

DOI: [10.34220/2311-8873-2024-31-51](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2024-31-51)



УДК 629.1

UDC 629.1

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**АТОМНО-ДИСЛОКАЦИОННАЯ
МОДЕЛЬ УДАЛЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ
СТРУЙНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-
ПЛАЗМЕННЫМ ПОЛИРОВАНИЕМ**

**ATOMIC-DISLOCATION MODEL OF
SURFACE LAYER REMOVAL BY JET
ELECTROLYTE-PLASMA POLISHING**

✉ **Попов Александр Иннокентьевич**,
к.т.н., доцент Высшей школы машиностроения,
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, г. Санкт-Петербург, e-mail: popov_ai@spbstu.ru

✉ **Popov Alexander Innokentievich**,
candidate of technical sciences, associate professor of
the higher school of mechanical engineering, Peter
the Great St. Petersburg polytechnic university, St.
Petersburg, e-mail: popov_ai@spbstu.ru

Аннотация. Данная работа посвящена разработке модели удаления поверхностных слоев материала анода за счет струйного электролитно-плазменного разряда, сформированного полым катодом. Изложены результаты исследований основных видов разрядов, возникающих в процессе формирования струйной электролитно-плазменной обработки. Изучено влияние каждого вида разряда на морфологию поверхностного слоя анода-изделия. Оценена мощность, время существования и энергия единичных разрядов, проведена оценка влияния их на поверхность. Предложена теория удаления поверхностных слоев единичными разрядами на атомно-дислокационном уровне. Теоретические выкладки подтверждаются результатами экспериментальных исследований и мультифизическим моделированием, проведенным в программе COMSOL Multiphysics. Практические результаты исследований подтверждают возможность снижения параметра шероховатости Ra при струйной электролитно-плазменной обработке более 20 раз при получении чрезвычайно низкого параметра Ra 0,019 мкм. Областью применения результатов данных исследований может являться разработка технологических процессов для размерной и финишной обработки криволинейных поверхностей, таких как блиски, турбинные лопатки, различные изделия хозяйственного и медицинского назначения.

Annotation. This work is devoted to the development of a model for the removal of surface layers of anode material due to a jet electrolyte-plasma discharge formed by a hollow cathode. The results of studies of the main types of discharges that occur during the formation of jet electrolyte-plasma processing are presented. The influence of each type of discharge on the morphology of the surface layer of the anode-product was studied. The power, lifetime and energy of single discharges are estimated, and their influence on the surface is assessed. A theory has been proposed for the removal of surface layers by single discharges at the atomic dislocation level. Theoretical calculations are confirmed by the results of experimental studies and multiphysics simulations carried out in the COMSOL Multiphysics program. Practical research results confirm the possibility of reducing the roughness parameter Ra during jet electrolyte plasma by more than 20 times, while obtaining an extremely low parameter Ra of 0.019 μm . The area of application of the results of these studies may be the development of technological processes for dimensional and finishing processing of curved surfaces, such as blisks, turbine blades, and various products for household and medical purposes.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОЛИТ, ПЛАЗМА, СТРУЯ, АНОД, ДИАГНОСТИКА, ЕДИНИЧНЫЙ РАЗРЯД, МОРФОЛОГИЯ, ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ШЕРОХОВАТОСТЬ. **Keywords:** ELECTROLYTE, PLASMA, JET, ANODE, DIAGNOSTICS, SINGLE DIGIT, MORPHOLOGY, ELECTROSTATIC MODELING.

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Условия ограничения доступа к инновационным технологическим решениям для отечественных промышленных предприятий со стороны ведущих западных компаний и исследовательских центров сдерживают их развитие при производстве продукции мирового уровня [1]. В этом случае государству и частным российским компаниям необходимо делать акцент на внутреннем развитии и расширенном научном финансировании групп российских ученых, ориентированных на получение инновационных технологических решений [2-6]. По нашему мнению, одной из таких областей исследований, позволяющей сегодня и в перспективе решать большой круг прикладных технологических задач, является область электрофизической и электрохимической обработки. Этими технологиями уже сейчас в электролитических ваннах промышленно обрабатываются изделия, подвергаемые растворению, травлению, термическому нагреву для закалки, легированию, полированию, микродуговому оксидированию, электроэрозионному прошиванию, вырезанию и др. [7-17]. В процессе дальнейших исследований находятся технологии обработки струей (струями), такие как легирование, закалка, прошивание отверстий, фигурная резка, размерная обработка, формирование покрытий и получение наноповерхностей [18-22]. Для реализации этих методов разработаны разные устройства для получения плазмы при атмосферном давлении и в условиях низкого вакуума [23-25]. Существуют примеры комбинированных методов с использованием электролитической ванны с направлением в нее электролитической струи (струй). Ряд исследователей дополнительно вводят в струю инертный газ [26, 27]. Другим видом комбинированной обработки поверхности является обработка в струйных течениях электролита или с применением локализованной области электролитной плазмы [28, 29]. В нашем представлении струйная электролитно-плазменная обработка имеет ряд преимуществ, связанных с точностью, скоростью, повышенным качеством обработанной поверхности и более широкими технологическими возможностями.

Анализ работ многих авторов показывает, что в настоящее время как для электролитно-плазменной обработки в ванне, так и для струйной обработки, в частности, нет единого понимания о характере, длительности, мощности и энергии единичных электрических разрядов, возникающих в процессе полирования, а следовательно, нет полного понимания самого механизма полирования поверхности [30-32]. Различные подходы авторов обусловлены во многом тем, что в процессе обработки используются различные источники питания, электролитические ванны, формы электрод-инструментов, составы и концентрации электролитов, сопротивлений и емкостей цепей. Это приводит к разной величине падений напряжений, плотностей токов, проводимости и частотных характеристик разрядов. Поэтому возникающие трудности сравнения и обобщения полученного материала сопряжены с отсутствием единого подхода к проведению исследований, недостаточным изучением морфологии поверхности после разных видов обработки и, как следствие, разной интерпретацией полученных материалов исследований.

Для эффективного внедрения процессов струйной электролитно-плазменной обработки в промышленность необходимо решить следующие вопросы: определить длитель-

ность, энергию и характер единичных разрядов, воздействующих на поверхность металлического анода, изучить механизмы удаления материала, оценить воздействие на поверхность единичного электрического разряда. Это позволит сформировать единую теоретическую основу для данного вида технологической обработки. Целью исследований является разработка модели удаления поверхностных слоев материала металлического анода за счет струйной электролитно-плазменной обработки. Задачами работы являются анализ существующих положений, классификация разрядов, возникающих при струйной электролитно-плазменной обработке, анализ результатов исследований и компьютерного моделирования, разработка теоретических основ струйной электролитно-плазменной обработки.

2 Материалы, оборудование и методы исследований

В процессе проведения исследований нами была использована установка струйной электролитно-плазменной обработки, разработанная в Высшей школе машиностроения Института машиностроения, материалов и транспорта, СПбПУ [18-22]. Основной принцип работы установки заключается в последовательной подаче струи электролита и выпрямленного напряжения на металлический анод. Диаметр струи электролита в нашем случае составил 3-5 мм. Диаметр электролитно-плазменного разряда составил 1-50 мм. Диапазон исследуемых напряжений – от 20 до 500 В. Объемный расход электролита устанавливали в интервале 2-120 л/ч и измеряли с помощью мерного химического стакана по ГОСТ 23932–90 при фиксации времени секундомером. В качестве электролита использовали водные растворы солей Na_2SO_4 , NaCl , NH_4NO_3 , K_2SO_4 , в сочетании с добавками кислот H_2SO_4 , $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ и без оных. При этом концентрация солей устанавливалась в диапазоне 3-360 г/л, а концентрация кислот – 3-5 г/л. Температуру электролита на поверхности измеряли инфракрасным пирометром модели TA601C. В качестве образцов использовали следующие материалы: медь М1, сталь ХВГ, нержавеющей сталь 08Х18Н9Т, хромоникелевый сплав Инконель 718, нержавеющей стали AISI301 и AISI 304, сталь L605, сталь 95Х18, теплостойкие стали 20Х13, 15ХМФШ, материалы, полученные методом лазерного селективного плавления. В работе использовали компьютерные программы твердотельного моделирования SOLIDWORKS и технических расчетов Wolfram Mathematica. Для оценки воздействия единичного электролитно-плазменного разряда на поверхность изделия были проведены электростатические расчеты в программе мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics. Оценка производилась как для регулярного микрорельефа высотой до 15 мкм, так и для условной единичной атомной решетки с размерами с размерами $5 \times 5 \text{ \AA}$. Зону электролитно-плазменной обработки сканировали лазерным сканером Steinbichler Comet V. Данные обрабатывали с помощью программы SOLIDWORKS. Построение модели выполняли с помощью программы Wolfram Mathematica. Диагностику частотных характеристик единичных электрических разрядов проводили с использованием осциллографа HANTEK с полосой пропускания 100 МГц. Морфологию поверхности изучали с помощью оптического микроскопа (МЕТАМ ЛВ 31 ЛОМО, Россия), электронного микроскопа Supra 55 VP–25–78. Оценку дефектов проводили с помощью оптики микротвердомера FM-300 (Япония). Сшивание изображений проводили с помощью программы Thixomet Pro (Россия). Измерение параметров шероховатости поверхности производили с помощью профилометров TR-200 и MarSurf M400. Последний имеет погрешность измерения 3 % от диапазона измерений.

