

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СТРУЙНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ



<sup>1</sup>Александр Иннокентьевич Попов,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (812)552-9302, E-mail: [popov\\_ai@spbstu.ru](mailto:popov_ai@spbstu.ru) .



<sup>2</sup>Сергей Альбертович Кислицын,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого  
Россия, Санкт-Петербург  
Тел.: (812)999-236-58-69, E-mail: [igoigo0510@mail.ru](mailto:igoigo0510@mail.ru).

### Аннотация

В работе рассмотрены теоретические основы струйной электролитно-плазменной резки. Показан процесс формирования электролитно-плазменной струи из полого катода на металлический анод в условиях атмосферного давления. Рассмотрены теоретические предпосылки резки тонкостенных металлических материалов струей электролитной плазмы.

Проведен морфологический анализ поверхности после струйной обработки. Показаны результаты мультифизического гидродинамического и электростатического моделирования свободнопадающей струи на поверхность при расчете в программе COMSOL Multiphysics. Результаты показали, что максимальные скорости резки достигаются при комбинированном воздействии гидродинамических и электрофизических параметров процесса.

*Ключевые слова:* струя, электролит, плазма, морфология, поверхность, моделирование

## **Введение**

В условиях ужесточения зарубежных санкций и снижения уровня доступности технологических решений для РФ основные пути развития предприятий должны опираться на внутренние научные ресурсы и технологические разработки [1]. Одним из таких технологических решений для резки тонкостенных материалов является технология струйной электролитно-плазменной обработки [24]. Собственно электролитно-плазменная обработка используется не одно десятилетие для разных технологических применений, таких как закалка, легирование, полировка, очистка воды и др [14]. Однако работ, посвященных струйной электролитно-плазменной резки, не удалось найти. Поэтому представляет определенный интерес сравнение с существующими технологическими методами раскройной обработки материалов. Для линейных поверхностей это прежде всего резка на гильотинных ножницах[15]. Однако она ограничена линейным срезом. Другим современными видами резки, представляющими из себя локализованный пучок энергии являются гидроабразивная[16], лазерная (комбинированная в струе воды)[17], плазменная резка[19], эрозионная резка проволокой [20]. Каждый из этих видов воздействия на поверхность разрушают связи материала сдвигом, температурным воздействием. Рассматривая стоимость и сложность оборудования для реализации этих технологических процессов можно отметить, что оно обладает значительной стоимостью. Кроме этого, плазменный атмосферный процесс резки сопровождается выбросом в атмосферу паров тяжелых металлов[22]. Лазерный процесс имеет определенный радиационный фон. Эрозионная обработка проволокой представляет из себя длительный процесс. Поэтому, по нашему мнению, является актуальным создание технологического процесса резки более дешевым технологическим способом, более быстрым, и экологически более чистым.

## **Методы**

Для проведения исследований использовали поток струи электролита реализованной на установке струйной электролитно-плазменной обработки, разработанной в Высшей школе машиностроения, ИММиТ, СПбПУ[24]. Исследования струйного потока электролита проводили при разных объемных потоках электролита (8-120 л/ч). Размер зоны растекания измеряли при высоте токоподвода 0-30мм. Объемный поток электролита измеряли с помощью мерного химического стакана по ГОСТ 23932-90. Время измеряли секундомером. Размер зоны растекания электролита измеряли металлической линейкой с ценой деления 0,5 мм. Диагностику

потока электролита проводили с помощью вертикального стержня  $\varnothing 0,8$  мм (рис.1).

В работе использовали современные САПР программы, программу твердотельного моделирования SOLIDWORKS, и программу мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics, В дальнейшем производили построение модели зоны обработки загрузкой облака точек в программу Wolfram Mathematica и моделировании области электролитно-плазменного разряда.

