



# ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОДАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

XVI «Забабахинские научные чтения»

Явления в плотной плазме

**Анастасия Сергеевна Матвеева, В. Н. Халдеев**

# ВВЕДЕНИЕ

---

В работе осуществлён анализ тепловых процессов, являющихся основой электроэрозионного формообразования. Рабочим инструментом при электроэрозионной обработке (ЭЭО) является электрическая искра, возникающая при импульсном электрическом разряде и представляющая собой низкотемпературную плазму (5-40 тыс. градусов).

Исследование тепловых процессов при ЭЭО преследовало практическую направленность: было выявлено влияние кинематических параметров электроэрозионной обработки сферических поверхностей при наличии вращательных движений электродов (заготовки и инструмента) на технологические показатели процесса.

Было выявлено, что наличие вращательных движений электродов приводит к скольжению теплового потока по обрабатываемой поверхности, снижая производительность процесса и уменьшая шероховатость поверхности.

Наряду с экспериментальными исследованиями, были проведены теоретические исследования, направленные на решение уравнения теплопроводности, обеспечивающее схему тепловых процессов.



# ЦЕЛЬ РАБОТЫ

---



1. Разработать метод электроэрозионного формообразования сферических поверхностей, основанный на самопрофилировании рабочей поверхности инструмента относительно обрабатываемой сферической поверхности.
2. Разработать физическую модель электроэрозионного формообразования сферических поверхностей, в основу которой положено явление дискретного поступления энергии в виде электронного компонента.
3. Получить аналитическое выражение, обеспечивающее связь энергетических параметров электрического импульса для практического применения в электроэрозионной обработке.

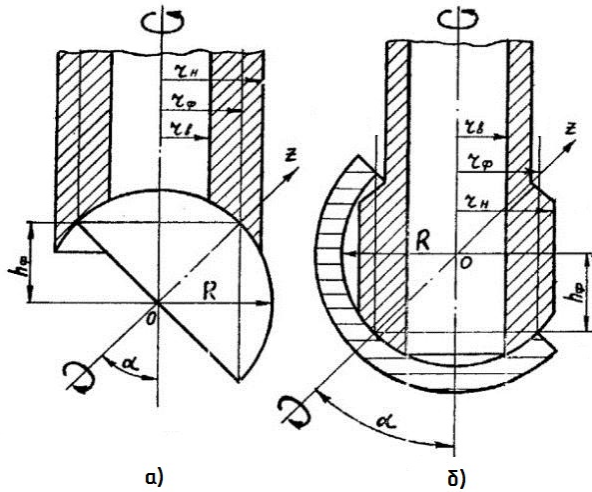


Схема электроэрозионного формообразования сферических поверхностей [1], обеспечивающая высокую точность формы и концентричность поверхностей, приведена на рисунке 1.

В данной схеме обрабатываемая сферическая поверхность и трубчатый электрод-инструмент имеют вращательное движение, при этом оси вращения наклонены друг к другу под заданным углом и пересекаются в центре сферической поверхности. Износ инструмента в данной схеме играет положительную роль, поскольку размеры и форма рабочей части инструмента постоянно соответствуют изменяющейся кривизне обрабатываемой поверхности.

Наличие самопрофилирования рабочей поверхности электрода-инструмента (ЭИ) является основным условием достижения высокой точности обработки поверхностей сферической формы.

**Рисунок 1 – Схема электроэрозионной обработки поверхностей сферической формы самопрофилирующимся электродом – инструментом. Обработка наружной (а) и внутренней (б) поверхности**

1. Иванов А.А., Халдеев В.Н. Обработка сферических поверхностей самопрофилирующимся инструментом. – Технический прогресс в атомной промышленности, – 1988, №12, с.29-32.

Рабочим процессом при ЭЭО является электрическая эрозия под действием электрического разряда в жидкой диэлектрической среде. В результате пробоя диэлектрика между электродами образуется канал сквозной проводимости, в котором электрическая энергия генератора импульсов превращается в тепловую энергию, осуществляющую плавление и испарение материала электродов.

