

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЖЕНЕРИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МИКРОПЛАЗМОИСКРОВЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ С ПЕРЕМЕННОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

*ОХП «Институт сварки и защитных покрытий» ГНУ «Институт порошковой металлургии», ул. Платонова, 12Б, г. Минск, 220005, Республика Беларусь, [chigrinova@wpc-i.anitex.by](mailto:chigrinova@wpc-i.anitex.by)*

### **Введение**

Недостатки микроплазмоискровых технологий, к которым относится и известный метод электроискрового легирования (ЭИЛ (в работе – микроплазмоискровое легирование – МПИЛ)), связанные со стохастическим характером микроразрядов, определяющим неравновесный массоперенос и неравнотолщинность формируемых покрытий и упрочненных зон, малая производительность, недостаточная толщина и низкое качество упрочненных зон и покрытий (большие пористость и шероховатость, высокие напряжения, нерегулярная микроструктура) – все это определяет необходимость их модернизации. При разработке научных и технологических основ создания новых версий указанных процессов, позволяющих за фиксированный промежуток времени получать более толстые и качественные упрочненные зоны и покрытия при сниженных энергозатратах, определяющим являлась оптимизация технологических режимов упрочнения и модификации, а также структурного состояния упрочняемого материала.

Одним из способов такой оптимизации может быть усиление энергомеханического воздействия на материал за счет дополнительной ультразвуковой обработки. При этом система анод – катод взаимодействует под влиянием высокоамплитудных физических полей, имеющих более мощную суммарную (плазменную и механическую) энергию, обуславливая улучшенное качество поверхности.

В работе осуществлено моделирование процесса микроплазмоискрового легирования с учетом основополагающих физических законов и предлагаемого приема – ультразвуковой модификации поверхности (УЗМ).

Концепция энергетической интенсификации микроплазмоискровой обработки в газовой среде для получения упрочненной поверхности увеличенной толщины с регулярной микроструктурой и сниженным уровнем внутренних остаточных напряжений базируется на комбинировании энергии плазмы и низкочастотного механического удара с энергетическим импульсом, возникающим при дополнительном воздействии высокочастотного удара по модифицируемой поверхности в результате применения ультразвука.

Данный выбор связан с известными особенностями действия ультразвука на вещество. Ультразвуковая модификация, основной макромеханизм которой – наклеп, объясняется на микроуровне эволюцией дислокационно-зеренной системы [1]. Дислокации, образующиеся в процессе пластического течения, при своем движении тормозятся и скапливаются на границах структурных элементов (зерен). Увеличение их плотности означает уменьшение междислокационных расстояний, что приводит к росту сил междислокационного взаимодействия. При определенной критической плотности в таком дислокационном ансамбле возникает "сильное" взаимодействие, приводящее к коллективным эффектам. При этом скопления дислокаций на границах зерен являются зоной переходного поверхностного слоя, в которой возникают сжимающие напряжения кристаллической решетки и сопротивление на начальных этапах пластическому течению (состояние наклепа материала по достижении критической плотности дислокаций) [2]. Снижение прочности, как правило, наблюдается только при жестких напряженных состояниях решетки, в них преобладают растягивающие напряжения.

Другое (на микроуровне) объяснение модификации поверхности ультразвуком основано на механизме нанокристаллизации. С учетом экспериментального подтверждения уникальных свойств нанокристаллических материалов естественно осуществлять модификацию поверхности посредством ее наноструктурирования. Очевидно, что принудительная поверхностная нанокристаллизация

легче и экономней, чем объемная. Концепция поверхностной нанокристаллизации материалов впервые была предложена в 1988 году в работах [3–9]. Один из способов ее реализации состоит в измельчении зеренной структуры посредством пластической деформации или в поверхностном механическом истирании с целью синтеза наноструктурированного поверхностного слоя в объеме металлических материалов. Таким способом можно получить наноструктурированные слои толщиной до 50 мкм. Экспериментальные исследования показали более высокую эффективность этого способа наноструктурирования по сравнению с классическими вариантами пластической деформации, например с помощью обычного бойка [8, 9]. Именно контактное (с ультразвуковой частотой) воздействие с небольшой силой, имеющее место в процессе ультразвуковой модификации (УЗМ) поверхности покрытия, сформированного в результате МПИЛ, приводит к созданию наноструктурированных слоев, обладающих уникальными механическими свойствами.