## **Результаты исследований**

### ***Диагностика электролитической струи***

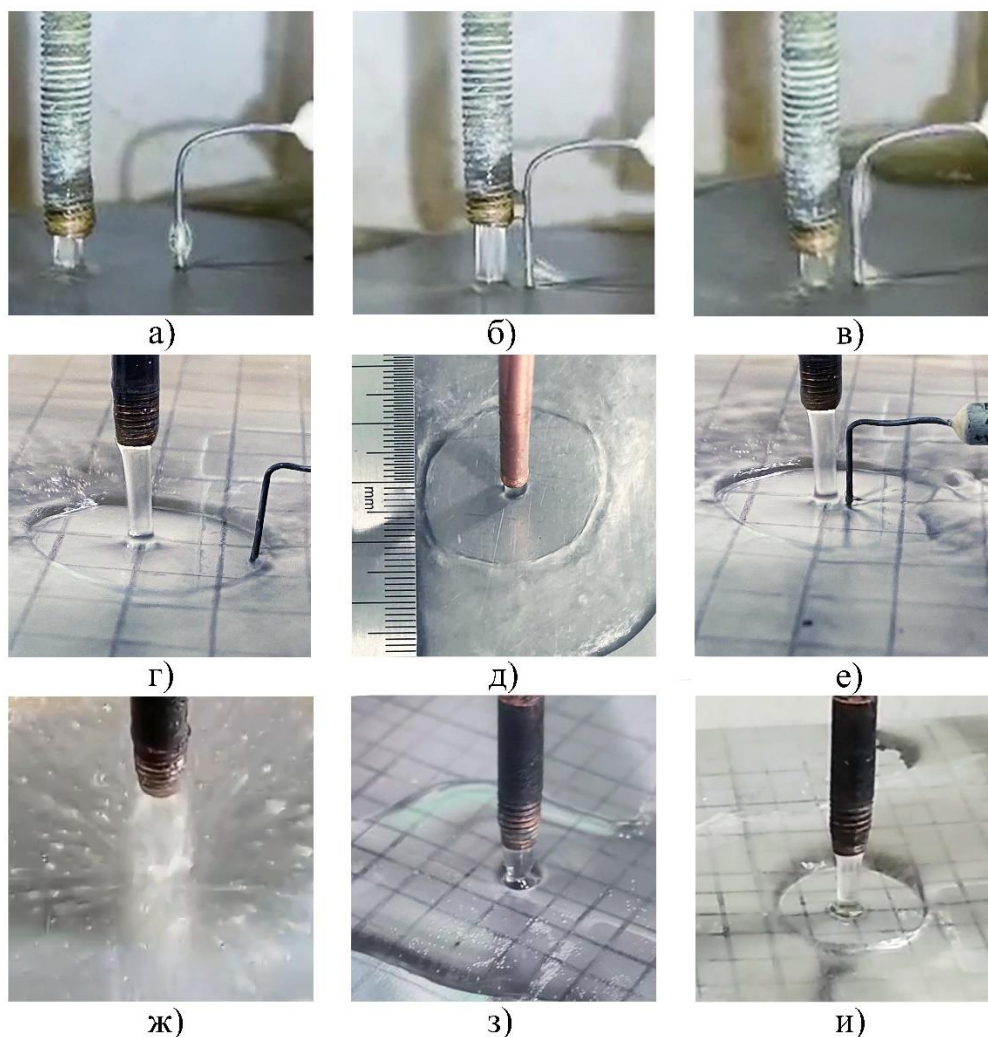
Нами были проведены исследования по диагностике свободнопадающей электролитической струи на поверхность металлического анода (рис.1). Исследования показывают, что при растекании по поверхности от оси полого катода скорость струи значительно уменьшается. Если вблизи полого катода струя заходит на диагностический щуп с образованием капли или гребешка, то ближе к кольцу скорость струи резко падает (рис. 1, *a, б, в, e*). Диагностика щупом показывает значительное изменение формы кольца при установке щупа вблизи оси струи. Диапазон скоростей потока на поверхности, измеренный нами разными способами равен  $0,022 - 0,2$  м/с (рис.1, *ж*). Увеличение диаметра кольца электролита на поверхности прямо пропорционально объемному расходу электролита (рис. 2). Минимальное значение раскрытия кольца в нашем случае составило 6 мм (рис. 1, *з*).

