

УДК 621.9.048.

Колков Михаил Романович, аспирант 2 курса, направление подготовки 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки», Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого.

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА НА СЛОЖНО-
ПРОФИЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Аннотация: В статье описывается анализ процесса копировально-прошивной электроэрозионной обработки, проведён ряд экспериментальных прогонов с дальнейшим анализом данных и получением рекомендаций. Составлена сравнительная диаграмма производительности чистового, получистового и чернового режима обработки, получена зависимость шероховатости и потерь электрода от энергии импульса. После анализа полученных результатов были даны практические рекомендации для получения технологически оптимальных режимов при электроэрозионной прошивке.

Abstract: The article describes the analysis of the process of carbon-stitching electroerosion treatment, a number of experimental runs were carried out with further data analysis and recommendations. A comparative diagram of the performance of the finishing, semi-finishing and roughing modes of processing has been compiled, and the dependence of the roughness and losses of the electrode on the pulse energy has been obtained. After analyzing the results obtained, practical recommendations were given for obtaining technologically optimal modes for electroerosion stitching.

Ключевые слова: электроэрозионная прошивка, производительность, электрод, электроэрозионной обработка, копировально-прошивная эрозия, энергия импульса.

Keywords: electroerosion stitching, performance, electrode, electroerosion treatment, copy-stitching erosion, pulse energy.

Актуальность: Актуальность работы обусловлена растущими требованиями аэрокосмической и инструментальной промышленности к изготовлению отверстий в труднодоступных зонах компонентов, таких как охлаждающие каналы в лопатках газотурбинных двигателей.

Цель работы: анализ зависимости производительности электроэрозионной обработки от параметров обработки, получение практических рекомендаций для стабильного получения качественного результата.

Введение

Современные тенденции в машиностроении, в частности в аэрокосмической, энергетической и медицинской отраслях, характеризуются повышенными требованиями к сложности, точности и качеству изготовления компонентов. Одной из наиболее сложных технологических задач является формирование глухих и сквозных отверстий, пазов в изделиях из высокопрочных жаропрочных сплавов (например, на основе никеля или титана), которые к тому же часто имеют сложнопрофильную поверхность. Классические методы механической обработки для решения таких задач зачастую неприменимы или крайне неэффективны в связи с высокой твёрдостью материала, недоступностью зоны обработки [1].

В данном контексте электроэрозионная обработка (ЭЭО) представляет собой наиболее перспективный и технологически гибкий метод. Принцип работы, основанный на тепловом воздействии электрических разрядов на материал заготовки, позволяет обрабатывать любые электропроводящие

материалы вне зависимости от их механической твёрдости. Это делает ЭЭО незаменимой при производстве пресс-форм, лопаток турбин, фильер и других деталей, где требуется создание систем микроохлаждения или других отверстий и пазов сложной формы.

Однако несмотря на преимущества электроэрозионной обработки, процесс сопряжён с рядом проблем, такими как сложность прогнозируемости времени на операцию, в настоящее время расчёт проводится исключительно эмпирическим методом, требующим пробного прогона, сам процесс пробивания материала может занимать значительное время.

Целью работы является экспериментальное определение влияния режимов электроэрозионной обработки на производительность процесса, получение рекомендаций по стабильному получению отверстий повышенной точности.

Материалы и методы исследования

В качестве экспериментального оборудования выбран копировально-прошивной электроэрозионный станок HG45T с возможностью орбитальной обработки (рис. 1).