3 Теоретический анализ

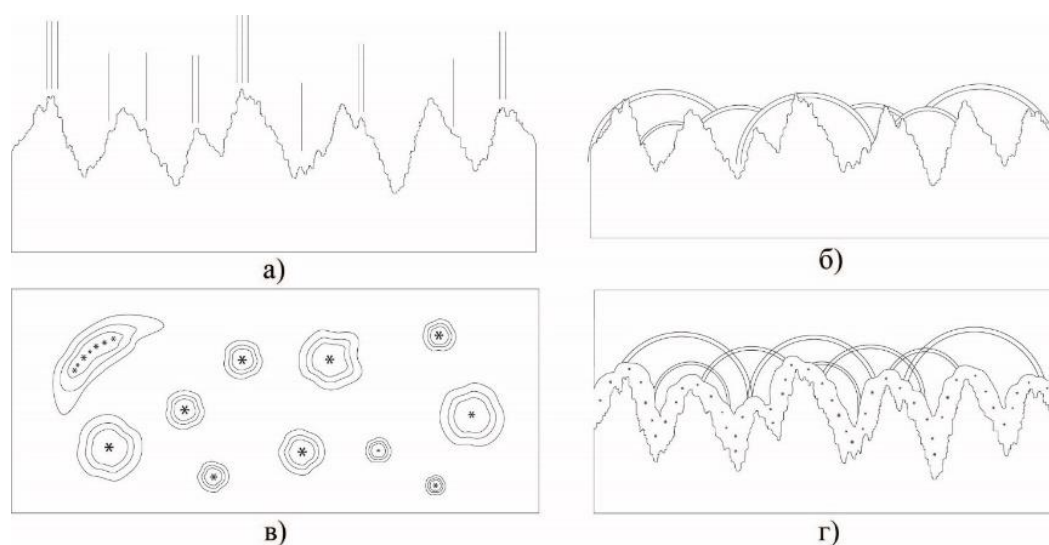
Различные подходы авторов в определении механизма электролитно-плазменного полирования связаны со значительным разбросом входных параметров процесса. Это приводит к тому, что при кажущемся однообразии входных данных возникают разные подходы при выборе мощности и энергии единичных разрядов, формирующих поверхность при том или ином виде электролитно-плазменной обработки. В связи с этим каждый из авторов выбирает свою

величину мощности, энергии и размер «единичной вершины микронеровности» поверхности для проведения расчетов. Анализ приведенных данных показывает, что расчетные значения «вершины микронеровности» различаются на несколько порядков. Так авторы [30, 31] рассматривают размеры «вершин микронеровностей» поверхности от 1,9-1,95 мкм.

Другими авторами рассматриваются пики микронеровностей до 800 мкм [32]. По нашему мнению, использование для расчетов струйной электролитно-плазменной полировки «вершин микронеровностей» с данными размерами является чрезвычайно завышенным. Это связано, прежде всего, с самим механизмом съема или удаления поверхностных слоев материала данным видом обработки. Очевидно, что для разных видов обработки авторы могут взять любой размер «вершины микронеровности». Важным в этом вопросе является то, какой тип разряда применяется и для какого вида технологической обработки. Принципиальным же вопросом является величина энергии единичного разряда (импульса). Многие авторы указывают только выделенную мощность на «вершине микронеровности» [30-32]. Это не отражает сути процесса электролитно-плазменной обработки. При одном и том же электролитно-плазменном процессе для струйной обработки и для обработки в ванне общая выделяемая мощность электролитно-плазменного разряда при этом отличается на несколько порядков. Главным элементом, по которому можно осуществлять сравнение, является длительность единичного разряда (импульса). В этом вопросе наиболее близко к сущности процесса подошли ряд авторов [33-35]. Однако в работе [33] предложенная ионизационная модель электролитно-плазменной обработки, очевидно очень близко затронувшая суть вопроса, не была надежно подкреплена результатами измерений. Показанные значения [33] величин основного диапазона частотных характеристик (17 МГц) электролитно-плазменного разряда не подтверждают величину энергии, прикладываемую к «вершине микронеровности» при воздействии единичного разряда. Данный диапазон длительности импульсов является непомерно большим. Известно, что электролитно-плазменный разряд имеет большой спектр частотных характеристик. В работах [34, 35] авторами измерены значения импульса в диапазоне (200–500 нс). Данный диапазон длительности импульса, по нашему мнению, очень близко соответствует расчетным энергиям разряда единичного импульса при электролитно-плазменной полировке. Нами были рассмотрены несколько аспектов при съеме материала струйной электролитно-плазменной обработкой: распределение напряженности электрического поля по поверхности, распределение зон ионизации при пузырьковом кипении, распределение зон проводимости в зоне разряда, конфигурация поверхности на атомно-дислокационном уровне.

Распределение напряженности электрического поля

При подаче струи электролита (2-8 л/ч) и напряжения (180-340 В) на металлический анод на поверхности возникает высокая напряженность электрического поля ($1 \cdot 10^4$ – $1 \cdot 10^5$ В/м), локальная ионизация и процесс пузырькового кипения электролита. Очевидно, что максимальная напряженность электрического поля формируется на самых острых пиках шероховатости поверхности (рис. 1, а). При этом высота пика не гарантирует максимальной напряженности электрического поля. Это подтверждается тем, что высокие пики микронеровностей после полировки остаются не полностью сглаженными, формируя волнистость поверхности. Это характерно для образцов, полученных методом лазерного селективного плавления (LSM). Даже при значительном увеличении времени в электролитно-плазменной обработке в ванне не происходит полного сглаживания поверхности микропрофиля. При этом поверхность, в том числе, и впадин имеет ярко выраженный блеск. Распределение напряженности электрического поля очень неравномерно по поверхности развитого профиля шероховатости и локализуется между самыми острыми вершинами или малоразмерными объектами (рис. 1, в).



- а) исходная шероховатость поверхности с различной напряженностью электрического поля; б) формирование пузырьковой фазы в процессе Джоулева нагрева; в) области максимальной напряженности электрического поля; г) области ионизации и распределение пузырьковой проводимости

Рисунок 1 – Построение модели процесса электролитно-плазменного полирования

В процессе обработки в каждый момент времени локализация максимальной напряженности электрического поля изменяется.

Распределение зон ионизации при пузырьковом кипении

Анализ возникновения и развития струйного электролитно-плазменного разряда показывает, что в процессе нагрева поверхности анода и в меньшей мере полого катода за счет выделения Джоулева тепла на поверхности начинается процесс кипения:

$$dQ = I^2 \cdot R \cdot dt \quad (1)$$

где: dQ – количество теплоты, выделяемое за промежуток времени, Дж/с; I – величина силы тока, А; R – сопротивление межэлектродного промежутка, Ом; t – время горения электрического разряда, мс.

При низких напряжениях это отчетливо видно для режима электролиза (3-60 В), а затем при возникновении электролитно-плазменного разряда 60-500 В (рис. 1, б, г). В виду того, что возникновение пузырьковой фазы в каждый момент времени носит случайный характер, их место контакта с поверхностью также случайно. Проведенные нами ранее исследования в работе [29] показывают, что процесс ионизации возникает не во всем объеме пузырька, но прежде всего в собственно пузырьковой оболочке (рис. 1, б). И только после увеличения напряжения происходит ионизация внутри собственно объема пузырька. Поэтому в начальный период место контакта оболочки пузырька является наиболее вероятным местом возникновения единичного разряда. Место контакта оболочки пузырька, как и возникновение места пробоя парогазовой фазы, носит случайный характер и может проходить и по впадинам, по вершинам и по боковым поверхностям микронеровностей.

В условиях формирования анодной электролитно-плазменной оболочки возникновение пузырьковой фазы уже играет меньшую роль, так как формирование «сплошного» ионизированного слоя на поверхности анода сглаживает этот фактор.

Распределение каналов проводимости в зоне электрического разряда

Возникновение каналов проводимости для возникновения единичного электролитно-плазменного разряда зависит от распределения напряженности электрического поля (рис. 1, а, в). Напряженность поля, в свою очередь, определяется величиной напряжения, макро- и микрогеометрией электрода-инструмента и собственно микро- (макро-) геометрией обрабатываемой поверхности. Наиболее характерный пример формирования каналов проводимости мы имеем при остром срезе трубки полого катода. Острый срез трубки приводит к высокой напряженности поля, ионизации атомов по линиям электромагнитного поля и стеканию электрического разряда с образованием эрозионных лунок в виде полусфер в окрестности полого катода [18]. Менее выраженный механизм возникновения электрических разрядов происходит при относительно ровной поверхности электрода-инструмента. При этом механизме одновременно за период времени t формируется множество каналов проводимости, перераспределяющих ток разряда по всей поверхности между точками максимальной напряженности и проводимости в данный момент.

Каналы проводимости формируются между хаотично расположенными локальными микродефектами поверхности в виде острых вершин микронеровностей и единичных атомов, выходящих на поверхность, в виде блоков атомов, краевых и винтовых дислокаций и границей ионизированного анодного слоя. Граница ионизированного слоя находится на высоте 10-15 мкм от поверхности металлического анода.