### ***Гидродинамическое моделирование***

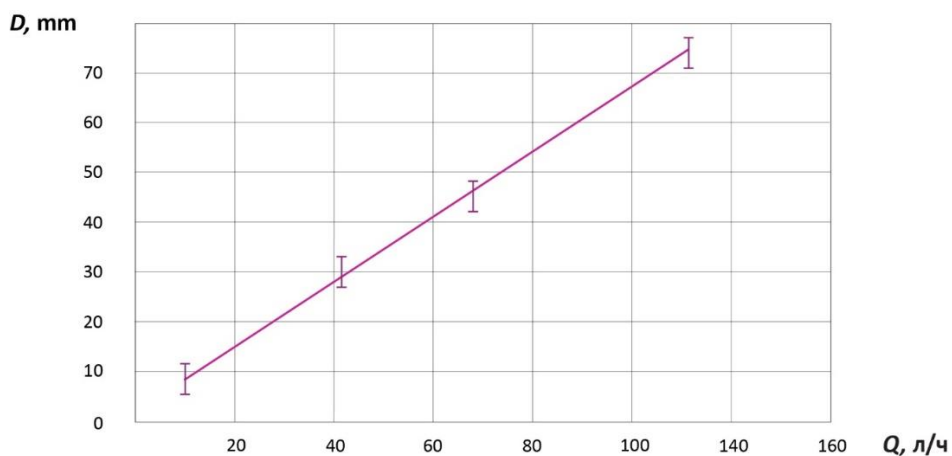
Гидродинамические исследования проводились в программном комплексе «Comsol Multiphysics ver. 6.0». Рассматриваемая модель отражает процесс электролитно-плазменной размерной обработки. В котором ламинарный поток электролита с определенной скоростью направлен перпендикулярно к обрабатываемой детали. Таким образом, в геометрии модели была построена область течения электролита и область детали в общем виде (рис.3, *a*). Модель имеет ось симметрии и построена в оссиметричном пространстве.

В качестве узла для исследования течения в ламинарном режиме был выбран модуль «Laminar Flow». К области течения, в рамках исследования, был применен материал из библиотеки программы «Water». В области моделирования течения жидкости были заданы такие параметры как: вход жидкости область и выход из нее; скорость на входе равна 2 м/с,

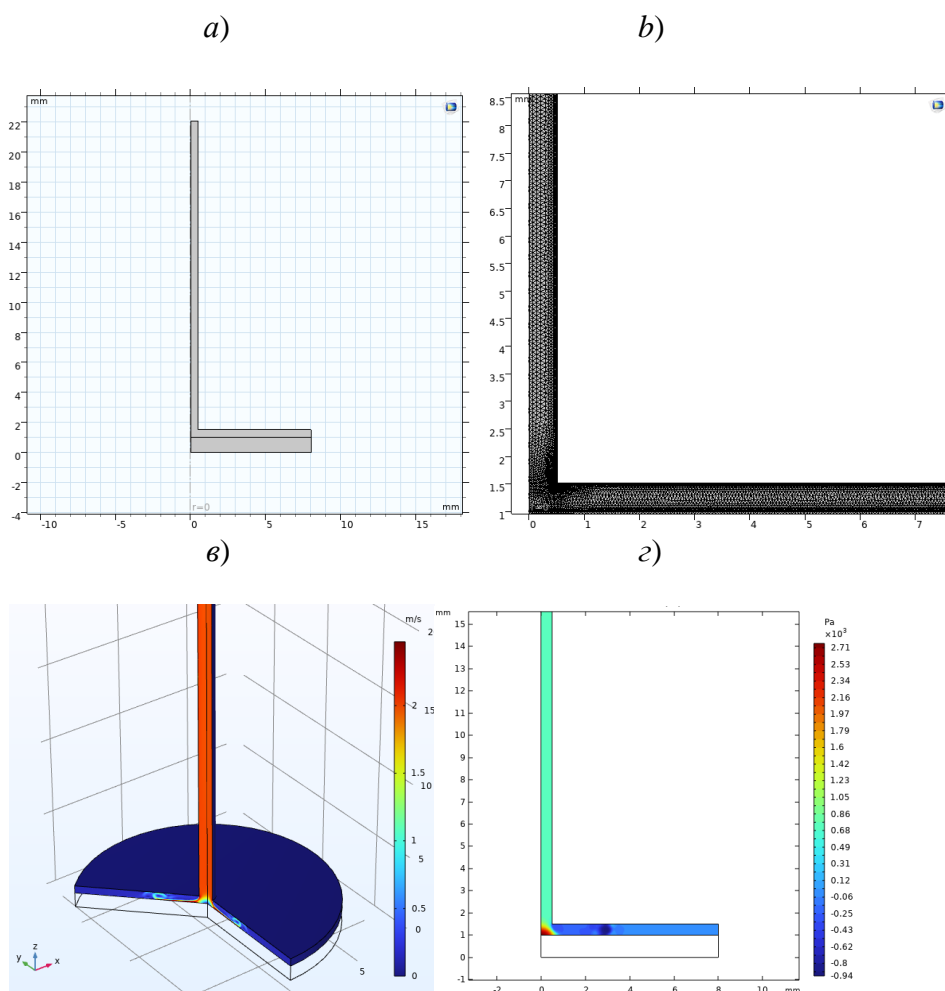
температура имеет значение комнатных условий 293,15 К, давление на выходе атмосферное.



