

УДК 621.793, 691.9.048.4

**Н. М. Чигринова**, д-р техн. наук, проф.*Белорусский национальный технический университет г. Минск, Республика Беларусь**Тел./Факс: +375 17 293 95 81; E-mail: chigrynova@ya.ru*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МИКРОПЛАЗМОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ**

*В работе предложена математическая модель энергомеханической интенсификации метода электроискрового легирования за счет применения дополнительного ультразвукового воздействия с разработкой и определением взаимосвязи составных частей системного анализа, включающих моделирование на уровне математических аналогий, структуризацию, иерархию и исследование законов протекания взаимодействий в системе металл – среда – покрытие, связь системы с условиями эксплуатации. Приведены физические модели плазменных явлений при электроискровом легировании как основа для разработки теории интегральной технологии с участием ультразвука.*

**Ключевые слова:** *Интегральная технология электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием, анодно-катодные взаимодействия, электроразряд, вибрация анода, эрозия электрода, затвердевание капли.*

**N. M. Chigrinova**

## **MODELING THE PROCESS OF ENERGY-MECHANICAL INTENSIFICATION OF MICROPLASMA PROCESSING IN A GAS ENVIRONMENT**

*The paper proposes a mathematical model of the energy mechanical intensification of the electric spark doping method by applying additional ultrasonic influence with the development and determination of the relationship of the components of the system analysis, including modeling at the level of mathematical analogies, structuring, hierarchy, and study of the laws of interaction in the metal-medium-coating system, the relationship of the system with operating conditions. Physical models of plasma phenomena in electric spark doping are presented as a basis for developing the theory of integral technology involving ultrasound.*

**Keywords:** *Integrated technology of electric spark doping with additional ultrasonic influence, anode-cathode interactions, electric discharge, anode vibration, electrode erosion, drop solidification.*

### **1. Введение**

Микроплазмоискровая обработка в газовой среде, к которой в полной мере можно отнести и метод электроискрового легирования (ЭИЛ), широко применяется для защиты рабочих поверхностей деталей машин и оборудования, металлорежущего инструмента и штамповой оснастки от интенсивного абразивно-механического износа, восстановления изношенных деталей вследствие формирования в критических зонах износостойких покрытий. Операции восстановления в некоторых случаях являются финишными, дающими возможность исключения последующей механической обработки для получения требуемых размеров, укладываемых в допуски.

Однако в типовом методе ЭИЛ, несмотря на многочисленные исследования и разработки по его совершенствованию, и сегодня имеются нерешенные задачи: ограниченная мощность стандартного оборудования, малый диапазон регулирования колебаний электрода по частоте и амплитуде, что обуславливает формирование покрытий с неоднородной структурой и нерегулярным рельефом обработанной поверхности. При этом созданные покрытия отличаются высокой шероховатостью и пористостью, ограниченной толщиной. Совершенствование упрочненных, восстановленных или модифицированных в процессе стандартного электроискрового легирования (ЭИЛ) изделий, а также созданных на их поверхностях покрытий связано с

оптимизацией их структурного состояния. Авторы предложили реализовать желаемый результат за счет повышения интенсивности энергии механического воздействия на материал в результате применения ультразвука [1]. С этой целью была разработана интегральная технология ЭИЛ с УЗВ на разных стадиях обработки металлической поверхности.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Электроискровое легирование, будучи разновидностью искровых микроплазменных процессов обработки металлических материалов, осуществляется в условиях регулируемого электрического разряда в воздушной среде и, благодаря электротермическому действию импульсного электрического тока, обеспечивает перенос материала анода (электрод) на катод (деталь) в процессе изменения положения электродов относительно друг друга [2, 3].

При сближении электродов напряженность электрического поля увеличивается и, достигнув определенной величины, вызывает воздушный пробой промежутка между электродами. Возникает канал сквозной проводимости, формирующий микродуговой газовый разряд. Появляющийся при этом ток пробоя по своей природе является импульсным током. Он вызывает локальный разогрев и плавление материала анода, приводит к локальному разогреву ионов воздуха, их стремительному расширению (взрыву), увеличению зоны пробоя, отрыву и осаждению на поверхность катода материала анода. После этого разряд прекращается.