Рис.1 – Копировально-прошивной станок HG45T

В качестве материала для изготовления электрод-инструмента была выбрана медь М1 ГОСТ 1535-2016. Жидкостью рабочей среды являлось синтетическое масло KR-EDM25 с показателем вязкости 2.1W и точкой вспышки 110°. Задачей было одновременное получение 5 отверстий разных диаметров с малым размерным допуском (± 0.02 мм.) и показателем $Ra \leq 3.2$. Для этого была спроектирована и изготовлена двухкомпонентная оснастка позволяющая зафиксировать 5 медных электрод-инструментов. Суммарная площадь обработки ≈ 8.584 мм². В связи с тем, что в работе присутствует ограничение по показателю Ra и крайне малый размерный допуск, был выбран метод обработки включающий орбитальное вращение электрод-инструмента. Для контроля отверстий были подготовлены проходные и непроходные калибры на границах размерного допуска. Были изготовлены электрод-инструменты для чистовой обработки с диаметром заниженным на 0.1мм –

суммарная площадь ≈ 8.469 мм² и электрод инструменты для черновой обработки с диаметрами заниженными от требуемых на 0.3 мм, суммарная площадь ≈ 5.478 мм², прожигались отверстия глубиной $h = 1,5$ мм. Исследовались режимы обработки для чистовой, получистовой и черновой обработки. В первых двух случаях исследовалась возможность работы без смены электрод-инструмента продолжительный период, в последнем же исследовалась минимизация машинного времени путём введения черного электрода. В качестве обрабатываемого материала выступала сталь марки AISI304, полярность обработки прямая.

В таблице представлены режимы обработки включающие силу тока, длину волны, напряжение и боковые потери электрода и шероховатость электродов через 10 циклов обработки.

Режимы электроэрозионной обработки

Режим обработки и	Длина волны μ , мкс	Сила тока I, А	Напряжение U, В	Время t, мин	Шероховатость электрода, Ra
Получистой	50	4	50	17	2.2
Чистовой	38	2,4	40	35	1.2
Черновой	108	5	60	8.5	3.9

Таб.1 – режимы обработки

В результате проведения экспериментов была получена производительность (V) и построена сравнительная диаграмма.

V	Результат
Черновая обработка	≈ 0.176 мм/мин
Чистовая обработка	≈ 0.088 мм/мин
Получистовая обработка	≈ 0.043 мм/мин