**Рис. 1.** Исследование гидродинамических характеристик электролита: *а)* подъем капли электролита на диагностический щуп, 120 л/ч ; *б)* развитие гребешка потока в основании диагностического щупа, острый угол расхождения потока, 120 л/ч; *в)* одновременное формирование гребешка и капли на диагностическом щупе, 120 л/ч; *г)* незначительное изменение пятна растекания при контроле потока на периферии пятна, 22 л/ч; *д)* измерение пятна растекания металлической линейкой, 22 л/ч; *е)* изменение периферии пятна растекания при контроле щупом близко к оси электролитической струи, 22 л/ч; *ж)* диагностика потока контролем скорости пузырьков воздуха, 120 л/ч; *з)* минимальный размер пятна растекания при объемном расходе 10л/ч; *и)* поток электролита с объемным расходом 22 л/ч при подаче напряжения 90 В.



**Рис. 2.** Зависимость пятна растекания электролита по поверхности от объемного расхода электролита



**Рис. 3.** Пример построения модели: а) в общем виде; б) построение сетки; в) расчетная область скорости ламинарного течения жидкости; г) расчетная область давления через единицу времени.

Расчет модели в модуле ламинарного течения выполняется по уравнению Навье-Стокса:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -(\vec{v} \times \nabla)\vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \times \nabla p + \vec{f}, \quad (1)$$

где  $\nabla$  – оператор набла;

$\Delta$  – векторный оператор Лапласа;

$t$  – время;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости электролита;

$\rho$  – плотность;

$p$  – давление;

$\vec{v}$  – векторное поле скорости;

$\vec{f}$  – векторное поле массовых сил.

Для несжимаемой жидкости которым является электролит должно выполняться условие не сжимаемости:

$$\nabla \times \vec{v} = 0 \quad (2)$$

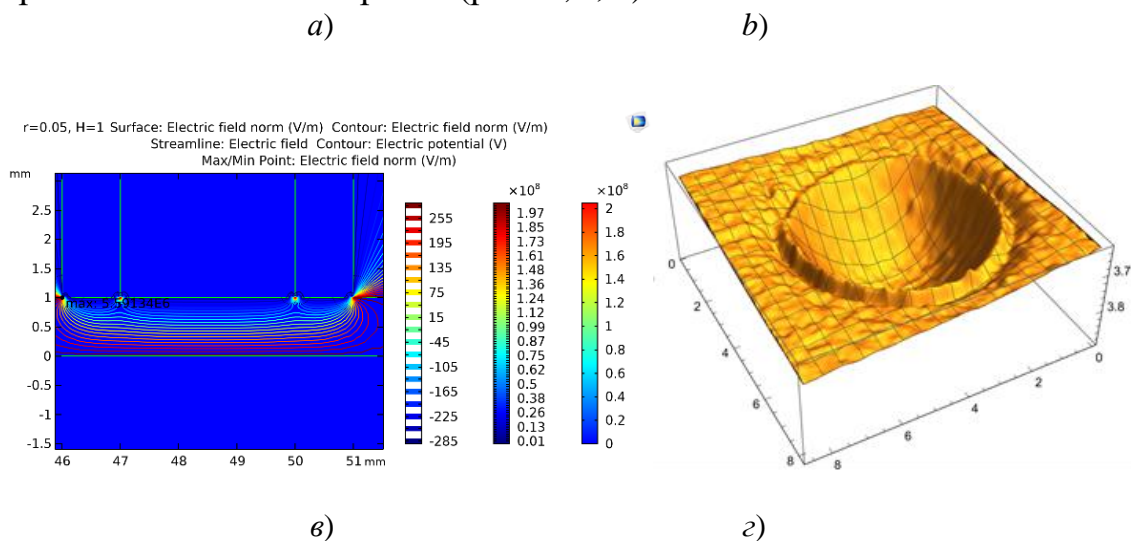
Для обработки результатов выбран не стационарный решатель, а именно «Frequency-Transient», так как предполагается выполнение дальнейших исследований с данной моделью.

