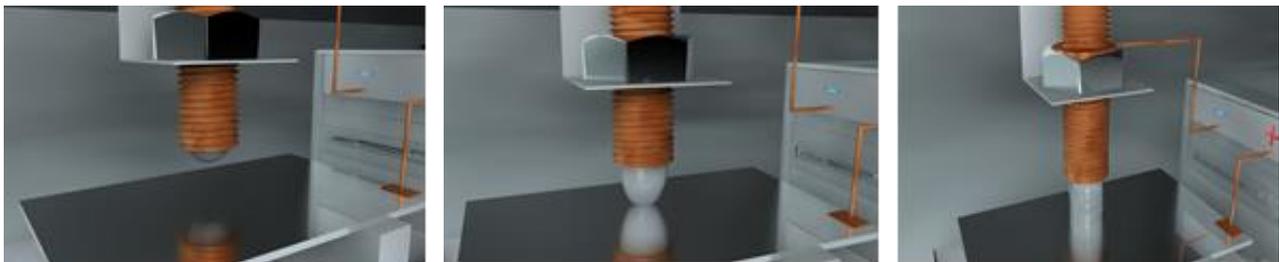
Работа состояла из двух частей, экспериментальной и расчетной. Расчетная часть работы выполнялась с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics® 5.2, Wolfram Mathematica, SolidWorks.

В программном обеспечении COMSOL Multiphysics® 5.2 использовался расчетный модуль «Электростатика» для стационарной 2D-модели процесса струйной электролитно-плазменной обработки поверхности. Моделирование проводили с целью оценки влияния основных параметров процесса, напряжения между электродами, геометрическими параметрами трубки полого катода, формы капли и высоты межэлектродного промежутка на напряженность и геометрию электрического поля.

Экспериментальную часть работы проводили на установке струйной электролитно-плазменной обработки, созданной в Высшей школе машиностроения СПбПУ [18-22]. Назначение данного оборудования – формирование струйного электрического разряда (ЭР) в межэлектродном зазоре между поверхностью обрабатываемой детали и токоподводом

(рис.1.). Объемный расход электролита Q измеряли мерным химическим стаканом 2 класса точности с ценой деления 0,02 мл. Напряжение измеряли цифровым мультиметром UT61B с точностью измерения $\pm (0,5-1) \%$. В качестве электролита использовали раствор хлорида натрия. Концентрацию электролита k варьировали в диапазоне от 22,5-100 мг/л.

Морфологию поверхности изучали сшиванием изображений на автоматическом микротвердомере FM-300 (Япония) с помощью программы Thixomet Pro (Россия). Основные этапы развития процесса струйной электролитно-плазменной обработки представлены на рис.1.



а) – формирование электролитической капли; б) – касание электролитической капли поверхности анода; в) – формирование электролитической струи (моделирование в графическом редакторе Cinema 4D)

Рисунок 1 – Основные этапы развития струйного электролитно-плазменного разряда

3 Результаты исследований

Электрофизическое моделирование зоны обработки в программном комплексе COMSOL Multiphysics® 5.2

Оценку потенциала для среды с разными электрофизическими свойствами проводили в соответствии с уравнением:

$$\operatorname{div}(\varepsilon \operatorname{grad}U) = -\rho \quad (1)$$

где U – потенциал электростатического поля, Дж/Кл; ε – диэлектрическая проницаемость; ρ – объёмная плотность распределения заряда, Кл/м³.

При этом заряды расположены только на металлическом катоде и металлическом аноде. В этом случае объёмная плотность распределения заряда соответствует выражению:

$$\rho = 0 \quad (2)$$

В программном комплексе COMSOL Multiphysics® 5.2 оценка потенциала записывается с использованием векторного дифференциального оператора набла ∇ :

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla U) = -\rho, E = -\nabla U, \quad (3)$$

где ∇ – векторный дифференциальный оператор набла; E – вектор напряженности электрического поля, Н/Кл.

В нашем случае мы использовали двумерную модель в декартовых координатах, поэтому выражение (3) можно записать как:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\rho, \quad E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y} \quad (4)$$

Расчет напряженности электрического поля показывает, что данная величина при высоте межэлектродного промежутка $H = 12$ мм составляет $E = 1,34 \cdot 10^5$ В/м. Распределение линий электрического поля концентрируется на ребрах металлического анода в зоне электролитно-плазменного разряда (рис. 2).

При приближении среза полого катода к поверхности металлического анода мы фиксируем рост электрического потенциала с приближением к поверхности катода. Максимальное значение напряженности для данных условий, высоте межэлектродного промежутка $H = 2,75$ мм и радиусе скругления наружного и внутреннего срезов трубки $r = 0,055$ мм составляет на поверхности анода $E = 1,25 \cdot 10^5$ В/м (рис. 3).

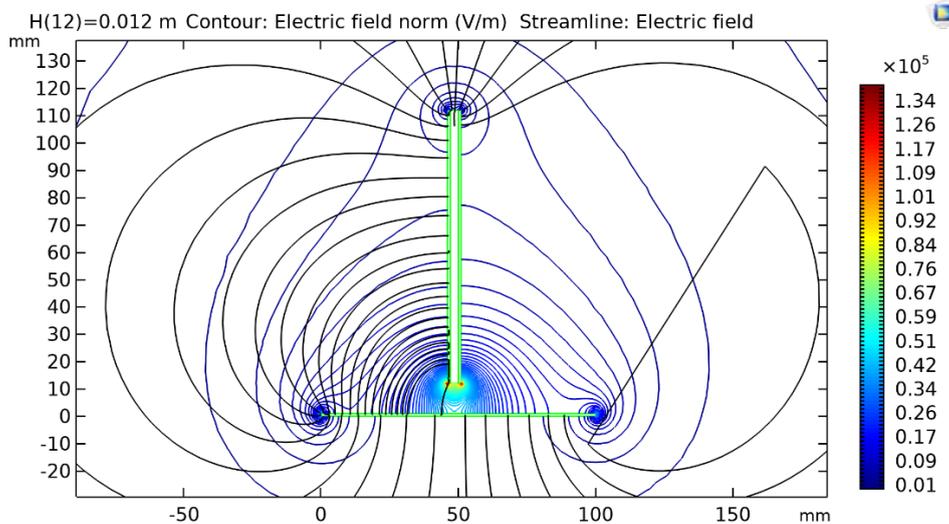


Рисунок 2 – Напряженность электрического поля и распределение линий электрического поля