### **Теоретический анализ**

При создании физико-математических моделей, описывающих кинетику энерго- и массопереноса при микроплазменном легировании, теоретически изучаются варианты, при которых УЗМ применяется на разных стадиях получения требуемой поверхности: для первичной обработки металлической основы с ее последующим легированием и ультразвуковым модифицированием (УЗМ+МПИЛ+УЗМ) и для модифицирования уже упрочненной поверхности или созданного покрытия (МПИЛ+УЗМ).

Последующие рассуждения и расчеты будут применяться к процессу, осуществляемому на установках типа «Элитрон», характерной особенностью которых является то, что взаимодействие анода и катода может быть представлено как работа матрицы и пуансона в пресс-форме. В этой установке катодом обычно служит обрабатываемая деталь, а анод выполняет роль инструмента, с помощью которого реализуются необходимая форма и состояние обрабатываемой поверхности. Биение анода о поверхность катода в процессе ультразвуковой модификации уже созданного покрытия происходит с ультразвуковой частотой  $f = 20\text{--}40$  кГц (что соответствует периоду  $T = 25\text{--}50$  мкс) ультразвукового воздействия. При таких длительностях импульса скорость эрозии относительно мала, что обусловлено длительным временем остывания и затвердевания материала на катоде. При совместной МПИЛ с УЗМ обработке электрод (анод) не обязательно должен физически контактировать с обрабатываемой поверхностью катода, то есть в принципе анод не обязательно должен оказывать силовое воздействие на поверхность катода (за исключением воздействия, обусловленного давлением электроразрядной плазмы). После завершения процесса формирования и остывания плазмы начинается период паузы  $\delta$  между двумя последовательными электроискровыми разрядами. В течение указанного периода происходит коллапс плазменного канала и пузыря с паром, что приводит к взрыву в диэлектрике перегретого, расплавленного металла на поверхности обоих электродов. Часть этого материала «размывается» диэлектриком, а другая затвердевает в полости, образовавшейся на поверхности катода. Такие полости «заглаживаются» в процессе механических (с ультразвуковой частотой) биений подвижного электрода (анода) по поверхности катода, что приводит к формированию гладких, наноструктурированных приповерхностных областей. Скорость эрозии электрода определяется как отношение объема эродированного материала анода к сумме длительности импульса и паузы между двумя последовательными импульсами. Поскольку рост покрытия при микроплазменном легировании связан с эрозией легирующего электрода, то с целью оптимизации процесса эрозии материала анода, где в качестве входных параметров выбраны указанные временные характеристики (длительность обработки  $t$  и длительность паузы между последовательными искровыми разрядами  $\delta$ ), были решены следующие задачи:

- 1) на основе модели теплопроводности от точечного источника (что происходит при искровом разряде) рассчитан объем материала анода, эродирующего в одном разряде;
- 2) на основе модели теплопроводности от мгновенного сферического источника тепла рассчитано время остывания капли, представляющей собой расплавленный объем эродированного в результате искрового разряда материала анода.

Для решения указанных задач рассмотрено несколько физико-математических моделей разрабатываемого процесса МПИЛ с УЗМ.

#### **1. Физико-математическая модель эрозии электрода при МПИЛ**

Для разработки данной модели сделаны следующие предположения:

- 1) лишь один искровой разряд приходится на каждый импульс напряжения, и при этом 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) не учитывается наличие начальной полости, обусловленной асимптотическим температурным профилем (в нулевой момент времени с размерами  $r_c$  и  $z_c$ ) при расчете вкладов в полный объем эрозии и в полную длительность импульса;

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

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

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

где  $\alpha = \frac{k_T}{\rho C_p}$  – коэффициент термодиффузии;  $k_T$  – теплопроводность материала анода,  $\rho$  – его плотность,  $C_p$  – его теплоемкость при постоянном давлении и  $T$  – температура.

Здесь операторы  $\partial_t$  и  $\partial_r$  означают производные первого порядка по температуре и по радиусу соответственно.