Переходя к построению сетки модели (рис. 2, б), ее размер был выбран «Extra fine», благодаря этому удалось достичь большей точности модели, так как точек, в которых происходит расчет становится больше. Для отображения результатов моделирования было задано несколько временных интервалов. Так появляется наглядно наблюдать протекание и распространение полей скорости и давления в модели. Распространение поля скорости программы позволяет отобразить как в двумерной построенной геометрии, так и в трехмерной, которую в результатах эксперимента «Comsol» строит сам.

В нулевой точке течения времени видно, что область не заполнена жидкостью и на модели результатов расчета скорости и давления видны области с нулевыми полями. В нулевой отрезок времени жидкость с заданной скоростью появляется на границе входа. В следующей точки времени расчета наблюдаются следующие результаты. Жидкость бьет в располагаемый ниже анод. Скорость (рис.3, в) в вертикальной части постоянна, что задано начальным условием. В центре столба жидкости у поверхности соприкосновения образуется область, в которой величина скорости равна нулю, но в этой же точки располагается область с максимальным давлением (рис. 3, г)

Также, на построенных моделях наблюдается то, что в горизонтальной области течения жидкости имеется зона максимальной скорости и она несколько возросла от первоначальной. Поток с максимальной скоростью в горизонтальном направлении создает завихрение жидкости, тем самым поднимая ее уровень выше, относительно предыдущего. Модель распределения давления в расчетной модели позволяет также увидеть эту область создаваемого завихрения. Именно в ней давление имеет отрицательное значение (рис. 3, з).

Электростатический анализ и анализ моделей полученных в Wolfram Mathematica показывает максимальную концентрацию напряженности поля на наружном срезе трубки полого катода (рис.4, а, б). Данное обстоятельство вносит существенный вклад в процессе струйной электролитно-плазменной резки (рис. 4, в, з).



**Рис. 4.** Результаты моделирования зоны электролитно-плазменного разряда: а) – электростатический анализ; б) – математическая модель поверхности 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); в) – процесс резки листового материала; з) – результат резки стали 08X18H9Т.

## Обсуждение

Анализ результатов гидродинамического и электростатического моделирования показывает, что струя в зоне обработки воздействует на поверхность с высоким давлением. Это приводит к тому, что электролит растекается в стороны с большой скоростью и вымывает продукты разрушения материала анода из зоны обработки. Электростатика показывает, что острый наружный край трубки полого катода обладает самой высокой напряженностью. Это приводит в определенных условиях к разрушению анода не только в области давления струи, но и глубоким эрозионным воздействиям на периферии этой зоны. Совмещение электрического и гидродинамического воздействия оказывает сильнейшее воздействие на целостность материала приводя его к интенсивному разрушению.

## Заключение.

Выбор технологических режимов, и разработка конструкции катода на основе мульти физического моделирования для смещения зоны эрозионного воздействия непосредственно в зону обработки позволяет надеется на разработку технологического процесса электролитно-плазменной резки в ближайшем будущем.

**Благодарность** Авторы выражают благодарность графическому дизайнеру Д.А. Поповой в подготовке 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] 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. Тюхтяев // Металлообработка. – 2013. – № 5-6(77-78). – С. 43-47. – EDN SBOFBP.
- [6] Попова, А. И. Методы и механизмы управления инновационным потенциалом научно-исследовательской организации : специальность 08.00.05 "Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности, в т.ч.: экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами; управление инновациями; региональная экономика; логистика; экономика труда; экономика народонаселения и демография; экономика природопользования; экономика предпринимательства; маркетинг; менеджмент; ценообразование; экономическая безопасность; стандартизация и управление качеством продукции; землеустройство; рекреация и туризм)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Попова Алла Ивановна. – Санкт-Петербург, 2009. – 230 с. – EDN NQOUTR.
- [7] 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
- [8] 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.