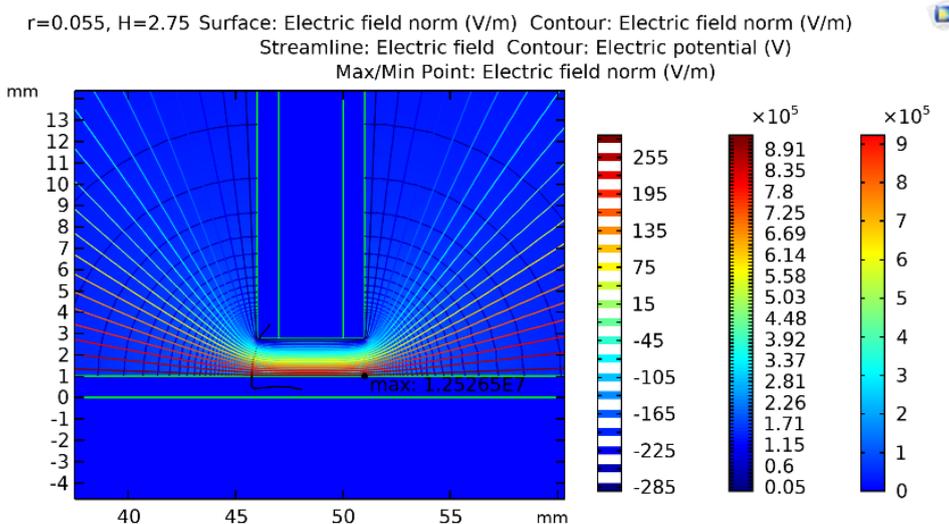


Рисунок 3 – Напряженность электрического поля, контур линий нормали электрического поля и распределение электрического потенциала, точка максимума напряженности электрического поля

Максимальное значение напряженности электрического поля зафиксировано нами при минимально возможных значениях параметров. Высота межэлектродного промежутка H при этом составила 1 мм и радиус скругления наружного и внутреннего срезов трубки – 0,055 мм. Максимальное значение напряженности электрического поля составляет $E = 1,25 \cdot 10^7$ В/м. При этом, очень важным является уточнение распределения напряженности поля по наружному краю полого катода в отличие от нашей работы [16], в которой предполагалось, что максимум напряженности поля находится на внутренней кромке трубки полого катода.

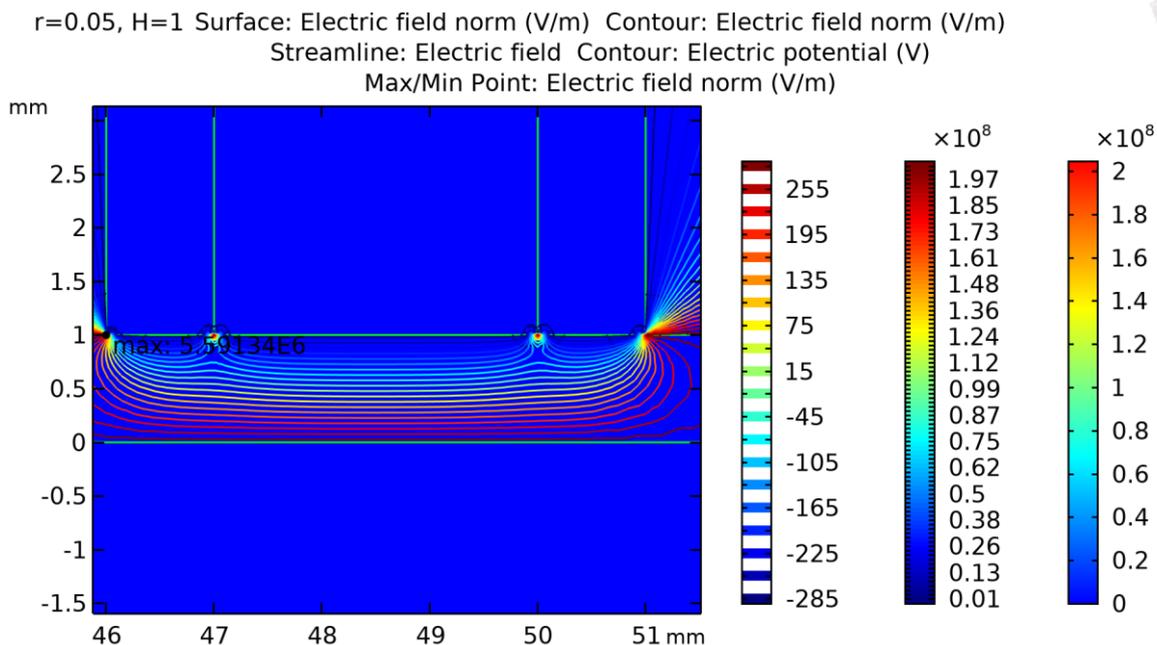


Рисунок 4 – Напряженность электрического поля, контур линий нормали электрического поля и распределение электрического потенциала, максимальная величина электрического поля

Корреляция расчетной модели с физическим экспериментом

Анализ зоны воздействия электролитического разряда на поверхность металлического анода показывает, что в процессе в процессе воздействия струи электролита диаметром 3 мм на поверхности формируется четко выраженное локальное углубление с диаметром близким 4 мм. Эта величина в большей мере определяется обратным потоком для выхода струи электролита и режима обработки $U = 300$ В; $I = 1$ А; $t = 60$ с составляет в среднем 0,5 мм на сторону. Важной особенностью морфологии поверхности является зона в области среза внешнего диаметра трубки полого катода. Как было сказано выше, данная область характеризуется максимальной напряженностью электрического поля, действующего на заряженную частицу (рис.5.).

Это приводит к тому, что в окрестности среза внешнего среза трубки полого катода при малой диэлектрической проницаемости формируется максимальная величина электрического поля. Данное обстоятельство приводит к тому, что при большом количестве электрических разрядов на поверхности анода формируется зона углубления, которая выглядит как кольцо вокруг сферической лунки электролитно-плазменного разряда (рис.6, а).

Отличительным отличием данной зоны является то, что область в диапазоне $\varnothing 4-4,5$ мм является значительно меньше подвергается воздействию электрических разрядов. Это может указывать на снижение напряженности электрического поля в этой области за счет плоской поверхности среза трубки полого катода.