Таб.2 – результаты производительности

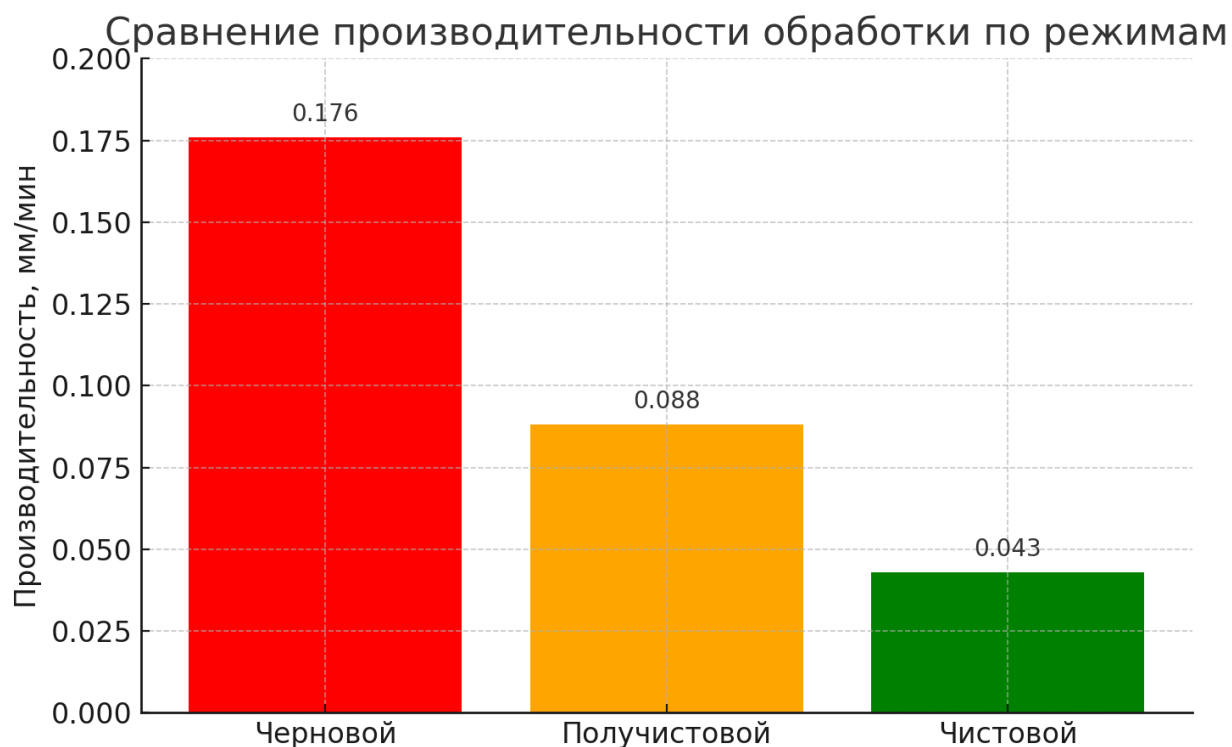


Рис.2 – сравнительная диаграмма производительности.

На диаграмме можно увидеть что производительность логично уменьшается с снижением параметров. Однако, здесь не учтены результаты шероховатости электрод инструмента и его потери. В следующей таблице приведены результаты шероховатости и потери электрода.

Режим обработки	Потери электрода, мм	Шероховатость электрода, Ra
Получистой	0.04	2.2
Чистой	0.01	1.2
Черновой	0.07	3.9

Таб.3 – результаты шероховатости и потери электрода

Исходя из полученных данных получаем графики зависимости шероховатости, потерь электрода от энергии импульса. За энергию импульса принимаем значение W по формуле (1.1) . [2]