- [9] 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.
- [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] 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](https://doi.org/10.1007/978-3-031-14125-6_71)
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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>
- [15] Гутько, Ю. И. Математическое моделирование процесса раскрытия листовых материалов при помощи гильотинных ножниц / Ю. И. Гутько, В. В. Войтенко // *Наукоемкие исследования как основа инновационного развития общества : Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Уфа, 23 июля 2020 года*. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2020. – С. 116-118. – EDN YXUKCR.
- [16] Иванов, В. В. Управление процессом гидроабразивной резки на основе имитационного моделирования / В. В. Иванов, Е. А. Калашников // *Молодежь и системная модернизация страны : сборник научных статей 5-й Международной научной конференции студентов и молодых*

- ученых, Курск, 19–20 мая 2020 года. Том 5. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 259-263. – EDN HXBLJO.
- [17] Майоров, С. В. Оптимизация режимов прошивки начального отверстия при лазерной резке / С. В. Майоров, М. Д. Хоменко // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – № 1. – С. 10-14. – EDN KZUQAN.
- [18] Сперанский, С. К. Лазерные технологии в науке и производстве (обзор). 1. Технологические особенности лазерной сварки и пайки различных материалов / С. К. Сперанский, И. В. Родионов // Вопросы электротехнологии. – 2019. – № 4(25). – С. 18-37. – EDN FKXQRP.
- [19] Мевлют, Ш. Т. Повышение качества плазменной резки металлов путем оптимизации технологических параметров процесса / Ш. Т. Мевлют, Н. П. Киселев // Проблемы и перспективы студенческой науки. – 2020. – № 1(7). – С. 9-13. – DOI 10.26160/2541-9579-2020-7-9-13. – EDN SKHYUV.
- [20] 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.
- [21] Фрактографический анализ обрывов латунной проволоки, возникающих при электроэрозионной обработке / Ю. О. Бредгауэр, Д. А. Полонянкин, А. А. Федоров [и др.] // Динамика систем, механизмов и машин. – 2020. – Т. 8, № 1. – С. 130-135. – DOI 10.25206/2310-9793-8-1-130-135. – EDN OJMJIG.
- [22] Развитие плазменных методов переработки твердых радиоактивных отходов / А. Н. Бобраков, А. А. Кудринский, А. В. Переславцев [и др.] // Российский химический журнал. – 2012. – Т. 56, № 5-6. – С. 65-75. – EDN QCAMKT.
- [23] Улащик, В. С. Анализ механизмов первичного действия низкоинтенсивного лазерного излучения на организм / В. С. Улащик // Здравоохранение (Минск). – 2016. – № 6. – С. 41-51. – EDN YFZYDX.
- [24] 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 SEEEPEN.
- [25] 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 USJMHW.

- [26] 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 UQSEXB.

A.I. Popov, S. A. Kislitsyn

## THEORETICAL BACKGROUND OF JET ELECTROLYTE-PLASMA CUTTING

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

### Abstract

The paper considers the theoretical foundations of jet electrolytic plasma cutting. The process of formation of an electrolyte-plasma jet from a hollow cathode onto a metal anode under atmospheric pressure conditions is shown. Theoretical prerequisites for cutting thin-walled metal materials with an electrolyte plasma jet are considered.

A morphological analysis of the surface after blasting was carried out. The results of multiphysics hydrodynamic and electrostatic modeling of a free-falling jet on the surface are shown when calculating in the COMSOL Multiphysics program. The results showed that the maximum cutting speeds are achieved under the combined action of hydrodynamic and electrophysical process parameters.

*Key words:* jet, electrolyte, plasma, morphology, surface, modeling

**Acknowledgments** The authors would like to thank the graphic designer D.A. Popova in the preparation of illustrations.