От поверхности анода до границы ионизированного слоя очевидно присутствует большое количество выделившихся из анода отрицательно заряженных ионов кислорода, образующих поляризованный слой для движущихся в сторону анода также отрицательных ионов из области электролитной плазмы. Данный процесс, по нашему мнению, начинается с завершения режима электролиза в ванне (30 В, 60 В, 80 В) и начала электролитно-плазменного процесса. Вследствие этого начинается рост толщины и сопротивления ионизированного анодного слоя и формируется коммутационный режим прерывания и возобновления цепи тока электрических зарядов. При относительно небольшом количестве кислорода процесс имеет достаточную мощность для срыва окисленного слоя. С увеличением напряжения толщина окисленного слоя растет и пропорционально растет сопротивление цепи, а следовательно, уменьшается ток разряда. Заряды не имеют возможности течь через открытые поверхности анода и накапливаются на уровне ионизированного анодного слоя. Однако отрицательно заряженный слой притягивает к себе стекающие с микродефектов положительно заряженные ионы. При этом происходит локальная нейтрализация и истончение окисленного слоя. При достижении пробойного напряжения происходит возобновление тока разряда через сквозное отверстие в окисленном слое и реализация электрического разряда. За счет того, что был накоплен потенциал, и присутствует высокая напряженность электрического поля, создается высокая степень ионизации на границе слоя и возникновение первичного стримера, который формирует и обрушивает лавину электронов с развитием разряда в локальную точку поверхности на вызвавший напряженность дефект.

Многими авторами выдвигались теории развития электрического разряда при электролитно-плазменной обработке [39]. Среди них существует прохождение разряда внутри отдельных пузырьков разряда, прохождение разряда в водной среде электролита (тлеющего разряда). Однако на наш взгляд обе теории имеют недостатки. Изучение развития струйного разряда показывает, что при прохождении через пузырьковую фазу наиболее вероятным является распространение единичного импульса через оболочку пузырька, так как она ионизируется в первую очередь и только потом происходит ионизация парогазовой среды внутри пузырька. Поэтому при прохождении разряда внутри парогазовой оболочки до границы ионизирован-

ного слоя он распространяется в местах контакта оболочек пузырьков, имеющих большее количество подвижных зарядов. При возникновении отдельных разрядов от границ анодного ионизированного слоя движение разряда идет в области наибольшей напряженности поля и по месту наибольшей плотности и проводимости среды.

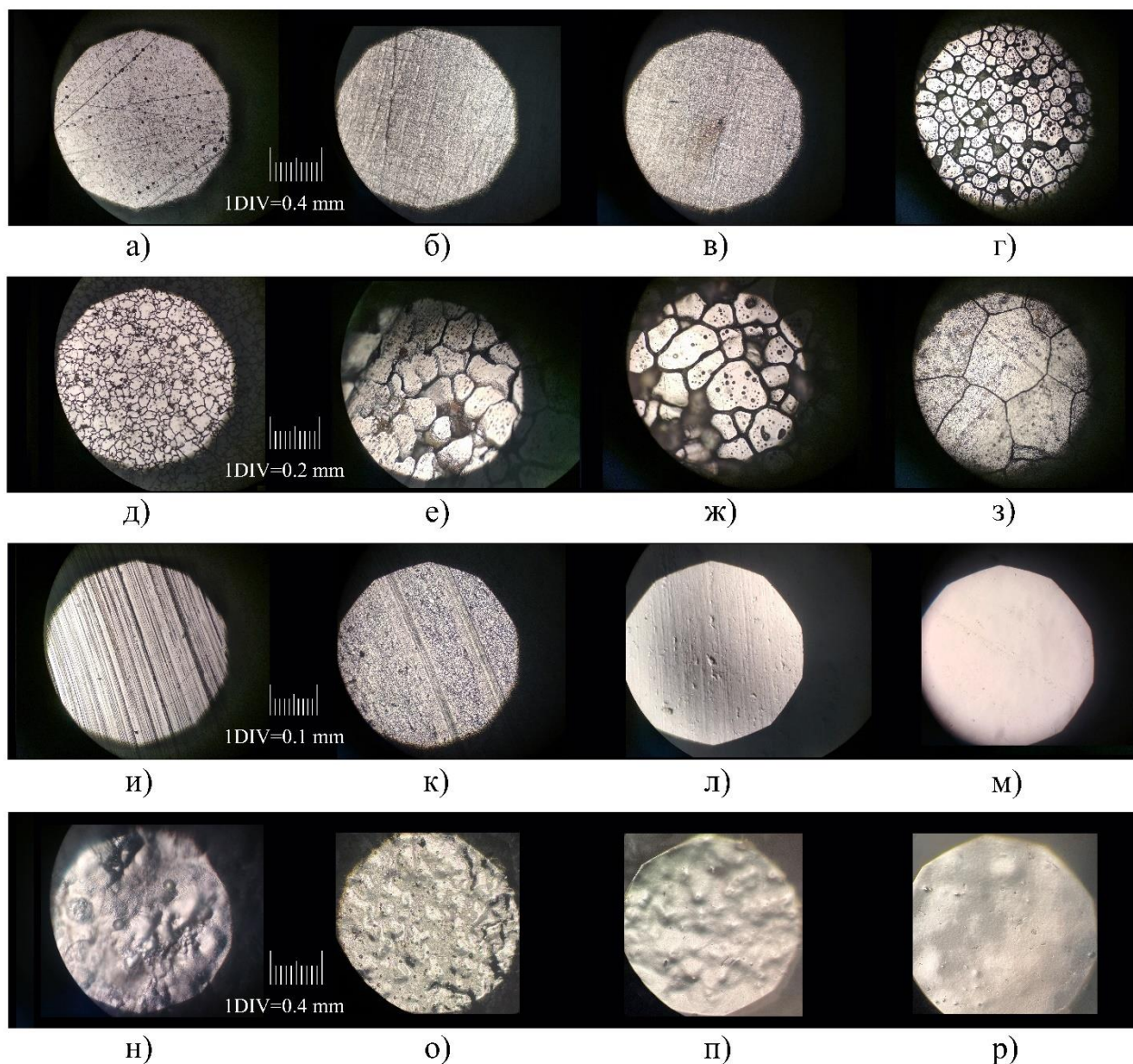
Оценка морфологии поверхности с точки зрения атомно-дислокационной теории удаления поверхностных слоев

Результаты многочисленных экспериментов, проведенных нами при струйной электролитно-плазменной обработке поверхности, показывают, что единичные электрические разряды имеют разброс энергий в широком диапазоне. Такой диапазон энергий обеспечивает развитие разряда в локальной области с различной степенью воздействия на морфологию поверхностного слоя. На рис. 2 представлены микрофотографии поверхностного слоя различных материалов после воздействия единичными электролитно-плазменными разрядами с разным уровнем энергий.

Показано, что поверхность в зависимости от механизма воздействия электрического разряда имеет различную морфологию. При этом в процессе электролитно-плазменной обработки подвергается четырем основным механизмам воздействия, химическому, электрохимическому, эрозионному и электролитно-плазменному. Каждый механизм воздействия, при определенных условиях, позволяет обеспечить полирование поверхности. Однако электролитно-плазменное воздействие имеет свои особенности. Они характеризуются в отличие других механизмов локальной областью контакта единичного разряда с поверхностью, импульсным характером воздействия (подобно электроэрозионному механизму), малой длительностью единичного импульса, малой энергией и случайным характером возникновения единичного импульса на поверхности.

Анализ морфологии поверхности показывает, что отдельные электрические разряды имеют диаметр лунки до 150 мкм, что относит их эрозионному механизму воздействия на поверхность [19]. Энергия единичного разряда в этом случае настолько велика, что характеризует область грубой размерной обработки материала. Режим такой обработки обеспечивает прошивание струей электролита Ø3 мм пластины из нержавеющей толщиной 1мм менее чем за 1 мин. Разрушение поверхности в более «щадящем» виде может происходить при воздействии на поверхность разрядов меньших энергий, таких как (рис. 2, а, б, в, г). При этом диаметр эрозионной лунки после воздействия единичного разряда можно оценить в 20-30 мкм (рис. 2, а). Показано, что при этом происходит разрушение отдельных групп зерен металла. Значительно меньшее взаимодействие по характеру влияния на поверхность происходит при размере эрозионной лунки в 10 мкм. Поверхность при этом выглядит матовой.

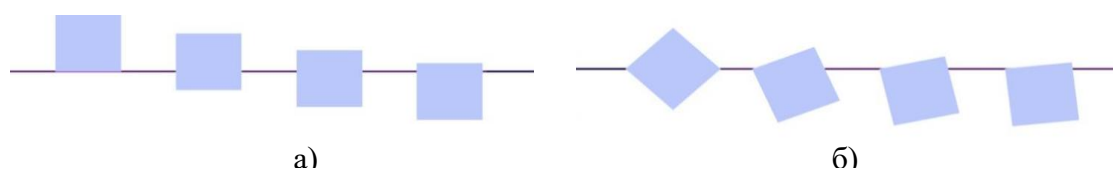
Полирование поверхности происходит при размере локального воздействия единичного разряда значительно меньше, чем 10 мкм. Оценка морфологии поверхности показывает, что размеры межфазного пространства между кристаллитами составляют от 2-20 нм. При этом величина ступеньки может составлять от 20-80 нм, и при воздействии единичных разрядов на поверхность кристаллитов на эту ступеньку не происходит ее разрушения. Этот факт может говорить о том, что электролитно-плазменное воздействие единичным разрядом подобным тлеющему [37-41] происходит на наноуровне.