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

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

граничные условия:

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

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

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

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

Результирующее распределение температуры в материале анода с учетом граничных и начальных условий

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

При значении радиуса расплавленной зоны  $R$ , когда  $T=T_m$ , выражение (5) имеет 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 моделируемого процесса эрозии;  $F_c$  – постоянная доля от полной, выделяемой при электрическом разряде мощности;  $U$  – напряжение;  $I$  – ток;  $\alpha$  – коэффициент термодиффузии. Значение остальных постоянных определено выше.

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

## 2. Физико-математическая модель расчета времени остывания капли расплавленного материала анода

Предположим, что начальная температура капли размером  $0 \leq r \leq R$  составляет в среднем 10 000 К (вследствие фокусирования энергии, выражаемой как  $UIt$ , в очень малом объеме, так что локальные плазменные температуры в этом случае достигают величины  $\sim 40$  000 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 регулярный режим, то есть в ней установится температура  $T_0$ , используем уравнение распространения тепла в сферических координатах [10]:

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

при отсутствии внешних источников тепла.

Теплообмен на границе капли описывается уравнением Ньютона [11]:

$$\partial_r T(t, R) = h(T_0 - T(t, R)) \quad (8)$$

где  $h$  – коэффициент теплообмена материала анода,  $\partial_t$  и  $\partial_r$  – производные первого порядка по температуре и по радиусу соответственно.

Уравнения (7) и краевое условие (8) совместно с начальным условием  $T(0, r) = u_0 = 10000$  К являются смешанной задачей. Радиус капли  $R$  определяется путем максимизации целевой функции [11].

Рассмотрим задачу определения зависимости времени остывания капли от ее размеров.

Смешанная задача (7)–(8) решается методом разделения переменных [12] и ее решение имеет вид

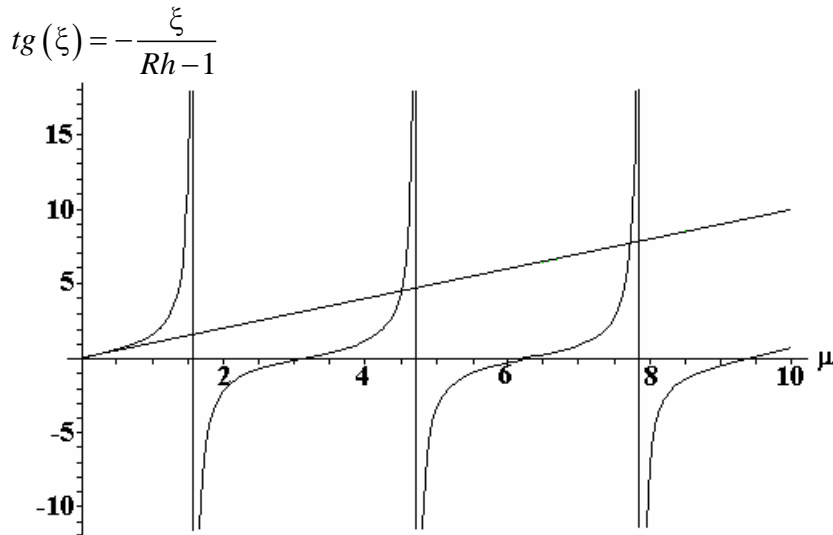
$$T(r, t) = T_0 + 2(u_1 - u_0)hR^2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\sqrt{\xi_n^2 + (hR - 1)^2}}{\xi_n (\xi_n^2 + h^2 R^2 - hR)} \exp\left(-\frac{a^2 \xi_n^2 t}{R^2}\right) \frac{\sin\left(\frac{\xi_n r}{R}\right)}{r}, \quad (9)$$

где  $\xi_n$  – положительные корни трансцендентного уравнения,

$$\operatorname{tg}(\xi) = -\frac{\xi}{Rh - 1}, \quad (10)$$

$u_0$  – начальная температура остывания,  $u_1$  – температура окружающей среды.

На рисунке приведены зависимости, являющиеся решением трансцендентного уравнения (9) при  $h = 1,9 \cdot 10^3$ . Ординаты точек пересечения кривых являются корнями уравнения (9).