$$W = I * U * T \quad (1.1)$$

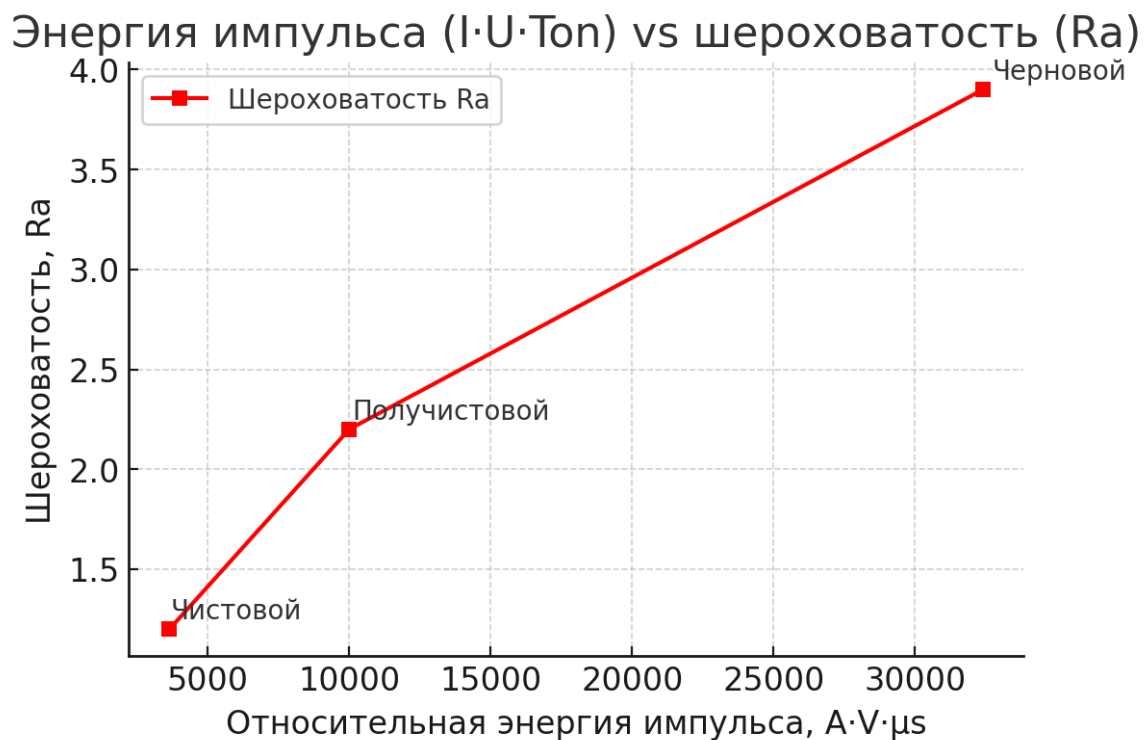


Рис.3 – график зависимости шероховатости от энергии импульса

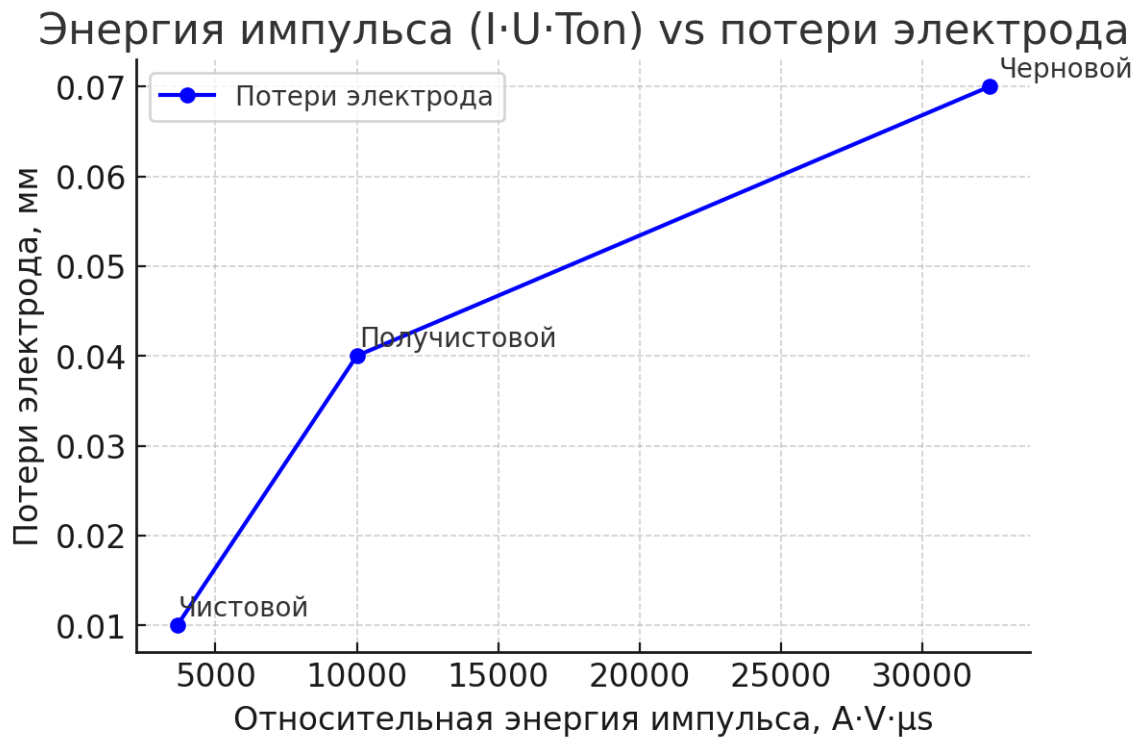


Рис.4 – график зависимости потерь электрода от энергии импульса

Можно заметить что тренд зависимостей практически идентичный, повышение режимной части будет равномерно влиять как на шероховатость, так и на потери электрода[3]

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод что лучшим вариантом будет скомбинировать черновой и чистовой режим, оставив минимальный чистовой припуск. В ходе эксперимента было выявлено что лучшим вариантом будет оставить такой чистовой припуск, который позволит чистовому электроду свободно зайти в отверстие полученное черновым электродом, и расширить его до нужного диаметра орбитальной подачей, потому что в обратном случае время на выполнение уменьшается несущественно. Для расчёта нужного диаметра орбиты, нужно также учитывать межэлектродный боковой зазор [4] и при многократном использовании инструмента также его потери.