а) сталь 08X18H9T, размер дефектов 20-30 мкм; *б)* сталь 08X18H9T, размер дефектов 20-30 мкм; *в)* сталь 08X18H9T, размер дефекта 50 мкм; *г)* сталь 95X18, размер дефектов 10-50 мкм; *д)* сталь 95X18, размер дефектов 10-40мкм; *е)* сталь 95X18, размер дефектов 10-30 мкм; *ж)* сталь 95X18, размер дефектов 10-60мкм; *з)* сталь 95X18, размер дефектов 10-20 мкм; *и)* сталь 08X18H9T, исходная поверхность; *к)* сталь 08X18H9T, полированная поверхность зерен вершины микрорельефа; *л)* сталь 08X18H9T, полированная поверхность с исходными дефектами поверхности; *м)* сталь 08X18H9T, полированная поверхность; *н)* сплав после LSM, дефекты 30 мкм; *о)* сплав после LSM, дефекты 30 мкм; *п)* сплав после LSM, полированная поверхность; *р)* сплав после LSM, полированная поверхность

Рисунок 2 – Оценка морфологии поверхностного слоя при воздействии зарядов разных энергий

Единичный разряд удаляет с поверхности объемы размером в несколько нанометров. При этом с поверхности происходит удаление единичных дефектов в виде отдельно стоящих атомов, их блоков, мест выхода дислокаций. Анализ возможного расположения единичных дефектов поверхности показывает ограниченное число вариантов взаимного расположения их на поверхности (рис. 3).



а) при наличии краевых дислокаций и дефектов атомной решетки;
б) при дефектах атомной решетки в виде винтовых дислокаций

Рисунок 3 – Возможное расположение единичных атомных решеток по отношению к поверхности

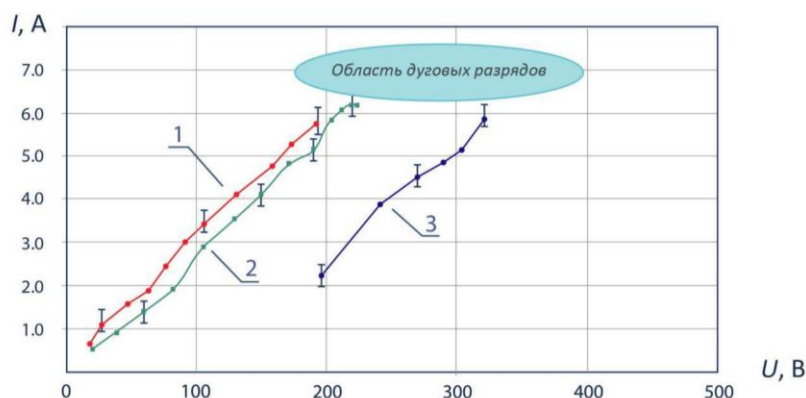
4 Результаты исследований

4.1 Виды разрядов, возникающих при струйной обработке

В процессе струйной электролитно-плазменной полировки нами были исследованы несколько видов электрических разрядов, возникающих при разных условиях. К таким видам разрядов можно отнести дуговой, искровой и разряд, подобный тлеющему

4.1.1 Дуговой разряд

При струйной электролитно-плазменной обработке наиболее характерно возникновение дуговых разрядов в следующих случаях: приближении острого среза трубки полого катода к поверхности анода на 2 мм и ближе, при напряжении между токоподводами в диапазоне 140-380 В, при локальном загрязнении поверхности анода жировыми пленками, при резком локальном повышении напряженности электрического поля между токоподводами, повышении температуры электролита выше 38 °С и др. (рис. 4).



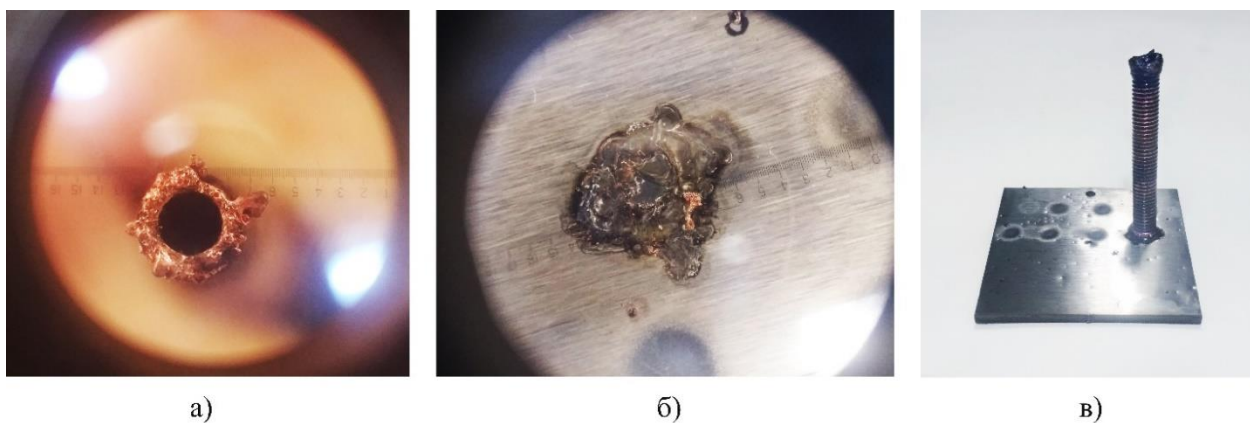
1 – 3 мм; 2 – 5 мм; 3 – 10 мм

Рисунок 4 – Вольт-амперная характеристика процесса в зависимости от высоты межэлектродного зазора

Данные причины приводят к тому, что между анодом и полым токоподводом возникает искровой разряд, переходящий в дуговой. За счет этого в месте контакта дуги с поверхностью анода возникает канал высокой проводимости. При интенсивной электронной бомбардировке поверхности анода в канале дугового разряда происходит мгновенный разогрев металла в пятне контакта и его локальное расплавление. В месте контакта дуги на катоде происходит его расплавление и перенос его материала (меди) на анод (рис. 5). В отдельных случаях происходит расплавление собственно трубки токоподвода и замыкание ее с поверхностью анода (рис. 5, г). Длительность горения дугового разряда в нашем случае составила более 0,63 мс, а энергия единичного разряда 159 Дж и выше.

4.1.2 Искровой разряд

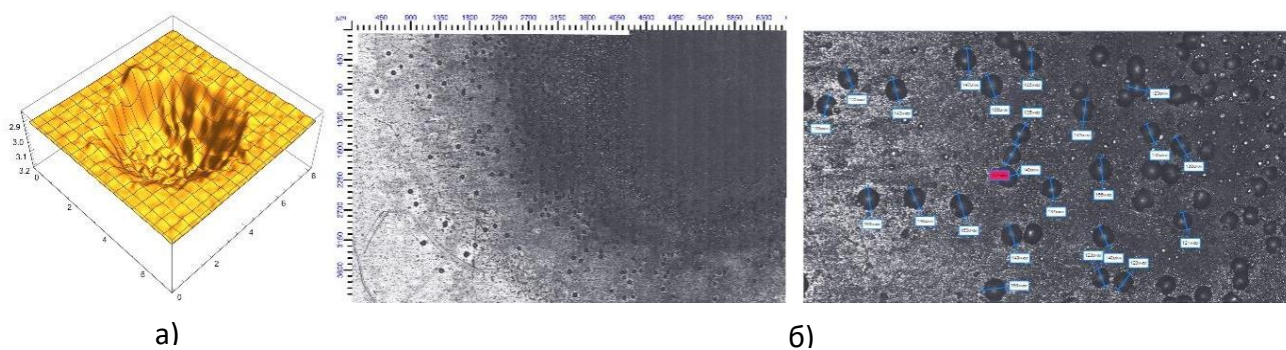
Значительную долю в струйной электролитно-плазменной обработке составляют искровые разряды. Образование плазменного канала в локальном месте при условии высокой напряженности поля от 10^4 до 10^7 В/м и недостаточной проводимости электролита (вследствие низкой температуры и концентрации) приводит к тому, что в зоне обработки формируются множественные электрические разряды значительно меньшей длительности, чем дуговые. Данный вид разряда представляет из себя искровой разряд, эффективно разрушающий поверхность металлического анода.



а) следы дуговых разрядов под срезом трубки полого катода; б) материал катода на поверхности анода; в) расплавленная поверхность среза трубки полого катода

Рисунок 5 – Внешний вид зоны обработки в окрестности полого катода

Искровые разряды имеют значительный разброс в энергиях. В связи с чем в процессе обработки в поверхности образуются локальные микрократеры почти идеальной формы в виде полусферы разных размеров до 150 мкм (рис. 6, а, б). Сравнение объемов кратеров и зон обработки позволило рассчитать объемы и значения энергии единичных искровых разрядов, формирующихся в струе электролитной плазмы. Это сравнение показывает, что их величина находится в диапазоне 0,009-2,306 Дж при частоте возникновения разрядов от $2,95 \cdot 10^{-5}$ до $5,4 \cdot 10^{-3}$ Гц. Данные для разных технологических случаев приведены в табл. 1. Приведенные значения хорошо согласуются со значениями, полученными для искровых разрядов при электроэрозионной обработке [7, 11].