Семейство решений уравнения (9) при  $h = 1,9 \cdot 10^3$

Как следует из условия (8), время остывания капли зависит от коэффициента теплообмена  $h$  между материалом анода и окружающей средой (воздухом). При оценке значения  $h$  для значений радиуса капли  $R$  от 10 до 80 мкм (типичные величины для рассматриваемых условий расплавления материала в процессе микроплазменного легирования) с шагом 10 мкм максимизируется целевая функция

$$f = -\frac{R^2}{a^2 (\xi_1^2 - \xi_2^2)} \ln \left( \frac{\xi_2^2 + h^2 R^2 - hR}{\xi_1^2 + h^2 R^2 - hR} \sqrt{\frac{\xi_1^2 + (hR - 1)^2}{\xi_2^2 + (hR - 1)^2}} \right),$$

зависящая от коэффициента теплообмена  $h$  материала анода и имеющая своими значениями время остывания капли. Исследована зависимость времени остывания капли от ее радиуса в выбранном диапазоне от 10 до 80 мкм с шагом 10 мкм, определены значения коэффициента теплообмена  $h$ , при котором достигается максимальное время ее остывания. Среднее значение  $h = 1,9 \cdot 10^3$ , при котором получены результаты, представленные на рисунке.

Анализ результатов численного решения трансцендентного уравнения (10) показал слабую зависимость корней этого уравнения от величины параметра  $h$  (таблица 1).

Как видно из табл. 2, максимальное время остывания капли радиусом  $R=80$  мкм составляет  $6,9 \cdot 10^{-6}$  с при значении коэффициента теплообмена  $h=1,9 \cdot 10^3$ .

Таблица 1. Длительности остывания капли  $t$ , вычисленные из выражения (11), в зависимости от значения константы  $h$

$h$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-3}$	1	$1 \cdot 10^1$
$t, c$	$3,1 \cdot 10^{-8}$	$9,0 \cdot 10^{-8}$	$9,1 \cdot 10^{-8}$	$9,2 \cdot 10^{-8}$

Таблица 2. Длительности остывания капли  $t$ , вычисленные из выражения (11), в зависимости от радиуса капли при  $h=1,9 \cdot 10^3$

$R, \text{мкм}$	10	20	30	40	50	60	70	80
$t, c$	$0,1 \cdot 10^{-6}$	$0,4 \cdot 10^{-6}$	$0,9 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-6}$	$6,9 \cdot 10^{-6}$

Зависимость температуры в центре капли от времени выражается уравнением

$$T(0, t) = u_1 + 2(u_1 - u_0)hR \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\sqrt{\xi_n^2 + (hR - 1)^2}}{(\xi_n^2 + h^2 R^2 - hR)} \text{Exp}\left(-\frac{a^2 \xi_n^2 t}{R^2}\right). \quad (11)$$

Если  $hR < 1$ , то при всех значениях времени  $t$ , удовлетворяющих неравенству

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

в центре капли заведомо будет иметь место стационарный режим.

### Заключение

Таким образом, анализ результатов решения уравнения теплопроводности, описывающего процесс остывания капли расплавленного в результате электроискрового разряда материала анода, показывает:

- первые два корня  $\xi_1, \xi_2$  трансцендентного уравнения (10), входящие в правую часть выражения (12), слабо зависят от материального параметра – коэффициента теплообмена  $h$  между каплей и средой. Их малая вариабельность означает, что коэффициент теплообмена  $h$  может изменяться в широких пределах, то есть предложенная модель остывания капли является достаточно общей и ее можно применять для анодов из разных материалов;

- время остывания капли  $t$  составляет десятые доли микросекунды, что на порядки величин меньше других временных параметров, характеризующих процесс МПИЛ: периода между двумя последовательными электроискровыми разрядами (~50 мкс), длительности электроискрового разряда (~100 мкс), периода продольных с ультразвуковой частотой (25–50 мкс) биений анода, что следует учитывать при выборе технологических параметров процесса МПИЛ. Кроме того, при столь малых размерах капли эродирующего анода (ее радиус составляет менее 100 мкм) время ее остывания, как показали модельные расчеты, слабо зависит от свойств эродирующего материала и окружающей среды.