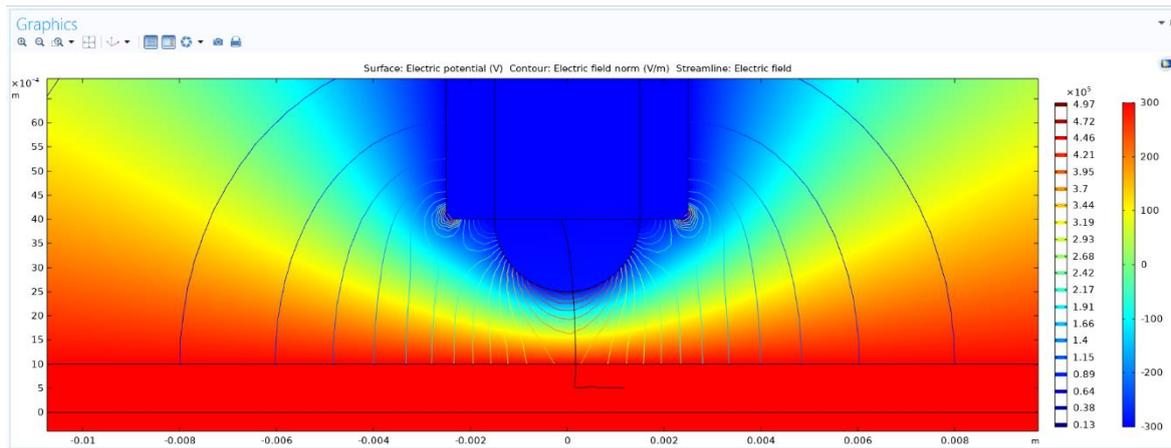
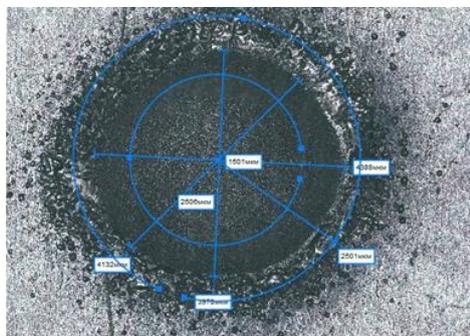


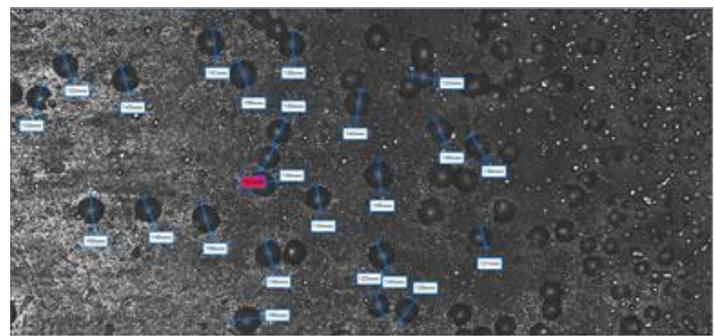
Рисунок 5 – Распределение электрического потенциала при напряжении 300 В и высоте межэлектродного промежутка 25 мм

На рис.6 представлен анализ геометрических размеров эрозионных лунок единичных разрядов в условиях высокой напряженности электрического поля с одной стороны и низкой проводимости (вне электролитического потока) с другой. Выявлено, что для области диаметром 5-7 мм в окрестности среза внешнего диаметра трубки полого катода при режиме обработки $U = 300$ В; $I = 2,1$ А; $Q=40$ л/ч; $h=6$ мм; $t = 60$ с формируются большие единичные эрозионные лунки с очень близкими размерами по диаметру от 122-150 мкм.

Результаты реального эксперимента коррелируют с расчетными данными, полученными в программном комплексе COMSOL Multiphysics® 5.2.



а)



б)

а) – геометрические размеры зоны разряда; б) – область влияния среза внешнего диаметра трубки полого катода

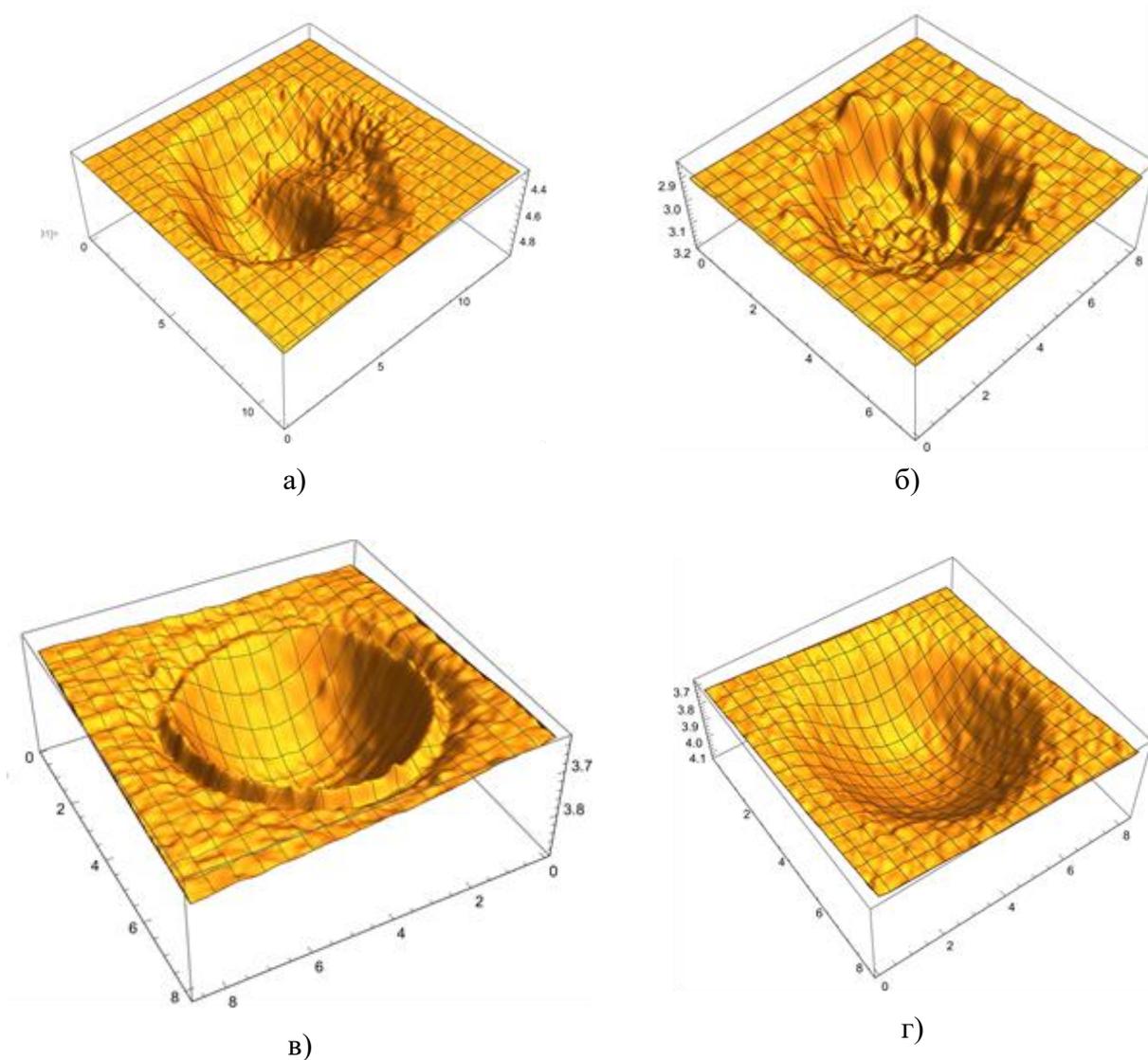
Рисунок 6 – Морфология поверхностного слоя в зоне воздействия струи электролитно-плазменного разряда