а) модель зоны обработки, полученная лазерным сканированием;
б) кратеры искровых разрядов в окрестности полого катода

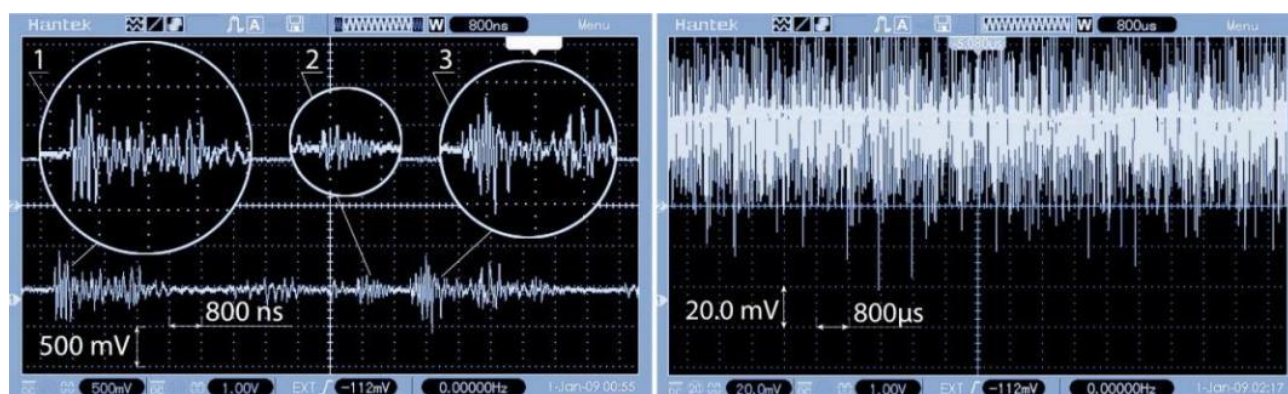
Рисунок 6 – Зона обработки искрового разряда

Таблица 1 – Расчет энергий искровых разрядов, сформированных в зоне обработки

Форма зоны обработки	Сфера	Сфера	Сфера	Цилиндр	Цилиндр
Диаметр, мм	3,0	5,0	3,0	5,0	5,0
Глубина, мкм	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Масса металла, мг	4,08	11,31	4,08	22,33	22,33
Объем, мм ³	0,532	1,474	0,532	2,912	2,912
Усредненный диаметр микрократера, мкм	10	30	50	70	100
Глубина микрократера, мкм	5	15	25	35	50
Масса металла микрократера, мг	0,00000201	5,422E-05	0,00003272	0,00068874	0,002008
Объем микрократера, мм ³	0,00000026	7,07E-06	0,000251	0,0008980	0,0002618
Общее число микрократеров в лунке ΣN , ед	2029850,75	208576,17	124694,38	32427,33	11122,51
Число микрократеров-разрядов/с	33830,85	3476,27	2078,24	540,46	185,38
Частота повторения импульсов T , 1/с	$2,95 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$
Общая энергия разряда, Q , Дж	18630	10670	20250	23085	25650
Энергия единичного разряда Q_n , Дж	0,009	0,051	0,162	0,712	2,306

4.1. 3 Разряд, подобный тлеющему

Развитие разряда, подобного тлеющему при электролитно-плазменном финишном полировании и нанообработке поверхности, является основным видом развития разряда. Данный вид разряда представляет из себя очень кратковременное воздействие на поверхность изделия в локальном месте, вершине микропрофиля в начальный момент, с последующим взаимодействием с границами кристаллитов, местами выхода дислокаций, отдельными атомами и блоками атомов. Энергия единичного разряда при этом составляет очень малую величину $1 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ Дж при времени импульса, составляющем 9–80 нс (рис. 7).



а) наносекундный диапазон; б) микросекундный диапазон

Рисунок 7 – Исследование частотных характеристик электролитно-плазменного разряда

Данные величины для струйной электролитно-плазменной обработки на порядок меньше замеренных авторами статьи [34, 35] и на несколько порядков меньше предложенных авторами работ [33] для оценки энергий разряда при электролитно-плазменного полировании в ванне (табл. 2).

Таблица 2 – Исходные, замеренные и расчетные данные

Исходные данные		Замеренные данные		Рассчитанные данные		
Рабочее напряжение, В	Величина силы тока, А	Время импульса, нс	Напряжение импульса, В	Величина тока единичного импульса, А	Напряжение единичного импульса, Вт	Энергия единичного импульса, Дж
225	0,8-5,6	9-80	300-400	0,14-0,80	0,01-0,32	$1 \cdot 10^{-3}$ - $1 \cdot 10^{-4}$

4.3 Результаты моделирования

Нами рассмотрена напряженность электрического поля при разности потенциалов в 300 В, что соответствует режиму электролитно-плазменной обработки (рис. 9). Расчет производился по формуле:

$$\operatorname{div}(\varepsilon \operatorname{grad} U) = -\rho, \quad (2)$$

где U – потенциал электростатического поля, В; ε – диэлектрическая проницаемость, Ф/м; ρ – плотность объемных свободных зарядов, Кл/м.

В случае, если заряды расположены только на металлическом катоде и металлическом аноде, то плотность объемного заряда будет равна:

$$\rho = 0. \quad (3)$$

При использовании векторного дифференциального оператора Гамильтона ∇ потенциал можно записать:

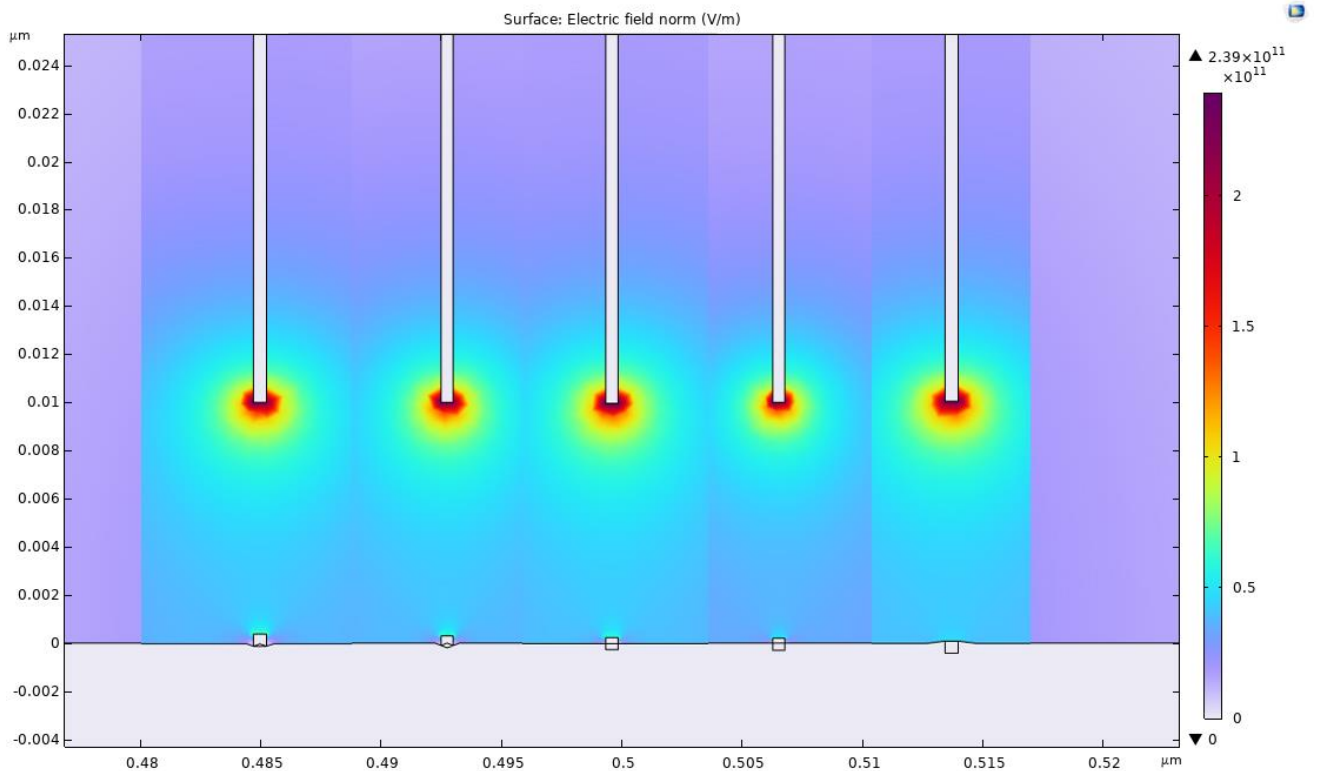
$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla U) = -\rho, \quad \mathbf{E} = -\nabla U, \quad (4)$$

где ∇ – векторный дифференциальный оператор набла (Гамильтона); \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля.

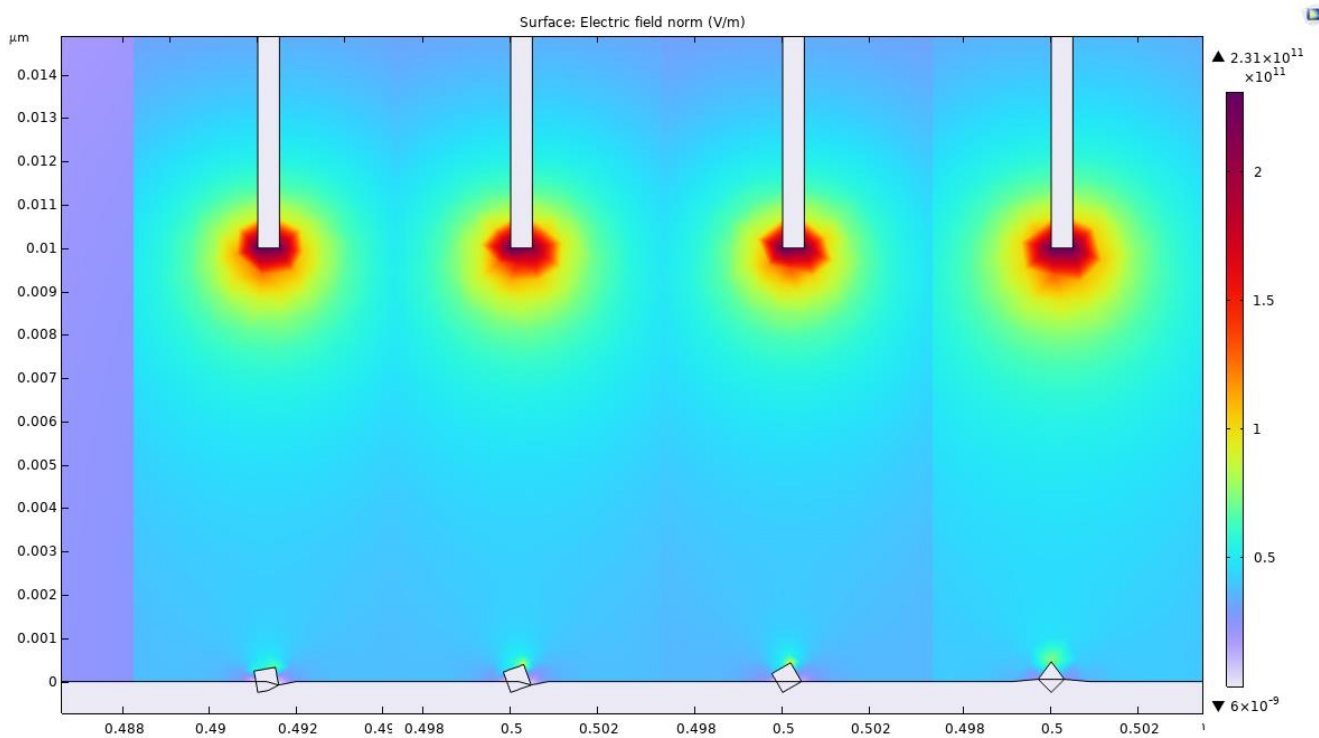
При использовании 2D модели, выражение (4) можно записать как:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\rho, \quad E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}. \quad (5)$$