Объем плазмы, образуемой при электрическом разряде в момент возникновения искры между анодом и катодом, увеличивается в течение времени  $t$ , длительность которого обычно составляет менее 100 мкс. В результате расплавления материала анода окружающий эродирующий материал плотный «жидкий» диэлектрик сдерживает рост плазмы, фокусируя энергию  $UIt$ , в малой области. При этом локальные плазменные температуры могут достигать  $\sim 40\,000$  К. Здесь  $t$  – длительность электроискрового разряда. Первым быстро расплавляется анод вследствие поглощения высокоэнергетичных электронов в начале процесса образования плазмы [2, 3].

В общем случае система для осуществления процесса ЭИЛ состоит из катода, анода и разделяющего их газообразного диэлектрика (рисунок 1).

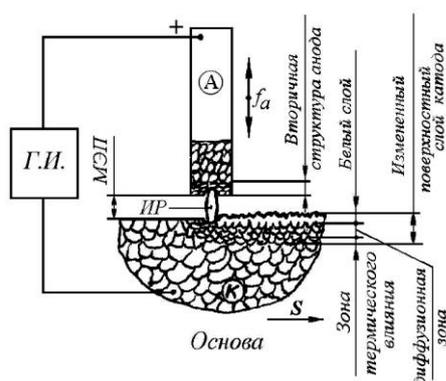


Рисунок 1. Общая схема процесса ЭИЛ

Г.И. – генератор импульсов, МЭП – межэлектродный промежуток, ИР – искровой разряд, А – анод (компактный электрод), К – катод (деталь),  $f_a$  – частота вибрации анода, S – направление подачи детали [3]

Затем, спустя несколько микросекунд, анод начинает затвердевать. Это объясняется расширением радиуса плазмы около анода, что приводит к уменьшению локального теплового потока на поверхности анода. Расплавление катода запаздывает по времени по сравнению со временем расплавления анода вследствие низкой мобильности положительных ионов вблизи анода. Более того, поскольку катод эмитирует электроны, радиус плазмы на катоде также гораздо меньше, что обеспечивает применимость модели точечного теплового источника в этом промежутке между анодом и катодом.

После завершения процесса переноса материала анода на катод в плазменном канале и остывания перенесенного объема, наступает пауза  $\delta$  между двумя последовательными электроискровыми разрядами. В течение этого периода происходит коллапс плазменного канала и пузыря с паром, что приводит к взрыву в диэлектрике перегретого, расплавленного металла на поверхности обоих электродов. Часть переносимого материала испаряется и мелкими каплями расплескивается в воздух, а другая затвердевает в полости, образовавшейся на поверхности катода. Эти полости “заглаживаются” в процессе механических с ультразвуковой частотой биений подвижного электрода (анода) по поверхности катода, что приводит к формированию сверхгладких, наноструктурированных приповерхностных областей [3].

Известно [4, 5], что образование и прирост толщины покрытия при электроискровом легировании обусловлены эрозией легирующего электрода. При этом определяющими параметрами эрозионного процесса являются прежде всего длительность обработки  $t$  и длительность паузы между последовательными искровыми разрядами  $\delta$ , определяющих объем переносимого материала. Поэтому для определения скорости эрозионного переноса материала анода на катод были выбраны указанные временные характеристики, а решение задачи оптимизации параметров эрозионного процесса базируется на следующих физических законах:

- 1) на основе модели теплопроводности от точечного источника при искровом разряде рассчитан объем эродировавшего материала анода;
- 2) на основе модели теплопроводности от мгновенного сферического источника тепла рассчитано время остывания расплавленной капли материала эродировавшего анода в результате искрового разряда;
- 3) на основе экспериментальных данных по зависимости потери массы анода от времени проведения процесса ЭИЛ решена оптимизационная задача расчета минимальной длительности паузы между двумя последовательными искровыми разрядами при прохождении стадий интегрального метода ЭИЛ с УЗВ;
- 4) с использованием оптимизационной методологии оценено влияние вольт-амперных характеристик установки «Элитрон», а также времени процесса УЗВ на скорость эрозии анода в процессе искрового разряда.

Скорость эрозии электрода обусловлена объемом проэродировавшего материала анода в единицу суммарной длительности импульса и паузы между двумя последовательными разрядами.