Моделирование зоны обработки с применением программного комплекса Wolfram Mathematica

Для анализа морфологии поверхности зоны обработки струей электролита нами было произведено оптическое сканирование массива точек пяти расположенных в ряд образцов сканером Steinbichler Comet V (рис. 7).

В результате чего нами был получен общий файл формата STL и размером 56 Гб, состоящий из облака точек с числом 3 734 712, характеризующих развитую морфологию поверхности. Так как файл представляет из себя большой объект размером, выполнение с ним

работ в программе Wolfram Mathematica по моделированию затруднено. В связи с этим данный файл был разделен на несколько отдельных файлов. Операцию разделения производили в программе SolidWorks. Из всего массива точек вырезали только необходимый образец, из которого формировали отдельный файл, остальной объем данных удаляли. К примеру, полученный STL-файл (рис. 7, б) с числом точек 623 862 импортировали затем в программу Wolfram Mathematica как массив чисел. Далее был сформирован табличный массив данных – CSV-файл с массивом координат точек. Построенный график поверхности в программе Wolfram Mathematica разворачивали на угол около 30° для лучшей визуализации зоны обработки и затем экспортировали в формат JPG.



а) – нарушение условий формирования потока ($U = 261$ В; $I = 8,4$ А; $Q = 40$ л/ч; $h = 3$ мм; $t = 60$ с; $k = 40$ мг/л); б) – влияние конкурирующих механизмов разрушения поверхности ($U = 261$ В; $I = 8,4$ А; $Q = 40$ л/ч; $h = 3$ мм; $t = 60$ с; $k = 40$ мг/л); в) – с ярко выраженным влиянием острого наружного края трубки полого катода ($U = 277$ В; $I = 2,2$ А; $Q = 22,5$ л/ч; $h = 6$ мм; $t = 60$ с; $k = 20$ мг/л); г) – оптимальная форма зоны электролитно-плазменного разряда ($U = 300$ В; $I = 2,1$ А; $Q = 40$ л/ч; $h = 6$ мм; $t = 60$ с; $k = 100$ мг/л)

Рисунок 7 – Трехмерные модели поверхностного слоя для разных режимов струйной электролитно-плазменной обработки

Анализ морфологии поверхности образцов показывает, что пароплазменная оболочка, образованная вследствие взаимодействия струи электролита с поверхностью изделия оказывает различное влияние на форму получаемой поверхности в зависимости от параметров вольтамперной характеристики, скорости потока, концентрации электролита и межэлектродного расстояния и температуры.

На представленных математических моделях зоны электролитно-плазменного воздействия на поверхность (рис. 7, а) приведен пример нарушения условий формирования потока (засор, отклонение трубки токоподвода) и как следствие мы фиксируем на трехмерной модели искривление области обработки. Различная скорость электрофизических и электрохимических механизмов разрушения поверхности представлена на другой математической модели поверхности (рис. 7, б). Показано, что электроэрозионный механизм разрушения поверхности металлического анода в зоне обработки превалирует над электрохимическим и электролитно-плазменными механизмами. Это ведет к тому, что поверхность выглядит неравномерно в виде необработанных кратеров. Следующим важным заключением при анализе морфологии поверхности является подтверждение математической моделью положений, рассматриваемых при электростатическом анализе. Показано, что поверхность зоны обработки имеет форму в виде правильной сферы. Диаметр данной зоны совпадает с диаметром струи формируемой трубкой полого токоподвода. Однако наличие кольцевой треугольной канавки вокруг данной сферы может указывать на то, что в данной области присутствует высокая напряженность электрического поля (рис. 7, в). По нашему мнению, данная напряженность обусловлена острым наружным краем трубки полого катода. В этой области нами как показано выше рассчитана максимальная напряженность электрического поля равная $1 \cdot 10^6$ В/м. При высокой проводимости среды в данной зоне происходит локализация разряда в виде кольца. На наш взгляд наиболее оптимальной формой зоны электролитно-плазменного разряда является режим представленный на рис. 7, г. Данная форма имеет правильную форму лунки и что очень важно плавные линии сопряжения с обрабатываемой поверхностью, что подразумевает отсутствие концентраторов напряжений при внеплановой остановке механизма перемещения полого катода относительно поверхности.