После пробоя диэлектрика между электродами формируется так называемый канал разряда – сравнительно узкая цилиндрическая область, заполненная плазмой. Плазма представляет собой ионизированный газ, содержащий значительное количество свободных электронов и ионов.

Плазма канала разряда при ЭЭО образуется в основном путём ионизации молекул жидкости, заполняющей МЭП. Нормальная температура существования плазмы в условиях ЭЭО находится в пределах от 5000 до 40000 градусов. Основными параметрами плазмы, определяющими её свойства, являются концентрация частиц и температура.

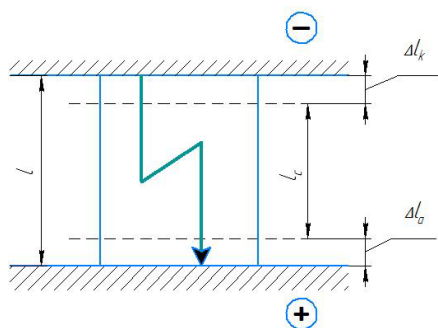


Рисунок 2 – Канал разряда и его составные части

Общая длина канала разряда, в зависимости от электрических параметров режима обработки, находится в пределах от 10 до 100 мкм. При этом области канала разряда отличаются друг от друга градиентом потенциала, а также родом и характером движения заряженных частиц. На протяжении каждой приэлектродной области свойства среды меняются от присущих столбу до присущих поверхности анода или катода. Т.к. любые свойства плазмы передаются через столкновения частиц, то толщина приэлектродных областей пропорциональна длине свободного пробега частиц.



## Физическая модель электроэрозионного формообразования

Разработка физической модели электроэрозионного формообразования основана на том, что основным энергоносителем электрического импульса являются электроны, т.е. данная модель работает в условиях прецизионной обработки с малой длительностью импульса. В процессе разряда электроны ускоренно движутся в направлении анода, однако электроны, имея электрический заряд одного знака и одной величины, находятся на определённом расстоянии друг от друга, т.е. поступление электронов на анод осуществляется порциями.

В работе [2] показано, что расстояние между электронами в канале разряда в осевом направлении пропорционально корню квадратному из произведения заряда электрона и величины МЭП и обратно пропорционально напряжению между электродами:

$$r = \sqrt{\frac{eh}{4\pi\epsilon\epsilon_0 U}}$$

Под воздействием энергии электрического разряда, поступающей на электроды в виде различных её компонентов, происходит процесс эрозионного разрушения материала электродов, т.е. процесс локального плавления и частичного испарения металла в зоне действия этих источников. Поэтому основным физическим фактором, обеспечивающим протекание процесса во всём объёме лунки, образующейся на электродах, принимается эффект теплопроводности. В связи с этим основным уравнением, описывающим процесс распространения тепла в материале электрода, является уравнение теплопроводности.

2. Халдеев В.Н. К вопросу о механизме электрической эрозии электродов. – Электронная обработка материалов, – 2003, №5, с.4-10.



Для прецизионной обработки, осуществляемой при длительностях импульса  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  с, наиболее приемлемым для тепловых расчётов является одномерное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – температуропроводность материала электрода.

Решение этого уравнения позволяет определять температуру  $T$  электрода в заданной точке с координатой  $x$  в момент времени  $t$ .

Учитывая дискретность поступления электронов на анод, решение уравнения теплопроводности может быть получено, исходя из метода мгновенных источников, т.е. может быть представлено в виде:

$$T(h) = T(r)e^{\frac{-x^2}{2\alpha t}}, \quad (2)$$

где  $T(r)$  – температура канала разряда в рассматриваемом сечении.

Выражение позволяет провести аналитический расчёт точек электрода, находящихся в зоне воздействия канала разряда, а следовательно, заранее предсказать производительность ЭЭО и значение шероховатости обработанной поверхности.