Для разработки модели эрозии электрода при ЭИЛ сделаны следующие допущения:

- 1) только один искровой разряд приходится на каждый импульс напряжения, и радиус плазмы в процессе разряда остается достаточно малым (менее 5 мкм), что позволяет использовать модель точечного теплового источника;

2) эффективные (средние) физические свойства материалов электродов применимы ко всему диапазону температур (от твердого состояния до жидкого в расплавленном состоянии);

3) при расчете полного объема эрозии и длительности импульса не учитывается наличие начальной полости, обусловленной асимптотическим температурным профилем в анодно-катодной зоне;

4) постоянная доля  $F_c$  мощности от полной, выделяемой при электрическом разряде, теряется на аноде независимо от величины тока и длительности импульса.  $F_c$  может изменяться при использовании электродов иного химического состава.

Последующие рассуждения и расчеты будут применяться к интегральному методу ЭИЛ с УЗВ, в процессе которого применяется серийное электроискровое оборудование типа «Элитрон», и дополнительного ультразвукового воздействия, осуществляемого с помощью серийных установок УИЛ-2. При этом принимается, что анодно-катодное взаимодействие, т.е. контакт легирующего электрода (анода) и обрабатываемого объекта (катода) может быть представлено как работа матрицы и пуансона в пресс-форме. Продолжительность ультразвукового воздействия с частотой  $f = 20 - 40$  кГц не превышает 25–50 мкс. При указанных длительностях импульса скорость эрозии достаточно мала, что обусловлено длительным временем остывания и затвердевания материала на катоде. При интегральной ЭИЛ с УЗВ обработке электрод (анод) не обязательно должен физически контактировать с обрабатываемой поверхностью катода, т.е. в принципе, анод не может оказывать силовое воздействие на поверхность катода (за исключением воздействия, обусловленного давлением плазмы).

Уравнение теплопроводности без источников, описывающее процесс электрического разряда, имеет в цилиндрической системе координат следующий вид [5]:

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

где  $\alpha = \frac{k_T}{\rho C_p}$  – коэффициент термодиффузии.

где  $k_T$  – теплопроводность материала анода,  $\rho$  – его плотность и  $C_p$  – его теплоемкость при постоянном давлении.

Начальные условия для решения уравнения (1) можно представить в следующем виде:

$$t = 0, \quad \forall r, \quad T = T_0 \quad (2)$$

а граничные условия:

$$-k_T \frac{\partial T}{\partial r} = q_0, \quad \text{для } r = 0, \quad (3)$$

$$-k_T \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \text{для } r = 0, \quad (4)$$

$$\text{и } T = T_0 \text{ при } t > 0 \text{ и } r = \infty, \quad (4)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды,  $q_0$  – мощность тепловыделения.

Результирующее распределение температуры с учетом граничных и начальных условий:

$$T = T_0 + \left( \frac{F_c UI}{2\pi k_T r} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{r}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad (5)$$

Если обозначить радиус расплавленной зоны как  $R$ , когда  $T=T_m$ , то выражение (5) примет вид:

$$T(R) = T_m = T_0 + \left( \frac{F_c UI}{2\pi k_T R} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{R}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad (6)$$

где  $T_m$  – температура плавления материала анода;  $t$  – время процесса эрозии.

Соотношение (6) позволяет выразить зависимость радиуса капли расплавленного в процессе электроискрового разряда материала анода  $R(t)$  от длительности электроискрового разряда  $t$ .

Предположим, что начальная температура капли размером  $0 \leq r \leq R$  составляет 10000 К, и на ее поверхности происходит конвективный теплообмен с окружающей средой, имеющей температуру  $T_0$ . Для определения момента времени, начиная с которого в центре капли будет иметь место регулярный режим, т.е. в ней установится температура  $T_0$ , используем уравнение распространения тепла в сферических координатах [5, 6]:

$$\partial_t T(t, r) - a^2 \left( \partial_{r,r} T(t, r) + \frac{2}{r} \partial_r T(t, r) \right), \quad (7)$$

если отсутствуют внешние источники тепла.

Параметр  $\alpha = k_T / \rho C_P$  в (7), как и в уравнении (1) – коэффициент термодиффузии.

Теплообмен на границе капли описывается уравнением Ньютона:

$$\partial_r T(t, R) = \frac{h}{k_T} (u_1 - T(t, R)), \quad (8)$$

где  $h$  – коэффициент теплообмена анода.