Для решения задачи была выбрана осесимметричная модель построения. Решение задачи было формализовано до рассмотрения единичного разряда, возникающего на границе ионизированного анодного слоя в момент ее электрического пробоя и микродефекта, представленного в виде единичной атомной решетки размером $5 \times 5 \text{ \AA}$. Расчет производился для решетки, расположенной параллельно плоскости анода, при превышении ее над поверхностью от 1 до 5 \AA и для единичной атомной решетки, расположенной по отношению к поверхности под углами $10-45^\circ$. Диаметр разряда был выбран равным размеру единичного дефекта. За материал канала разряда принят металлический медный проводник.



а)



б)

а) при приближении канала проводимости к вершинам единичной атомной решетки, расположенной параллельно поверхности; б) при приближении канала проводимости к вершинам единичной атомной решетки, расположенной под углом к поверхности

Рисунок 9 – Результаты моделирования напряженности электрического поля

Расчеты напряженности электрического поля показывают, что при приближении к поверхности анода на расстояние от нескольких мкм до нескольких нанометров напряженность поля для рассматриваемого единичного разряда и рассматриваемого единичного дефекта возрастают на несколько порядков. Если для расчета в электролитической ванне напряженность поля для межэлектродного расстояния в 1 метр составляет $4,76 \cdot 10^4$ В/м, то для расстояний для единичного канала проводимости, расположенного на расстоянии в 10 нм, напряженность уже составляет $1 \cdot 10^{12}$ В/м. За счет такой высокой напряженности электрического поля ионизируется вся близлежащая зона в области единичного канала проводимости. При рассмотрении парогазовой-газовой оболочки наблюдается свечение электролитной плазмы в близлежащей к аноду области. Для процессов, наблюдаемых в электролитической ванне разными исследователями, размеры этой зоны лежат в диапазоне 10-500 мкм. Для струйной обработки также наблюдается ионизированная прианодная зона. Ее размер, по нашему мнению, определяется проводимостью электролита, межэлектродным промежутком, шероховатостью поверхности и формой электрода инструмента. Ионизация и свечение ионизированного слоя и его высота сформированы прежде всего точкой развития единичного плазменного разряда. Поэтому свечение всей прианодной зоны определяется как сформировавшимися каналами единичных разрядов, которые формируются с частотой $1.25 \cdot 10^8$ 1/с, так и областями ионизации от близлежащих выступов, блоков, дислокаций и единичных атомных решеток. Поэтому в целом вся прианодная зона выглядит как единый сплошной ионизированный плазменный слой.

5 Обсуждение и заключение

В результате проведения исследований можно обобщить результаты. Струйный электролитно-плазменный разряд на поверхности металлического анода отличается большей долей неравномерности, обусловленной несколькими основными факторами: формой электрода-инструмента, морфологией поверхности, напряженностью электрического поля и проводимостью среды. Морфологию поверхности можно рассматривать на двух уровнях – макроуровне и микроуровне. Макроуровень представляет собой резкие перепады профиля, представляющие собой пики и впадины, или границ зерен металла. Микроуровень характеризуется расположением отдельных выступов элементарной атомной решетки, а также мест выхода дислокаций на поверхность пиков и впадин. Все неравномерности макрорельефа и микрорельефа имеют значительный перепад по напряженности электрического поля в каждой его точке. Очевидно, что не только макрорельеф оказывает влияние на напряжённость электрического поля, но и микронеровности поверхности, которые на атомарном уровне имеют высокую напряженность электрического поля. Эти выступающие элементы поверхности не могут не оказывать влияние на напряженность электрического поля. Напряжённость электрического поля в зоне струйной обработки также не находится на одном уровне. Геометрия собственно инструмента, его острые края и геометрия поверхности оказывают значительное влияние на напряженность электрического поля. Напряженность поля также имеет свои пики и спады. Другим важнейшим параметром является проводимость межэлектродного промежутка. Данный параметр имеет максимальное значение в случае пузырькового кипения по оболочке пузырька, так как именно в нем начинается и проявляется максимальная ионизация и свечение атомов. В случае поверхностного кипения проводимость среды выравнивается и сильно зависит от локальной напряженности промежутка, то есть от размеров, формы и расстояния между дефектами поверхности и острыми краями токоподвода. Удаление поверхностных объемов происходит сглаживанием наибольших вершин микронеровностей ввиду максимальной напряженности электрического поля именно в области пика. Однако при электролитно-плазменной обработке вершины микронеровностей округляются, но не сглаживаются до состояния плоскости. Причиной этого является очень малая мощность единичного заряда, не позволяющего разрушать большие объемы материала. Исследование морфологии поверхности показывает, что единичные разряды, подобные тлеющим обра-

бывают не только вершины поверхности, но и впадины. Это может говорить о том, что напряженность локальных дефектов на микроуровне сопоставима, а во многих случаях больше, нежели напряженность поля на округленных вершинах микронеровностей.

Возникновение электрических разрядов разных энергий говорит не только о разной напряженности электрического поля в локальном месте, но и о разной проводимости среды за счет более высокой ионизации межэлектродного промежутка в локальном месте, что увеличивает время горения единичного разряда и его более сильное влияние на поверхность.

Наличие искровых разрядов большой мощности способно разрушать микронеровности с образованием кратера в поверхности. Большая выделяемая энергия и большая напряженность электрического поля способны вырывать из поверхности расплавленный металл с образованием микрократеров до 150 мкм. Это может приводить к локальной поверхностной закалке сталей. Очевидно, что такие разряды не стоит рассматривать для финишной электролитно-плазменной полировки, требующей очень малые величины съема. Поэтому при выборе мощности разряда и времени его импульса при проведении расчетов необходимо очень скрупулезно подходить к величине его энергии. При струйной обработке при реализации электролитно-плазменного механизма мы имеем дело с очень малым диапазоном энергий единичных разрядов и интервалом их возникновения, соответствующего наносекундам. Очевидно, что данный вид разряда обеспечивает очень низкую скорость съема материала анода и обеспечивает низкий параметр шероховатости поверхности. Однако без предварительной подготовки поверхности за счет обработки разрядами с более высокой энергией, которые позволяют сгладить основные макронеровности, даже за счет увеличения времени обработки этого добиться достаточно сложно.

Выводы:

В соответствии с выполненными теоретическими и практическими исследованиями можно сделать следующие выводы.

1 В процессе струйной электролитно-плазменной обработки при разных начальных температурах электролита возникает несколько видов электрических разрядов: дуговой, искровой и разряд, подобный тлеющему.

2 Приложенная к поверхности мощность данных разрядов лежит в широком интервале энергий от 0,001 до 159 Дж.

3 Электрические разряды, реализуемые при струйной обработке, оказывают различный характер разрушающего воздействия на поверхность: в виде проплавления, эрозийного воздействия, распыления поверхности.

4 Механизм воздействия разрядов малых энергий, подобных тлеющему разряду, сводится к локализации напряженности электрического поля на выступах в виде единичной атомной решетки, мест выхода дислокаций на поверхность, границ зерен ионизации промежутка, формирования канала проводимости и дальнейшего развития единичного разряда.

5 Использование при моделировании энергий единичных разрядов значений более 0,009 Дж для процесса электролитно-плазменной полировки, на наш взгляд, является завышенным и не оптимальным с точки зрения реализации бездефектной поверхности.

Благодарность. Автор выражает благодарность графическому дизайнеру Диане Александровне Поповой за подготовку иллюстраций.

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 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. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2022. – С. 138–140. – EDN NERYTD.

3 Попова, А. И. Государственное управление человеческими ресурсами / А. И. Попова, К. В. Швецов. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2021. – 109 с. – ISBN 978-5-7422-7534-3. – EDN EPRYTX.

4 Попова, А. И. Формирование современных площадок для поддержки молодежного предпринимательства / А. И. Попова // Право, экономика и управление: состояние, проблемы и перспективы: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Чебоксары, 11 февраля 2022 года. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2022. – С. 151–154. – DOI 10.31483/r-101166. – EDN JEJDNQ.

5 Попова, А. И. Малое предпринимательство и миграция в северо-западном федеральном округе Российской Федерации / А. И. Попова, С. А. Черногорский, К. В. Швецов // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. – 2013. – № 6. – С. 12–20. – EDN ROVXGD.