Температуру канала разряда по его сечению можно представить в виде параболической зависимости от его радиуса:

$$T(r) = T_0 - k_1 r^2 \quad (3)$$

где  $T_0$  - температура центральной части канала разряда (30-40 тыс. градусов);  $k_1$  - коэффициент пропорциональности, характеризующий остроту параболы.



С установлением дискретности поступления электронов на анод, удалось установить зависимость между энергией и длительностью электрического импульса, что позволяет осуществлять обоснованный выбор электрических параметров режима прецизионной ЭЭО.

$$W_{\text{и}} = k\sqrt{t_{\text{и}}}, \quad \text{где } k = 3,26 \times 10^5 \frac{\text{а}}{\text{с}}$$

Основными параметрами электрического импульса являются его энергия и длительность. Энергия импульса определяет производительность ЭЭО, а длительность определяет процесс развития разряда и распространение тепла вглубь электродов.

Уравнения (2) и (3) позволяют определить глубину плавления или испарения в заданных точках. По результатам расчёта можно построить изотермы плавления и испарения и определить объём металла, удалённого с заготовки за импульс, т.е. определить зоны фазовых превращений в лунке и прилегающей к ней области, а следовательно, предсказать производительность процесса обработки и шероховатость обработанной поверхности.



Кроме того, по формулам (2) и (3) выполнен расчёт глубины проникновения теплового потока до заданных температур в вольфрамовом электроде-заготовке и построены изотермы температур плавления и испарения.

Анализ изотерм на **рис.3** показывает, что тепловой поток, созданный электрическим импульсом, распространяется в основном в осевом направлении, т.е. описание тепловых процессов на электродах с помощью одномерного уравнения теплопроводности даёт вполне удовлетворительный результат.

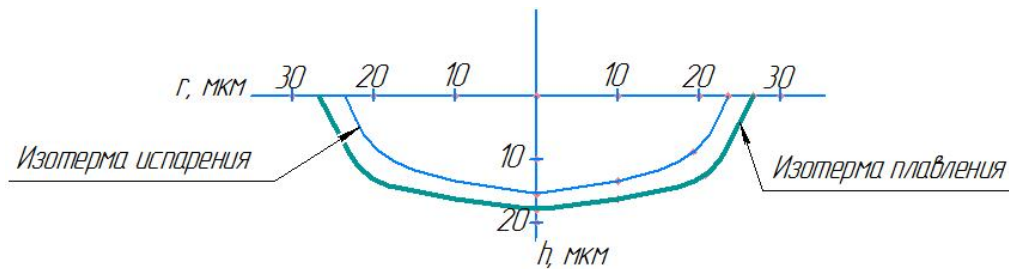
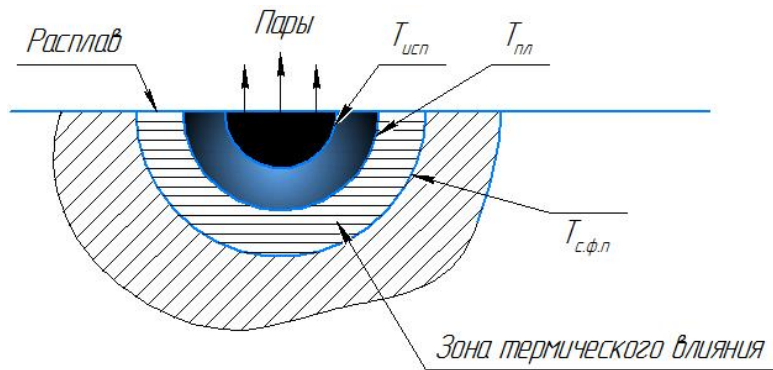


Рисунок 3 – Изотермы теплового поля

Тепловые модели, рассмотренные выше и основанные на анализе нагрева микрообъёма материала электрода поверхностным источником энергии, описывая механизм разрушения кристаллической решётки, позволяют оценить геометрические размеры областей разрушения и нагрева материала.