Уравнения (7) и (8) совместно с начальным условием  $T(0, r) = u_0 = 10000$  смешанная задача. Радиус капли  $R$  определяется путем минимизации целевой функции по фактическим данным.

Смешанная задача решается методом разделения переменных [3, 4] и ее решение имеет вид:

$$T(r, t) = T_0 + 2(u_1 - u_0) h R^2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\sqrt{\xi_n^2 + (hR - 1)^2}}{\xi_n (\xi_n^2 + h^2 R^2 - hR)} \exp \left( -\frac{a^2 \xi_n^2 t}{R^2} \right) \frac{\sin \left( \frac{\xi_n r}{R} \right)}{r} \quad (9)$$

где  $\xi_n$  – положительные корни трансцендентного уравнения:

$$\operatorname{tg}(\mu) = -\frac{\mu}{Rh-1}, \tag{10}$$

Проанализируем влияние величины коэффициента теплообмена на результат решения уравнения (8).

На рисунке. 2 приведены зависимости, являющиеся решением трансцендентного уравнения (9) при  $h=0.1$ . Ординаты точек пересечения кривых являются корнями уравнения (9).

Анализ результатов численного решения трансцендентного уравнения (9) показал слабую зависимость корней этого уравнения от величины параметра  $h$ : так, увеличение значения этого параметра на 4 порядка от  $10^{-1}$  до  $10^3$  привело к значениям его первых двух положительных корней соответственно от (4.49341, 7.72525) до (4.49544, 7.72643). Заметное изменение корней этого уравнения происходит только при значении  $h=10^6$ : (2.80883, 5.67371).

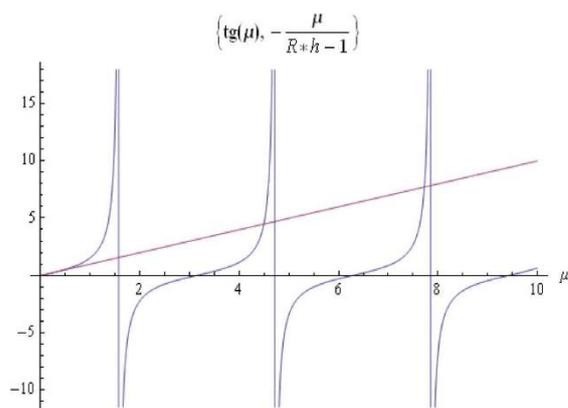


Рисунок 2. Решение трансцендентного уравнения (9) при значении параметра  $h=0.1$

Решение уравнения (9) при  $h=10^6$  иллюстрируется рисунке 3.

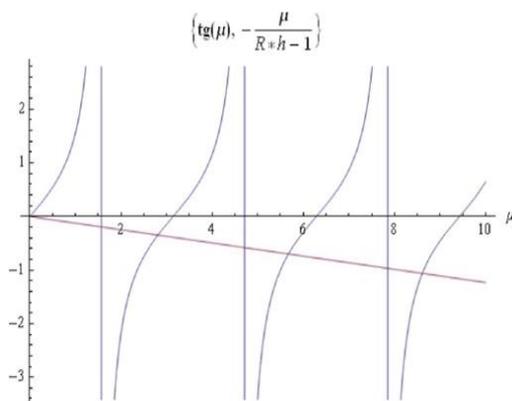


Рисунок 3. Решение трансцендентного уравнения (9) при значении параметра  $h=10^6$

Зависимость температуры в центре капли от времени выражается следующим образом:

$$T(0,t) = u_1 + 2(u_1 - u_0)hR \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\sqrt{\xi_n^2 + (hR-1)^2}}{(\xi_n^2 + h^2R^2 - hR)} \text{Exp}\left(-\frac{a^2 \xi_n^2 t}{R^2}\right) \quad (10)$$

Если  $hR < 1$  (что соответствует случаю  $h < 6.14662 \times 10^6$ ), то при всех значениях времени  $t$ , удовлетворяющих неравенству:

$$t \geq t_* \stackrel{def}{=} -\frac{R^2}{a^2(\xi_1^2 - \xi_2^2)} \ln\left(\frac{\xi_2^2 + h^2R^2 - hR}{\xi_1^2 + h^2R^2 - hR} \sqrt{\frac{\xi_1^2 + (hR-1)^2}{\xi_2^2 + (hR-1)^2}}\right) \quad (12)$$

в центре капли заведомо будет иметь место регулярный режим.