Моделирование технологического припуска для разных методов механической обработки

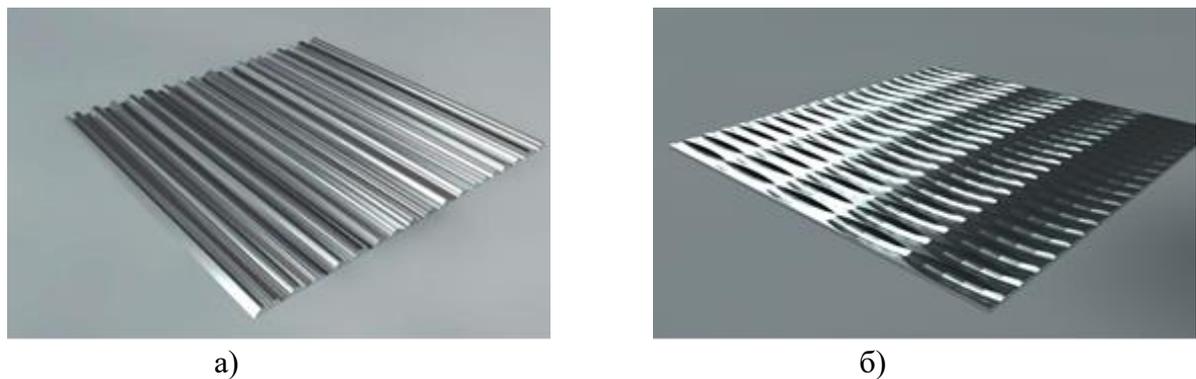
Нами было выполнено компьютерное моделирование припуска для разных методов механической обработки поверхности. Исходя из того, что поверхность турбинных лопаток может иметь разные состояния в зависимости от предыдущих технологических операций, мы выполнили моделирование для разных состояний поверхности. Как мы полагаем, технологический припуск, остающийся после предыдущих операций, является в большей своей толщине слоем поверхности, подлежащим удалению на разных операциях в том числе и на операции струйной электролитно-плазменной обработки. Поэтому информация о его толщине, массе, объеме является важной и при сложной геометрии макропрофиля поверхностного слоя и криволинейной поверхности турбинной лопатки может быть корректно оценена с использованием трехмерного моделирования в программе SolidWorks. Для этого были построены твердотельные модели поверхности после различных видов обработки и модели турбинных лопаток (рис. 8.).

На первом этапе работы была выполнена оценка поверхности после разных методов предварительной обработки. Расчетные данные о наибольшей высоте профиля, объеме материала необходимого для удаления, массе материала необходимого для удаления на единицу площади приведены в табл. 1.

Анализ показывает, что максимальный объем и массу материала имеют поверхности, после отрезки на ленточном отрезном станке и предварительного шлифования. Это коррелируется с параметром наибольшей высоты профиля.

Чистовая обработка резцом, фрезой и вулканитовым кругом имеют минимальные параметры высоты микронеровностей и как следствие минимальный объем и массу материала необходимого для удаления.

На втором этапе работы была произведена оценка объема и массы технологического припуска на лопатках турбинных разных размеров после чистового фрезерования (рис.9.). Анализ показывает, что глубина технологического припуска является определяющим фактором для его массы и объема по всей поверхности лопатки.



а) – обработка шлифованием; б) – обработка фрезерованием

Рисунок 8 – Модели поверхностного слоя после различных методов механической обработки

Таблица 1 – Расчетное изменение массы образцов, необходимое для получения полированной поверхности

Состояние поверхности	Отрезка на ленточном отрезном станке	Предварительное шлифование	Чистовая обработка токарным резцом	Чистовая обработка концевой фрезой	Обработка вулканитовым кругом
Наибольшая высота профиля, мм	0,61	0,32	0,17	0,1	0,11
Объем материала, необходимый для удаления, мм ³	0,31	0,15	0,09	0,057	0,05
Масса материала, необходимая для удаления, мг	2,41	1,15	0,68	4,42	0,41
Расчетная площадь поверхности, мм ²	1	1	1	100	1
Масса материала, соответствующая площади 1 см ² , мг	241	115	68	44	41

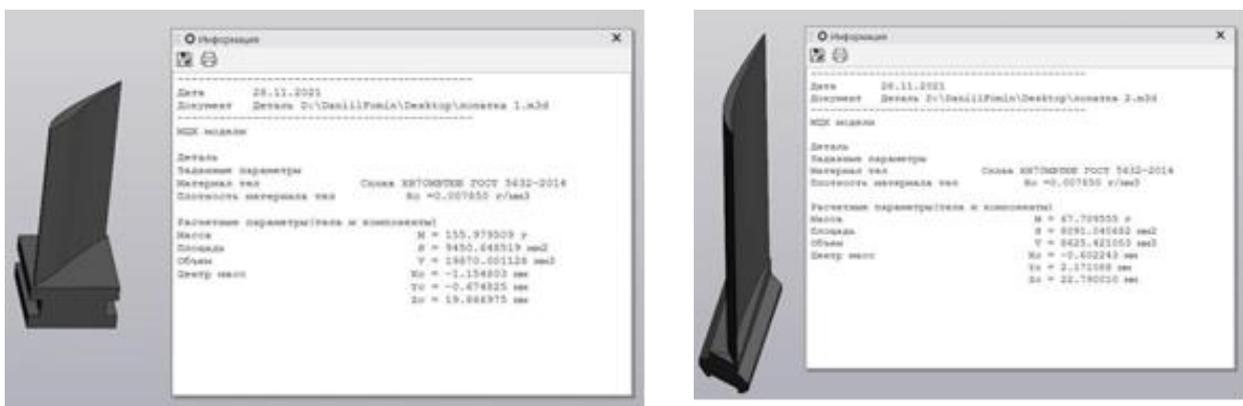


Рисунок 9 – Модели лопаток компрессора

Таблица 2 – Расчетные данные объема и массы технологического припуска

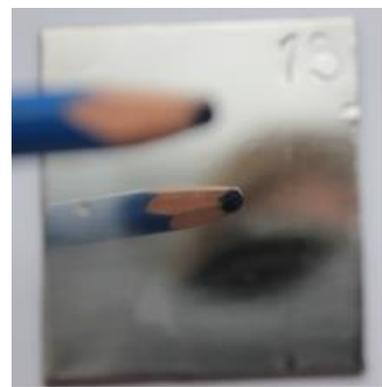
	1-я лопатка			2-я лопатка			3-я лопатка			4-я лопатка		
	0,15	0,3	0,5	0,15	0,3	0,5	0,15	0,3	0,5	0,15	0,3	0,5
Технологический припуск, мм	0,15	0,3	0,5	0,15	0,3	0,5	0,15	0,3	0,5	0,15	0,3	0,5
Масса пера лопатки, г	48			38			48			195		
Объем пера лопатки, мм ³	6046			4813			6112			24838		
Масса технологического припуска, г	3	6	10	4	7	11	4	8	14	15	30	50
Объем технологического припуска, мм ³	389	778	1307	453	907	1504	529	1059	1766	1 900	3 799	6 333

Результаты обработки материалов лопаток

В результате проведенных экспериментов струйной обработкой были получены следующие практические результаты. Обработаны поверхности теплостойкой стали 20X13 использующейся при производстве турбинных лопаток. Показано, что в процессе обработки поверхности полым катодом с учетом проведенных расчетов поверхность обрабатывается с высокой скоростью съема до 11 г/ч, с достижением высокого качества поверхностного слоя (рис. 10).