На рис.4 [3] схематично показано температурное поле в материале образца под воздействием электрического разряда, с указанием **изотерм испарения  $T_{исп}$** , плавления  **$T_{пл}$** , структурно- фазовых превращений  **$T_{с.ф.п}$**  в материале образца.



Анализ изотерм, находящихся ниже изотермы плавления, указывает на возможность протекания различных термомеханических и структурно-фазовых превращений твердофазного материала электродов в окрестностях контакта с плазменным каналом разряда.

При ЭЭО металл подвергается серии локальных термоударов, при которых скорость нарастания и снижения температуры имеет порядок  $10^6 \dots 10^8$  град/с. Вследствие этого формируется и распространяется от нагретой поверхности внутрь тела продольная упругая волна термонапряжения.

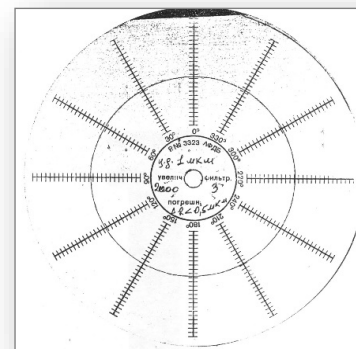
**Рисунок 4 – Схематическое изображение изотерм локального температурного поля**

## Экспериментальные исследования

Проведённые экспериментальные исследования подтвердили основные положения теоретических исследований и позволили изготовить тонкостенные прецизионные полусферические оболочки из вольфрама и его сплавов. Результаты эксперимента представлены на рисунках 5 и 6.



**Рисунок 5** - Полусферические оболочки наружным диаметром 18 мм и 3 мм из вольфрама, изготовленные методом электроэрозионного формообразования



**Рисунок 6** - Круглограмма выпуклой поверхности сферической оболочки диаметром 18 мм. Величина отклонения от круглости менее 0,5 мкм



Теоретически предсказано и экспериментально подтверждено влияние вращательных движений электродов на технологические показатели ЭЭО. Вращение инструмента и заготовки, оси вращения которых наклонены друг к другу под заданным углом, приводит к скольжению высокотемпературного канала разряда по поверхности обрабатываемой заготовки, что снижает проникновение теплового потока вглубь электрода, уменьшая тем самым производительность обработки, но вместе с тем уменьшая шероховатость поверхности.



1. Разработан метод электроэрозионного формообразования сферических поверхностей, основанный на самопрофилировании рабочей поверхности инструмента относительно обрабатываемой сферической поверхности. Метод обеспечивает получение полусферических оболочек высокой степени точности формы (отклонение от круглости менее 0,5 мкм) и точности расположения поверхностей (разнотолщинность стенки оболочки менее 1 мкм) в широком диапазоне размеров (от единиц до сотен миллиметров), отличающихся малой жесткостью (толщина стенки до 0,2 мм), из токопроводящих материалов вне зависимости от их физико-механических свойств.
2. Разработана физическая модель электроэрозионного формообразования сферических поверхностей, в основу которой положено явление дискретного поступления энергии в виде электронного компонента. На основании разработанной физической модели определено соотношение между энергией и длительностью электрического импульса, позволяющее оптимизировать процесс эрозии, а также предложено решение одномерного уравнения теплопроводности для анализа тепловых процессов на электродах в особенностях формообразования сферических поверхностей методом самопрофилирующегося инструмента.
3. Результаты теоретических исследований использовались при изготовлении оболочек для исследования газодинамического термоядерного синтеза и подтверждены комплексом специальных экспериментальных исследований, что даёт основание для широкого применения предложенной методики получения полусферических оболочек во многих других отраслях науки и техники.



# Спасибо за внимание!

XVI «Забабахинские научные чтения»

Явления в плотной плазме

**Анастасия Сергеевна Матвеева** аспирант СарФТИ НИЯУ МИФИ,

**В. Н. Халдеев** доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технологии специального машиностроения». Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ – Саровский физико-технический институт (СарФТИ-НИЯУ-МИФИ).