6 Попова, А. И. Цифровая трансформация малого и среднего бизнеса / А. И. Попова // Управление развитием экономической систем. Managing development of economic systems: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 14–15 декабря 2022 года. – Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2022. – С. 105–110. – EDN SEBPVR.

7 Исследование процесса электроэрозионной обработки высокопрочного гранулируемого никелевого сплава нового поколения / Т. Р. Абляз, Е. С. Шлыков, К. Р. Муратов, И. В. Осинников // СТИН. – 2023. – № 6. – С. 31–34. – EDN RHGLCF.

8 Получение пористого никеля из сплава Ni/Cu методом селективного электрохимического травления / М. Т. Артыкбаева, М. А. Елеуов, Г. Т. Смагулова, Р. Е. Бейсенов // Горение и плазмохимия. – 2018. – Т. 16, № 3–4. – С. 226–234. – EDN YQRRAU.

9 Ляхов, А. А. Использование электрохимической полировки для деталей из нержавеющей стали / А. А. Ляхов // Инженерные кадры - будущее инновационной экономики России. – 2018. – № 1. – С. 104–106. – EDN ZASXSX.

10 Захаркин, С. И. Электрохимическая размерная обработка при сверхмалых межэлектродных зазорах: специальность 05.03.01: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Захаркин Сергей Иванович. – Тула, 2002. – 154 с. – EDN QDREGN.

11 Попов, И. С. Электроэрозионная обработка как один из перспективнейших методов обработки металла / И. С. Попов, К. Г. Борисенко // Юность и Знания - Гарантия Успеха - 2018: Сборник научных трудов 5-й Международной молодежной научной конференции. В 2-х томах, Курск, 20–21 сентября 2018 года / Ответственный редактор А. А. Горохов. Том 2. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2018. – С. 259–267. – EDN YNESIP.

12 Плазменное электролитическое оксидирование магниевых сплавов (обзор) / И. А. Козлов, С. С. Виноградов, К. Г. Тарасова [и др.] // Авиационные материалы и технологии. – 2019. – № 1(54). – С. 23–36. – DOI 10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36. – EDN YZIGTJ.

13 Технологические особенности формирования пористых функциональных керамических покрытий на алюминии методом микродугового оксидирования в силикатных электролитах / М. А. Марков, А. В. Красилов, А. Д. Быкова [и др.] // Технология машиностроения. – 2020. – № 4. – С. 29–35. – EDN BSOXSX.

14 Закалка и легирование стали в результате электролитно-плазменной обработки / А. Д. Погребняк, В. В. Понарядов, Ш. М. Рузимов [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом : Материалы V Международной научной конференции, Минск, 06–09 октября 2003 года. – Минск: Белорусский государственный университет, 2003. – С. 76–78. – EDN PVDCJH.

15 Кургузов Сергей Анатольевич, Залетов Юрий Дмитриевич, Косматов Валерий Иванович, Гусева Ольга Сергеевна, Шевцова Ирина Николаевна Электролитно-плазменная очистка поверхности стального металлопроката // ЭС и К. 2016. №2 (31). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektrolitno-plazmennaya-ochistka-poverhnosti-stalnogo-metalloprokata> (дата обращения: 13.12.2023).

16 Кылышканов, М. К. Влияние режимов электролитно-плазменной закалки на структуру и свойства стали бурового долота / М. К. Кылышканов, К. К. Комбаев // Труды университета. – 2009. – № 2(35). – С. 16–18. – EDN QZLZJN.

17 Белкин, П. Н. Электролитно-плазменное азотирование сталей / П. Н. Белкин, С. А. Кусманов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2017. – № 7. – С. 95–118. – DOI 10.7868/S0207352817030040. – EDN YTXASZ.

18 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

19 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. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРУЙНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ // Воронежский научно-технический вестник. 2023. №. 1. С. 4–19. DOI: <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-4-19> (дата обращения: 10.12.2023).

20 Попов А. И. Анализ морфологии при воздействии электролитической струи на поверхность нержавеющей сталей // Воронежский научно-технический вестник. 2023. №.4(46). С. 35–48. DOI: <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-35-48> (дата обращения: 12.12.2023).

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 UIJGJG.

22 Specific Features of Surface Morphology During Plasma Electrolytic Processing / A. Popov, A. Popova, V. Novikov [et al.] // Conference “INTERAGROMASH 2021”. Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry, Volume 2: Conference proceedings, Ростов-на-Дону, 24–26 февраля 2021 года. – Ростов-на-Дону: Springer, 2022. – P. 101–112. – DOI 10.1007/978-3-030-80946-1_11. – EDN CTZZES.

23 Разряд с жидким неметаллическим катодом (водопроводная вода) в потоке воздуха атмосферного давления. Баринов Ю. А., Школьник С.М. 2016, Журнал технической физики, 2016, том 86, вып. 11.

24 Баринов Ю. А., Школьник С.М. Зондовые измерения в разряде с жидкими неметаллическими электродами в воздухе при атмосферном давлении // ЖТФ. 2002. №3. Т.72.С.31-37

25 Электрический разряд переменного тока в однопроцентном растворе хлорида натрия в дистиллированной воде при пониженных давлениях / А. А. Хафизов, Р. И. Валиев, Л. Н. Багаутдинова [и др.] // Теплофизика высоких температур. – 2022. – Т. 60, № 4. – С. 625–628. – DOI 10.31857/S0040364422020065. – EDN FUWOTS.

26 Witzke M., Rumbach P., Go D. B., Sankaran R. M. Evidence for the electrolysis of water by atmospheric-pressure plasmas formed at the surface of aqueous solutions / J. Phys. D: Appl.Phys. 2012 V. 45 P. 5.

27 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 UQSEXV.

28 Электролитно-плазменная обработка материалов / И.С.Куликов, С. В. Ващенко, А.Я. Каменев. НАН Беларуси, Объединенный институт энергетических исследований. Сосны. Минск: Беларуская навука. 2010.

29 Попов, А. И. Особенности формирования электрического разряда между струйным электролитическим катодом и металлическим анодом при атмосферном давлении / А. И. Попов, В. И. Новиков, М. М. Радкевич // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 57, № 4. – С. 483–495. – DOI 10.1134/S004036441903013X. – EDN SJQXBG.

30 Радкевич, М. М. Расчет тепловых полей при локальном принудительном электролитно-плазменном полировании / М. М. Радкевич, И. С. Кузьмичев // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: VI Международная научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, Пермь, 15–16 декабря 2022 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2023. – С. 95–99. – EDN OQRECS.

31 Новиков, В. И. Технологические возможности чистовой обработки турбинных лопаток электролитно-плазменным методом / В. И. Новиков, С. Л. Мурашкин, А. И. Фоломкин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2012. – № 1–2(147). – С. 105–108. – EDN PCNSBZ.

32 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.

33 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.

34 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>.

35 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>.

36 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).

37 Д. И. Словецкий, С. Д. Терентьев, В. Г. Плеханов, “Механизм плазменно-электролитного нагрева металлов”, ТВТ, 24:2 (1986), 353–363; High Temperature, 24:2 (1986), 277–285.

38 Ал. Ф. Гайсин, “Нестационарный многоканальный разряд между струей электролита и металлическим электродом при атмосферном давлении”, ТВТ, 44:5 (2006), 796–797; High Temperature, 44:5 (2006), 792–794.

39 Попова, С. В. Электролитно-плазменная финишная обработка металлов и сплавов / С. В. Попова, С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский // Письма о материалах. – 2015. – Т. 5, № 1(17). – С. 39-43. – EDN TOQZGT.

40 Danilov, Igor & Hackert-Oschätzchen, Matthias & Zinecker, Mike & Meichsner, Gunnar & Edelmann, Jan & Schubert, Andreas. (2019). Process Understanding of Plasma Electrolytic Polishing through Multiphysics Simulation and Inline Metrology. Micromachines. 10. 214. 10.3390/mi10030214.

41 Ю. В. Синькевич, В. К. Шелег, И. Н. Янковский, Г. Я. Беляев, Электроимпульсное полирование сплавов на основе железа, хрома и никеля. Minsk: Белорусский национальный технический университет, 2014.