а)



б)

а) размерная; б) финишная

Рисунок 9 – Примеры изменения морфологии поверхности после струйной -электролитно-плазменной размерной и финишной обработки стали 08X18H9T

Это обеспечивает возможность съема объема технологического припуска, материала для исследуемого диапазона лопаток в технологически обоснованное время.

4 Обсуждение полученных результатов

Результаты исследований показывают, что применение современных технологий численного, твердотельного и математического моделирования позволяют выявить наиболее характерные особенности развития струйного разряда и оценить их влияние на морфологию

поверхности в процессе струйной обработки. Показано, что максимальная локализация электролитно-плазменного разряда происходит в центральной зоне обработки, ограниченной областью границ струи электролитно-плазменного разряда. Однако наличие плоской поверхности и острых краев среза трубки приводит к существенному изменению напряженности электрического поля и принципиально меняет характер взаимодействия струи электролитной плазмы с обрабатываемой поверхностью. При этом линии напряженности электрического поля формируются как внутри струи электролитно-плазменного разряда, так и за его пределами. Движение заряженных частиц происходит вдоль линий электрического поля и реализуется в виде электрического разряда в области максимальной напряженности электрического поля. Поэтому при наличии резких переходов для наружного и внутреннего срезов трубки единичные разряды разрушают поверхность анода с наличием четко выраженной границы перехода, соответствующей геометрии трубки полого катода.

Для выполнения обработки наиболее оптимальной формой сопряжения поверхности и зоны струйной обработки является сглаженная форма перехода. Этого возможно достичь как за счет подбора режимов обработки, так и за счет скругления наружной кромки среза трубки полого катода. Полученные результаты могут быть применены для разработки технологии струйной электролитно - плазменной обработки поверхности турбинных лопаток после механической обработки.

Выводы:

1 Построение электростатической модели процесса электролитно-плазменной обработки с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics® 5.2 позволило выявить основные закономерности распределения напряженности электрического поля, что позволяет учитывать это при разработке токоподводов с учетом его распределения.

2 Анализ модели зоны воздействия электролитно-плазменного разряда на поверхность позволил уточнить распределение максимальной напряженности электрического по внешнему срезу трубки полого катода.

3 Анализ результатов эксперимента показал влияние напряженности на срезе трубки полого катода на распределение электрических разрядов по поверхности металлического анода в окрестности неподвижного токоподвода.

4 Моделирование зоны струйной электролитно-плазменной обработки с помощью программного продукта Wolfram Mathematica показало наличие различных механизмов разрушения поверхности вследствие образования пароплазменной оболочки при взаимодействии струи электролита с поверхностью изделия, что в свою очередь позволяет выбрать оптимальный режим обработки поверхности.

5 Моделирование поверхности для различных методов механической обработки позволило получить модели поверхностных слоев, подлежащих удалению, оценить их толщину, рассчитать массу, объем и спрогнозировать время для струйной обработки разных типоразмеров турбинных лопаток.

Список литературы

1 Степанова, Т. Д. Технологический суверенитет России как элемент экономической безопасности // Экономический журнал Экономика: вчера, сегодня, завтра Том 12, № 9А, 2022. с. 567-575.

2 Институциональные аспекты инновационной экономики: монография / Т. И. Безденежных, В. В. Шапкин, О. В. Угольникова [и др.]; Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики, 2012. – 131 с. – ISBN 978-5-228-00590-7. – EDN TLVEJZ.

3 Попова, А. И. Северо-Западный регион в системе мирохозяйственных связей / А. И.

Попова // Интеграция экономики в систему мирохозяйственных связей: Сборник научных трудов XVII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 23–25 октября 2012 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2012. – С. 100-102. – EDN WDWGQF.

4 Роль университета в интеграции образования, науки и бизнеса / С. И. Головкина, А. И. Попова, С. А. Черногорский, Н. В. Валебникова // Университет как фактор модернизации России: история и перспективы (к 55-летию ЧГУ им. И.Н. Ульянова): Материалы Международной научно-практической конференции, Чебоксары, 18 октября 2022 года / Редколлегия: А.Ю. Александров [и др.]. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2022. – С. 138-140. – EDN NERYTD

5 Обеспечение этапов жизненного цикла лопаток паровых турбин применением ультразвукового контроля / А. И. Попова, А. И. Попов, В. С. Медко, М. И. Тютхяев // Металлообработка. – 2013. – № 5-6 (77-78). – С. 43-47. – EDN SBOFBP.

6 Алексеев Ю.Г., Королев А.Ю., Паршутто А.Э., Нисс В.С. Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля // Наука и Техника. 2017;16(5):391-399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>

7 Импульсная электролитно-плазменная технология размерной и финишной обработки металлических материалов / А. Ю. Королев, В. С. Нисс, Ю. Г. Алексеев [и др.] // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка: Сборник докладов 12-го Международного симпозиума. В 2-х частях, Минск, 07–09 апреля 2021 года / Редколлегия: А.Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Республиканское унитарное предприятие "Издательский дом "Белорусская наука", 2021. – С. 87-93. – EDN QQBOVV.

8 Danilov, I.; Hackert-Oschätzchen, M.; Zinecker, M.; Meichsner, G.; Edelmann, J.; Schubert, A. Process Understanding of Plasma Electrolytic Polishing through Multiphysics Simulation and Inline Metrology. *Micromachines* 2019,10, 214. <https://doi.org/10.3390/mi10030214>.

9 Захаров, С. В. Ионизационная модель электролитно-плазменного полирования / С. В. Захаров, М. Т. Коротких, Е. В. Гонибесова // Неделя науки СПбПУ : Материалы научной конференции с международным участием. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019 года. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. – С. 255-258. – EDN PNORZK.