В ходе комбинирования чистового и чернового режима, доведение до нужного диаметра чистовым электрод-инструментом используя орбитальную

подачу, время обработки заняло всего минуту, при этом получая нужный результат точности и шероховатости, сам вариант является наиболее предпочтительным. [5]

Заключение

В ходе исследования процесса электроэрозионной обработки сквозных отверстий малого диаметра на сложно-профильной поверхности проведён анализ влияния режимных параметров на производительность, точность и качество обработки. Полученные экспериментальные данные показали, что:

1. С увеличением энергии импульса возрастает производительность процесса, однако одновременно увеличиваются потери электрода и шероховатость поверхности, при этом тренд практически равномерен.
2. При чистовой обработке достигаются минимальные значения шероховатости ($Ra \approx 1.2$) и потерь электрода (0.01 мм), но скорость обработки снижается в 4 раза по сравнению с черновым режимом.
3. Наиболее рациональным является комбинированный подход: использование чернового электрода для формирования отверстия с последующим доведением чистовым электродом при минимальном припуске и орбитальной подаче. Такой метод позволяет существенно сократить машинное время при сохранении точности и требуемых параметров качества поверхности. При этом при правильном расчёте, получистовой режим не имеет смысла.

Практическим результатом работы стало определение оптимального сочетания режимов, обеспечивающего получение отверстий с малым допуском и $Ra \leq 3.2$ при минимальных временных затратах. Предложенные рекомендации могут быть использованы при проектировании технологических процессов электроэрозионной обработки деталей из труднообрабатываемых материалов или же трудновыполнимых механической

обработкой, применяемых в аэрокосмической и энергетической промышленности.

Перспективы дальнейших исследований

Дальнейшее развитие работы видится в следующих направлениях:

1. Разработка математической модели, позволяющей прогнозировать время обработки и потери электрода в зависимости от режимных параметров;
2. Исследование влияния различных материалов электрод-инструмента, материала заготовки и диэлектрических жидкостей на стабильность процесса и качество отверстий;
3. Оптимизация параметров обработки для получения конкретных значений R_a , создание математической модели зависимости шероховатости от режимной части.

Список литературы

[1] Михайлов А.А. Электроэрозионная обработка металлов. — М.: Машиностроение, 2017.

[2] В. И. Никифоров ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

[3] Chen J., et al. Effect of EDM parameters on tool wear. — J. Mater. Process Tech., 2020.

[4] Шлыков Евгений Сергеевич, Абляз Тимур Ризович ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2019. №2.

[5] Smith A., et al. Hybrid EDM strategies for microholes. — Precis. Eng., 2019.

List of literature

- [1] Mikhailov A.A. Electroerosion treatment of metals. Moscow: Mashinostroenie, 2017.
- [2] V. I. Nikiforov ELECTROCHEMICAL AND ELECTROPHYSICAL TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING
- [3] Chen J., et al. Effect of EDM parameters on tool wear. — J. Mater. Process Tech., 2020.
- [4] Shlykov Evgeny Sergeevich, Ablyaz Timur Rizovich IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE TECHNOLOGY OF ELECTROEROSION TREATMENT OF COMPLEX-PROFILE ELEMENTS OF PRODUCTS // Metalworking: technology, equipment, tools. 2019. №2.
- [5] Smith A., et al. Hybrid EDM strategies for microholes. — Precis. Eng., 2019.