### REFERENCES

- [1] Stepanova T. D. Technological sovereignty of Russia as an element of economic security Economic journal *Ekonomika: yesterday, today, tomorrow* Volume 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 TLVEJZ.
- [3] Popova, A. I. North-Western 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 (k 55 anniversary of the CSU 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] Popova, A.I. Methods and mechanisms for managing the innovative potential of a research organization: specialty 08.00.05 "Economics and management of the national economy (by sectors and areas of activity, including: economics, organization and management of enterprises, industries, complexes; innovation management; regional economy; logistics; labor economics; population economics and demography; environmental economics; economics of entrepreneurship; marketing; management; pricing; economic security; standardization and product quality management; land management; recreation and tourism)" : dissertation for the degree of Candidate of Economic Sciences / Popova Alla Ivanovna. - St. Petersburg, 2009. - 230 p. – EDN NQOUTR.
- [7] 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
- [8] 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.
- [9] 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.
- [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] 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](https://doi.org/10.1007/978-3-031-14125-6_71)
- [12] Belkin, P. N. Electrolytic-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.
- [13] Kylyshkanov, M.K., Kombaev K.K. Influence of electrolytic-plasma hardening regimes on the structure and properties of drill bit steel / M.K. Kylyshkanov, K.K. Kombaev // *Proceedings of the University*. - 2009. - No. 2 (35). - P. 16-18. – EDN QZLZJN.
- [14] 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>
- [15] Gutko, Yu. I. Mathematical modeling of the process of cutting sheet materials using guillotine shears / Yu. I. Gutko, V. V. Voitenko // *Science-intensive research as a basis for the innovative development of society: Collection of articles on the results of the International Scientific and Practical Conference*, Ufa, July 23, 2020. - Ufa: Limited Liability Company "International Research Agency", 2020. - P. 116-118. – EDN YXUKCR.
- [16] Ivanov, V. V. Control of the process of waterjet cutting based on simulation / V. V. Ivanov, E. A. Kalashnikov // *Youth and system modernization of the country: collection of scientific articles of the 5th International scientific conference of students and young scientists*, Kursk, May 19–20, 2020.

- Volume 5. - Kursk: Southwestern State University, 2020. - P. 259-263. -EDN HXBLJO.
- [17] Maiorov, S. V. Optimization of the piercing modes of the initial hole during laser cutting / S. V. Maiorov, M. D. Khomenko // *Physics and chemistry of material processing*. - 2010. - No. 1. - P. 10-14. – EDN KZUQAN.
- [18] Speransky, S. K. Laser technologies in science and production (review). 1. Technological features of laser welding and soldering of various materials / S. K. Speransky, I. V. Rodionov // *Voprosy elektrotekhnologii*. - 2019. - No. 4 (25). - S. 18-37. -EDN FKXQNP.
- [19] Mevlyut, Sh. T. Improving the quality of plasma cutting of metals by optimizing the technological parameters of the process / Sh. T. Mevlyut, N. P. Kiselev // *Problems and prospects of student science*. - 2020. - No. 1(7). - P. 9-13. – DOI 10.26160/2541-9579-2020-7-9-13. – EDN SKHYVY.
- [20] Popov, I. S. EDM 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 conferences*. In 2 volumes, Kursk, September 20–21, 2018 / Managing editor A.A. Gorokhov. Volume 2. - Kursk: Closed Joint Stock Company "University Book", 2018. - P. 259-267. – EDN YNESIP.
- [21] Fractographic analysis of brass wire breaks arising during electroerosive machining / Yu. O. Bredgauer, D. A. Polonyankin, A. A. Fedorov [et al.] // *Dynamics of systems, mechanisms and machines*. - 2020. - V. 8, No. 1. - S. 130-135. – DOI 10.25206/2310-9793-8-1-130-135. – EDN OJMMIG.
- [22] Development of plasma methods for the processing of solid radioactive waste / A. N. Bobrakov, A. A. Kudrinsky, A. V. Pereslavytsev [et al.] // *Russian Chemical Journal*. - 2012. - T. 56, No. 5-6. – S. 65-75. – EDN QCAMKT.
- [23] Ulashchik, V.S. Analysis of the mechanisms of the primary action of low-intensity laser radiation on the body / V.S. Ulashchik // *Zdravookhranenie (Minsk)*. - 2016. - No. 6. - P. 41-51. – EDN YFZYDX.
- [24] 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 SEEEP.
- [25] 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 USJMHV.

[26] 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.