10 P. Gupta, G. Tenhundfeld, E.O. Daigle, D. Ryabkov, Electrolytic plasma technology: Science and engineering—An overview, *Surface and Coatings Technology*, Volume 201, Issue 21, 2007, Pages 8746-8760, ISSN 0257-8972, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.11.023>.

11 Danilov, I.; Hackert-Oschätzchen, M.; Schaarschmidt, I.; Zinecker, M.; Schubert, A. Transient Simulation of the Removal Process in Plasma Electrolytic Polishing of Stainless Steel. In *Proceedings of the COMSOL Conference 2018, Lausanne, Switzerland, 22–24 October 2018*; Available online: https://www.comsol.com/paper/download/573171/danilov_paper.pdf (accessed on 10 December 2018).

12 Захаров, С. В. Сравнительный анализ электролитно - плазменных технологий / С. В. Захаров, А. И. Попов // Электрофизические методы обработки в современной промышленности. Специальный выпуск: аддитивные технологии: Материалы III Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Пермь, 11–12 декабря 2019 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2020. – С. 64-67. – EDN KVBMJZ.

13 Quitzke, Susanne & Kröning, Oliver & Safranchik, Daniel & Zeidler, Henning & Danilov, Igor & Martin, André & Böttger-Hiller, Falko & Essel, Shai & Schubert, Andreas. (2022). Design and setup of a jet-based technology for localized small scale Plasma electrolytic Polishing. *Journal of Manufacturing Processes*. 75. 1123-1133. [10.1016/j.jmapro.2022.01.064](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.01.064).

14 Krishna Kumar Saxena, Jun Qian, Dominiek Reynaerts, A tool-based hybrid laser-electrochemical micromachining process: Experimental investigations and synergistic effects,

International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 155, 2020, 103569, ISSN 0890-6955, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103569>.

15 Quitzke, S., Martin, A., Schubert, A.: Influence of ignition and polishing phase on jet shape and electric current in jet-plasma electrolytic polishing. In: Proceedings of the 21st International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, EUSPEN 2021, pp. 165–168 (2021)

16 Popov, A.I., Fumin, A.S., Novikov, V.I., Teplukhin, V.G., Veselovsky, A.P. (2023). Peculiarities of Contact Interaction of an Electrolytic Plasma with a Surface in Jet Machining of Materials of Turbine Blades. In: Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R. (eds) Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14125-6_71

17 Wu, Y., Wang, L., Zhao, J. et al. Spray electrolyte plasma polishing of GH3536 superalloy manufactured by selective laser melting. *Int J Adv Manuf Technol* 123, 2669–2678 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10283-3>

18 High-Speed Dimensional Processing of Metallic Materials with an Environmentally Friendly Jet Electrolyte-Plasma Method / A. Popov, A. Popova, A. Fumin [et al.] // Mechanisms and Machine Science (book series). – 2022. – Vol. 108 MMS. – P. 481-489. – DOI 10.1007/978-3-030-87383-7_52. – EDN S E E E P N.

19 Патент № 2623555 С1 Российская Федерация, МПК С25F 7/00. Установка для электролитно-плазменной обработки турбинных лопаток: № 2016120180: заявл. 24.05.2016: опубл. 27.06.2017 / А. И. Попов, М. М. Радкевич, В. Н. Кудрявцев [и др.]; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (ФГАОУ ВО "СПбПУ"). – EDN U S J M H W.

20 Патент № 2656318 С1 Российская Федерация, МПК С23С 14/35. Магнетронная распылительная головка: № 2017111428: заявл. 04.04.2017: опубл. 04.06.2018 / А. И. Попов, М. М. Радкевич, В. С. Медко [и др.]; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (ФГАОУ ВО "СПбПУ"). – EDN U Q S E X B.

21 Попов, А. И. Особенности электролитно-плазменного полирования стентов / А. И. Попов, М. М. Радкевич, М. В. Новоселов // Технология металлов. – 2019. – № 5. – С. 24-29. – DOI 10.31044/1684-2499-2019-5-0-24-29. – EDN U I J G J G.

22 Popov, A.I., Radkevich, M.M., Teplukhin, V.G.: Thinnest finishing treatment with a focused jet of electrolytic plasma. In: Evgrafov, A.N. (ed.) Advances in Mechanical Engineering. LNME, pp. 139–149. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-39500-1_15

23 Беляков С.В., Семёнов М.Ю. Моделирование распределения температур в профиле шероховатости поверхностного слоя в процессе электролитно-плазменной обработки // Научные чтения им. чл.-корр. РАН И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов», Москва, 17-18 сентября 2020 г. Сборник материалов. М: ИМЕТ РАН, 2020. С. 99-101.

References

1 Stepanova, T. D. Technological sovereignty of Russia as an element of economic security *Economic journal Ekonomika: yesterday, today, tomorrow* Vol. 12, No. 9A, 2022. p. 567-575.

2 Institutional aspects of the innovation economy: monograph / T. I. Bezdenezhnykh, V. V. Shapkin, O. V. Ugolnikova [and others]; St. Petersburg State University of Service and Economics. - St. Petersburg: St. Petersburg State University of Service and Economics, 2012. - 131 p. – ISBN 978-5-228-00590-7. – EDN T L V E J Z.

3 Popova, A. I. The North-West region in the system of world economic relations / A. I. Popova // Integration of the economy into the system of world economic relations: Collection of

scientific papers of the XVII International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, October 23–25, 2012. - St. Petersburg: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University", 2012. - P. 100-102. – EDN WDWGQF.

4 The role of the university in the integration of education, science and business / S. I. Golovkina, A. I. Popova, S. A. Chernogorsky, N. V. Valebnikova // University as a factor in the modernization of Russia: history and prospects (to the 55th anniversary of CGU named after I.N. Ulyanov): Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Cheboksary, October 18, 2022 / Editorial Board: A.Yu. Alexandrov [i dr.]. - Cheboksary: Limited Liability Company "Publishing House "Sreda", 2022. - P. 138-140. – EDN NERYTD

5 Provision of stages of the life cycle of steam turbine blades using ultrasonic testing / A. I. Popova, A. I. Popov, V. S. Medko, M. I. Tyukhtyaev // Metallobrabotka. - 2013. - No. 5-6 (77-78). – P. 43-47. – EDN SBOFBP.