В таблице 1 приведены значения длительности остывания капли  $t$ , вычисленные из выражения (11), в зависимости от величины константы  $h$ .

Таблица 1. Длительность остывания капли  $t$ , вычисленные из выражения (12), в зависимости от значения константы  $h$ .

$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-3}$	1	$1 \cdot 10^{-1}$
$3.109158 \cdot 10^{-8}$	$9.093769 \cdot 10^{-8}$	$9.098667 \cdot 10^{-8}$	$9.098671 \cdot 10^{-8}$

### 3. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили заключить и реализовать следующее:

1) Одной из основ моделирования изучаемых процессов является их термомеханодинамика, обобщаемая критериальными или линеаризованными уравнениями.

Для решения указанных задач разработано несколько физико-математических моделей:

- физико-математическая модель расчета объема материала анода, эродированного в одном искровом разряде в процессе ЭИЛ, на основе модели теплопроводности от точечного источника (что справедливо для искрового разряда);

- физико-математическая модель расчета времени остывания капли расплавленного материала анода, эродированного в результате искрового разряда, с использованием модели теплопроводности от мгновенного сферического источника тепла.

- решена задача оптимизации параметров и режимов ЭИЛ с применением модели малых колебаний системы, в основе которой лежит предположение, что в зависимости от очередности воздействия, характера и мощности затраченной механической энергии при ЭИЛ катода интегрально меняется его исходная структура. В терминологии теории малых колебаний систем с конечным числом степеней свободы совокупность таких состояний можно интерпретировать в форме коэффициентов влияния в дифференциальном уравнении, описывающем свободные колебания механических систем.

2) С помощью оптимизационной методологии оценено влияние вольт–амперных характеристик установок «Элитрон» и «УИЛ», а также времени процесса легирования на скорость эрозии анода в процессе искрового разряда.

– посредством анализа численного решения задач теплопроводности с мощным точечным тепловым источником тепловыделения и остывания без источников, показано, что время остывания капли эродированного анода заметно меньше других временных параметров, характеризующих процесс легирования.

– проведены сравнительные оценки временных параметров – длительностей электроискрового разряда и паузы между двумя последовательными разрядами.

– определен период ультразвуковых вибраций анода с целью оптимизации совместного воздействия электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием.

– анализ результатов решения уравнения теплопроводности, описывающего процесс остывания капли расплавленного в результате электроискрового разряда материала анода, показал:

– входящие в уравнение теплопроводности корни  $\xi$  трансцендентного выражения слабо зависят от материального параметра – коэффициента теплообмена  $h$  между каплей эродирующего материала и средой;

– время остывания капли  $t$  материала анода, осевшей на поверхность катода, чрезвычайно мало и составляет десятые доли микросекунды, что на порядки величин меньше других временных параметров, характеризующих процесс УЗВ: период между двумя последовательными электроискровыми разрядами (~50 мкс), длительность электроискрового разряда (~100 мкс), период продольных биений анода, колеблющегося с ультразвуковой частотой (25–50 мкс), что следует учитывать при выработке рекомендаций для выбора технологических параметров проведения процесса УЗВ.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Чигринова, Н. М. Инновации в электроискровых технологиях: теория и практика. / Н. М. Чигринова // Монография. - Мн.: изд-во «Бестпринт». – 2019. – 267 с.

2. Лазаренко, Н. И. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Н. И. Лазаренко, Б. Р. Лазаренко // Электронная обработка материалов. – 1977. – № 3. – С. 12–16.

3. Верхотуров, А. Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании / А. Д. Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.

4. Сафронов, И. И. Электроэрозионные процессы на электродах и микроструктурно-фазовый состав легированного слоя / И. И. Сафронов [и др.]. – Кишинев, 1999. – 591 с.

5. A. Yahya and C. D. Manning Modelling, simulation and controller design for Electro Discharge Machine System // Electronic Systems and Control Division Research, 2003, P.21-23.

6. Revaz, B. Local temperature response to pulsed discharges in electronic discharge machining (EDM) environment / B. Revaz [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2005. – Vol. 33, Issue 3. – P. 1066–1071.

Поступила в редколлегию 13.02.2024 г.