На основе экспериментальных данных по зависимости потери массы анода от времени проведения процесса легирования решена задача оптимизации параметров и режимов МПИЛ с применением модели малых колебаний системы, в основе которой лежит предположение о том, что в зависимости от очередности воздействия и интенсивности механической энергии в процессе легирования катода интегрально меняется состояние его исходной структуры. С помощью оптимизационной методологии оценено влияние вольт–амперных характеристик установок «Элитрон» и «УИЛ», а также времени процесса легирования на скорость эрозии анода в процессе микроплазменного разряда.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ультразвук / Энциклопедия под ред. И.П. Голяминой, М. 1979.
2. *Абрамов В.О., Абрамов О.В., Зоммер Ф., Градов О.М., Смирнова О.М.* Теоретический анализ ультразвукового поверхностного упрочнения // *Материаловедение*. 1997. № 7. С. 7–14.
3. *DiBitonto D., Eubank P. T., Patel M. R. and Barrufet M. A.* Theoretical Models of the Electrical Discharge Machining Process. I. A Simple Cathode Erosion Model // *J. Appl. Phys.* Vol. 66. 1989. P. 4095–4103.
4. *DiBitonto D., Eubank P. T., Patel M. R. and Barrufet M. A.* Theoretical Models of the Electrical Discharge Machining Process. II. The Anode Erosion Model. // *J. Appl. Phys.* Vol. 66. 1989. P. 4104–4111.
5. *Eubank P. T., Patel M. R. and Barrufet M. A.* Theoretical Models of the Electrical Discharge Machining Process. III. The Variable Mass, Cylindrical Plasma Models // *J. Appl. Phys.* Vol. 73. 1993. P. 7900–7905.
6. *Маротта А., Шараховский Л.И. и Есинчук А.М.* Шаговая модель эрозии электродов. I. Применение к дуговым пятнам на катодах электродуговых нагревателей // *Инженерно-физический журнал*. 2003. Т.76. № 2. С. 116–122.
7. *Шараховский Л.И., Маротта А. и Есинчук А.М.* Шаговая модель эрозии электродов. II. Применение для случая специальных режимов электроэрозионной обработки // *Инженерно-физический журнал*. 2003. Т.76. № 2. С. 123–126.
8. *Шараховский Л.И., Маротта А. и Есинчук А.М.* Шаговая модель эрозии электродов. III. Адаптация к произвольным режимам электроэрозионной обработки // *Инженерно-физический журнал*. 2003. Т.76. № 2. С. 127–133.
9. *Верхотуров А.Д.* Зависимость эрозии анода от состояния упрочняемой поверхности при электроискровом легировании // *Электронная обработка материалов*. 1970. № 6. С. 29–31.
10. *Владимиров В.С.* Уравнения математической физики // *Учебник*. 5-е изд., доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 512 с.
11. *Revaz, B.; Emery, J.; Witz, G.; Flukiger, R.; Perez, R.; Carron, J.; Rappaz, M.* Local temperature response to pulsed discharges in electronic discharge machining (EDM) environment. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2005. Vol. 33, Issue 3. P. 1066–1071.
12. *Будак Б. М., Самарский А. А., Тихонов А. Н.* Сборник задач по математической физике: Учебное пособие. 3-е изд. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1980. 688 стр.

Получена 30.10.09

### Summary

The analysis for physical processes in different combinations of outer impacts on the material in microplasma spark alloying (MPA, MPA+UM, UM+MPA+UM) has been carried out in the current paper. The physical models for microplasma electrode erosion and melted droplet cooling material of anode in the MPA process have been developed. As a result of numeric solution for tasks of heat conduction with powerful dot heat source for heat release and cooling without sources, it has been established that droplet cooling time for eroded anode is markedly less than other time parameters specifying alloying process. The task has been solved as to determination of optimum impulse duration values as well as optimum values of pause between electrospark charges providing maximal anode erosion velocity. Physical and mathematical model in the form of small vibration theory, the corresponding algorithm and software executed in Mathematica package have been developed for the interpretation of experimental data from the positions of physical mechanisms. The possibility for the solution of multifactor (input parameters –voltage and time specifications, output parameters –anode erosion velocity, hardened droplet fraction for eroded anode material) MPA +UM control joint process task for obtaining qualitative strengthened surface has been demonstrated with the optimization methodology use.