6 Alekseev Yu.G., Korolev A.Yu., Parshuto A.E., Niss V.S. Electrolyte-plasma treatment under non-stationary modes in a high-gradient electric field. Science and Technology. 2017;16(5):391-399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>

7 Pulsed electrolytic-plasma technologies for dimensional and finishing processing of metal materials / A. Yu. Korolev, V. S. Niss, Yu. G. Alekseev [et al.] // Powder metallurgy: surface engineering, new powder composite materials. Welding: Proceedings of the 12th International Symposium. In 2 parts, Minsk, April 07–09, 2021 / Editorial Board: A.F. Ilyushchenko (editor-in-chief) [and others]. - Minsk: Republican Unitary Enterprise "Publishing House "Belarusian Science", 2021. - P. 87-93. - EDN QQBOVV.

8 Danilov, I.; Hackert-Oschätzchen, M.; Zinecker, M.; Meichsner, G.; Edelmann, J.; Schubert, A. Process Understanding of Plasma Electrolytic Polishing through Multiphysics Simulation and Inline Metrology. Micromachines 2019.10, 214. <https://doi.org/10.3390/mi10030214>.

9 Zakharov, S. V. Ionization model of electrolytic-plasma polishing / S. V. Zakharov, M. T. Korotkikh, E. V. Gonibesova // SPbPU Science Week: Proceedings of a scientific conference with international participation. In 2 parts, St. Petersburg, November 18–23, 2019. - St. Petersburg: Polytech-Press, 2020. - S. 255-258. – EDN PNORZK.

10 P. Gupta, G. Tenhundfeld, E.O. Daigle, D. Ryabkov, Electrolytic plasma technology: Science and engineering—An overview, Surface and Coatings Technology, Volume 201, Issue 21, 2007, Pages 8746-8760, ISSN 0257-8972, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.11.023>.

11 Danilov, I.; Hackert-Oschätzchen, M.; Schaarschmidt, I.; Zinecker, M.; Schubert, A. Transient Simulation of the Removal Process in Plasma Electrolytic Polishing of Stainless Steel. In Proceedings of the COMSOL Conference 2018, Lausanne, Switzerland, 22–24 October 2018; Available online: https://www.comsol.com/paper/download/573171/danilov_paper.pdf (accessed on 10 December 2018).

12 Zakharov, S. V. Comparative analysis of electrolyte-plasma technologies / S. V. Zakharov, A. I. Popov // Electrophysical methods of processing in modern industry. Special issue: additive technologies: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students, Perm, December 11–12, 2019. - Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2020. - P. 64-67. – EDN KVBMJZ.

13 Quitzke, Susanne & Kröning, Oliver & Safranchik, Daniel & Zeidler, Henning & Danilov, Igor & Martin, André & Böttger-Hiller, Falko & Essel, Shai & Schubert, Andreas. (2022). Design and setup of a jet-based technology for localized small scale Plasma electrolytic Polishing. Journal of Manufacturing Processes. 75. 1123-1133. [10.1016/j.jmapro.2022.01.064](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.01.064).

14 Krishna Kumar Saxena, Jun Qian, Dominiek Reynaerts, A tool-based hybrid laser-electrochemical micromachining process: Experimental investigations and synergistic effects, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 155, 2020,103569, ISSN 0890-6955, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103569>.

15 Quitzke, S., Martin, A., Schubert, A.: Influence of ignition and polishing phase on jet shape

and electric current in jet-plasma electrolytic polishing. In: Proceedings of the 21st International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, EUSPEN 2021, pp. 165–168 (2021)

16 Popov, A.I., Fumin, A.S., Novikov, V.I., Teplukhin, V.G., Veselovsky, A.P. (2023). Peculiarities of Contact Interaction of an Electrolytic Plasma with a Surface in Jet Machining of Materials of Turbine Blades. In: Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R. (eds) Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14125-6_71

17 Wu, Y., Wang, L., Zhao, J. et al. Spray plasma electrolyte polishing of GH3536 superalloy manufactured by selective laser melting. *Int J Adv Manuf Technol* 123, 2669–2678 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10283>

18 High-Speed Dimensional Processing of Metallic Materials with an Environmentally Friendly Jet Electrolyte-Plasma Method / A. Popov, A. Popova, A. Fumin [et al.] // Mechanisms and Machine Science (book series). - 2022. - Vol. 108 mms. - P. 481-489. – DOI 10.1007/978-3-030-87383-7_52. – EDN SEEEN.

19 Patent No. 2623555 C1 Russian Federation, IPC C25F 7/00. Installation for electrolytic-plasma treatment of turbine blades: No. 2016120180: Appl. 05/24/2016: publ. 06.27.2017 / A. I. Popov, M. M. Radkevich, V. N. Kudryavtsev [and others]; the applicant is the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University" (FGAOU VO "SPbPU"). – EDN USJMHW.

20 Patent No. 2656318 C1 Russian Federation, IPC C23C 14/35. Magnetron Spray Head: No. 2017111428: Appl. 04/04/2017: publ. 06/04/2018 / A. I. Popov, M. M. Radkevich, V. S. Medko [and others]; the applicant is the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University" (FGAOU VO "SPbPU"). – EDN UQSEXB.

21 Popov, A. I., Radkevich, M. M., Novoselov, M. V. Peculiarities of electrolytic-plasma polishing of stents, *Technology of Metals*. - 2019. - No. 5. - S. 24-29. – DOI 10.31044/1684-2499-2019-5-0-24-29. – EDN UIJGJG.

22 Popov, A.I., Radkevich, M.M., Teplukhin, V.G.: Thinnest finishing treatment with a focused jet of electrolytic plasma. In: Evgrafov, A.N. (ed.) *Advances in Mechanical Engineering. LNME*, pp. 139–149. Springer, Cham (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-39500-1_15

23 Belyakov S.V., Semenov M.Yu. Modeling of temperature distribution in the surface layer roughness profile during electrolyte-plasma treatment // Scientific readings named after chl.-corr. RAS I.A. Odinga "Mechanical properties of modern structural materials", Moscow, September 17-18, 2020. Collection of materials. Moscow: IMET RAS, 2020. pp. 99-101.

© Попов А. И., Москалец А. А., Беляков С. В., Мурашов Ю. В., Веселовский А. П., Попова Д. А., Иванова Г. В., Яковицкая М.В., Радкевич М. М., 2023