References

- 1 Stepanova T. D. Technological sovereignty of Russia as an element of economic security *Economic journal Economics: yesterday, today, tomorrow* Volume 12, No. 9A, 2022. p. 567–575.
- 2 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 ChSU named after I.N. Ulyanov): Materials of the International Scientific and Practical Conference, Cheboksary, October 18, 2022.* – Cheboksary: Limited Liability Company “Publishing House “Sreda”, 2022. – P. 138–140. – EDN NERYTD.
- 3 Popova, A. I. State management of human resources / A. I. Popova, K. V. Shvetsov. – St. Petersburg: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University", 2021. – 109 p. – ISBN 978-5-7422-7534-3. – EDN EPRYTX.
- 4 Popova, A. I. Formation of modern platforms to support youth entrepreneurship / A. I. Popova // *Law, economics and management: status, problems and prospects: collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, Cheboksary, February 11, 2022.* – Cheboksary: Limited Liability Company “Publishing House “Sreda”, 2022. – P. 151–154. – DOI 10.31483/r-101166. – EDN JEJDNG.
- 5 Popova, A. I. Small business and migration in the northwestern federal district of the Russian Federation / A. I. Popova, S. A. Chernogorsky, K. V. Shvetsov // *Bulletin of UrFU. Series: Economics and management.* – 2013. – No. 6. – P. 12–20. – EDN ROVXGD.
- 6 Popova, A. I. Digital transformation of small and medium-sized businesses / A. I. Popova // *Management of the development of economic systems. Managing development of economic systems: Collection of scientific papers of the All-Russian Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, December 14–15, 2022.* – St. Petersburg: Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions, 2022. – P. 105–110. – EDN SEBPVR.
- 7 Study of the process of electrical discharge machining of a high strength granulated nickel alloy of a new generation / T. R. Ablyaz, E. S. Shlykov, K. R. Muratov, I. V. Osinnikov // *STIN.* – 2023. – No. 6. – P. 31–34. – EDN RHGLCF.
- 8 Preparation of porous nickel from Ni/Cu alloy by selective electrochemical etching / M. T. Artykbaeva, M. A. Eleuov, G. T. Smagulova, R. E. Beisenov // *Combustion and plasma chemistry.* – 2018. – T. 16, No. 3–4. – pp. 226–234. – EDN YQRRAU.
- 9 Lyakhov, A. A. The use of electrochemical polishing for stainless steel parts / A. A. Lyakhov // *Engineering personnel - the future of the innovative economy of Russia.* – 2018. – No. 1. – P. 104–106. – EDN ZASXSX.
- 10 Zakharkin, S.I. Electrochemical dimensional processing with ultra-small interelectrode gaps: specialty 03/05/01: dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Zakharkin Sergey Ivanovich. – Tula, 2002. – 154 p. – EDN QDREGN.
- 11 Popov, I. S. Electrical discharge machining as one of the most promising methods of metal processing / I. S. Popov, K. G. Borisenko // *Youth and Knowledge - Guarantee of Success - 2018: Collection of scientific papers of the 5th International Youth Scientific Conference. In 2 volumes, Kursk, September 20–21, 2018 / Executive editor A. A. Gorokhov. Volume 2.* – Kursk: Closed Joint Stock Company “University Book”, 2018. – P. 259–267. – EDN YNESIP.
- 12 Plasma electrolytic oxidation of magnesium alloys (review) / I. A. Kozlov, S. S. Vinogradov, K. G. Tarasova [etc.] // *Aviation materials and technologies.* – 2019. – No. 1(54). – pp. 23–36. – DOI 10.18577/2071–9140-2019-0-1-23-36. – EDN YZIGTJ.
- 13 Technological features of the formation of porous functional ceramic coatings on aluminum by microarc oxidation in silicate electrolytes / M. A. Markov, A. V. Krasikov, A. D. Bykova [etc.] // *Mechanical Engineering Technology.* – 2020. – No. 4. – P. 29–35. – EDN BSOXSY.
- 14 Hardening and alloying of steel as a result of electrolyte-plasma treatment / A. D. Pogrebnyak, V. V. Ponaryadov, Sh. M. Ruzimov [etc.] // *Interaction of radiation with a solid body:*

Proceedings of the V International Scientific Conference, Minsk, 06 –October 09, 2003. – Minsk: Belarusian State University, 2003. – P. 76–78. – EDN PVDCJH.

15 Kurguzov Sergey Anatolyevich, Zaletov Yuriy Dmitrievich, Kosmatov Valery Ivanovich, Guseva Olga Sergeevna, Shevtsova Irina Nikolaevna Electrolytic-plasma cleaning of the surface of rolled steel // ES and K. 2016. No. 2 (31). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektrolitno-plazmennaya-ochistka-poverhnosti-stalnogo-metalloprokata> (access date: 12/13/2023).

16 Kylyshkanov, M.K. Influence of electrolyte-plasma hardening modes on the structure and properties of drill bit steel / M.K. Kylyshkanov, K.K. Kombaev // Proceedings of the University. – 2009. – No. 2(35). – pp. 16–18. – EDN QZLZJN.

17 Belkin, P. N. Electrolyte-plasma nitriding of steels / P. N. Belkin, S. A. Kusmanov // Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies. – 2017. – No. 7. – P. 95–118. – DOI 10.7868/S0207352817030040. – EDN YTXASZ.

18 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

19 Popov A. I., Moskalets A. A., Belyakov S. V., Murashov Yu. V., Veselovsky A. P., Popova D. A., Ivanova G. V., Yakovitskaya M. V., Radkevich M. M. ELECTROPHYSICAL REGULARITIES OF JET ELECTROLYTE-PLASMA PROCESSING // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. 2023. No. 1. pp. 4–19. DOI: <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-4-19> (access date: 12/10/2023).

20 Popov A.I. Analysis of morphology under the influence of an electrolytic jet on the surface of stainless steels // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. 2023. No.4(46). pp. 35–48. DOI: <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-35-48> (access date: 12.12.2023).

21 Popov, A. I. Features of electrolyte-plasma polishing of stents / A. I. Popov, M. M. Radkevich, M. V. Novoselov // Technology of metals. – 2019. – No. 5. – P. 24–29. – DOI 10.31044/1684-2499-2019-5-0-24-29. – EDN UIJGJG.

22 Specific Features of Surface Morphology During Plasma Electrolytic Processing / A. Popov, A. Popova, V. Novikov [et al.] // Conference “INTERAGROMASH 2021”. Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry, Volume 2: Conference proceedings, Rostov-on-Don, February 24–26, 2021. – Rostov-on-Don: Springer, 2022. – P. 101–112. – DOI 10.1007/978-3-030-80946-1_11. – EDN CTZZES.

23 Discharge with a liquid non-metallic cathode (tap water) in an air flow at atmospheric pressure. Barinov Yu. A., Shkolnik S. M. 2016, Journal of Technical Physics, 2016, volume 86, issue 11.

24 Barinov Yu. A., Shkolnik S. M. Probe measurements in a discharge with liquid non-metallic electrodes in air at atmospheric pressure // ZhETF. 2002. No. 3. T.72.S.31-37

25 Electric discharge of alternating current in a one percent solution of sodium chloride in distilled water at low pressures / A. A. Khafizov, R. I. Valiev, L. N. Bagautdinova [etc.] // Thermophysics of high temperatures. – 2022. – T. 60, No. 4. – P. 625–628. – DOI 10.31857/S0040364422020065. –EDN FUWOTS.

26 Witzke M., Rumbach P., Go D. B., Sankaran R. M. Evidence for the electrolysis of water byatmospheric-pressure plasmas formed at the surface of aqueous solutions //J. Phys. D: Appl.Phys. 2012 V. 45 R. 5.

27 Patent No. 2656318 C1 Russian Federation, IPC C23C 14/35. Magnetron sputtering head: No. 2017111428: appl. 04/04/2017: publ. 06/04/2018 / A. I. Popov, M. M. Radkevich, V. S. Medko [etc.]; applicant: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University" (SPbPU). – EDN UQSEXB.

28 Electrolytic-plasma processing of materials / I.S. Kulikov, S.V. Vashchenko, A.Ya. Kamelev. NAS of Belarus, Joint Institute for Energy Research. Pines. Minsk: Belarusian Science. 2010.

29 Popov, A. I. Features of the formation of an electric discharge between a jet electrolytic cathode and a metal anode at atmospheric pressure / A. I. Popov, V. I. Novikov, M. M. Radkevich // *Thermophysics of high temperatures*. – 2019. – Т. 57, No. 4. – P. 483–495. – DOI 10.1134/S004036441903013X. – EDN SJQXBG.

30 Radkevich, M. M. Calculation of thermal fields during local forced electrolyte-plasma polishing / M. M. Radkevich, I. S. Kuzmichev // *Electrophysical processing methods in modern industry: VI International scientific and practical conference of young scientists, graduate students and students*, Perm, December 15–16, 2022. – Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2023. – pp. 95–99. – EDN OQRECJ.

31 Novikov, V. I. Technological capabilities of finishing treatment of turbine blades using the electrolyte-plasma method / V. I. Novikov, S. L. Murashkin, A. I. Folomkin // *Scientific and Technical Journal of the St. Petersburg State Polytechnic University*. – 2012. – No. 1–2(147). – pp. 105–108. – EDN PCNSBZ.

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

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

34 Alekseev Yu.G., Korolev A.Yu., Parshuto A.E., Niss V.S. Electrolyte-plasma treatment in non-stationary modes under conditions of 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>.

35 Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu., Parshuto A.E., Niss V.S. Electrolyte-plasma treatment in non-stationary modes under conditions of 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>.

36 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).

37 D. I. Slovetsky, S. D. Terentyev, V. G. Plekhanov, “Mechanism of plasma-electrolyte heating of metals”, *TVT*, 24:2 (1986), 353–363; *High Temperature*, 24:2 (1986), 277–285.

38 Al. F. Gaisin, “Non-stationary multichannel discharge between an electrolyte jet and a metal electrode at atmospheric pressure”, *TVT*, 44:5 (2006), 796–797; *High Temperature*, 44:5 (2006), 792–794.

39 Popova, S. V. Electrolytic-plasma finishing processing of metals and alloys / S. V. Popova, S. A. Muboyadzhyan, S. A. Budinovskiy // *Letters on materials*. – 2015. – Т. 5, No. 1(17). – pp. 39–43. – EDN TOQZGT.

40 Danilov, Igor & Hackert-Oschätzchen, Matthias & Zinecker, Mike & Meichsner, Gunnar & Edelmann, Jan & Schubert, Andreas. (2019). Process Understanding of Plasma Electrolytic Polishing through Multiphysics Simulation and Inline Metrology. *Micromachines*. 10.214.10.3390/mi10030214.

41 Yu. V. Sinkevich, V. K. Sheleg, I. N. Yankovsky, G. Ya. Belyaev, *Electric pulse polishing of alloys based on iron, chromium and nickel*. Minsk: Belarusian National Technical University, 2014.