

МИКРОПЛАЗМОИСКРОВОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ С УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МОДИФИКАЦИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

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

Введение

При воздействии на материал энергией электроразрядной плазмы в сочетании с механическим ударом различной интенсивности (МПИЛ с УЗМ) происходят: активация обрабатываемой поверхности, увеличение внутренней энергии материала и ускорение процессов взаимодействия в системе анод-катод, формирование при их виброударном контактировании тонкого переходного слоя для последующего диффузионного насыщения, создание и поддержание в контактных зонах необходимого уровня поверхностных и объемных волн, требуемых для релаксации остаточных напряжений [1]. Для установления механизмов и оптимизации режимов комбинированного энергетического воздействия с различной интенсивностью ультразвуковой обработки на основе разработанных физико-математических моделей эрозии электрода в процессе микроплазмоискрового легирования и расчета времени остывания капли расплавленного материала анода [2] решена задача оптимизации параметров МПИЛ и УЗМ с использованием модели малых колебаний системы с ограниченным числом степеней свободы.

Рассматриваются с единых теоретических позиций результаты экспериментов по формированию упрочненных поверхностей, проведенных в трех вариантах микроплазмоискрового легирования [2]:

– вариант 1: микроплазмоискровое легирование (МПИЛ) совместно с низкочастотной (~150 Гц) механической вибрацией анода. В результате создается упрочненная поверхность со стохастическим характером свойств (составом, пористостью, исходным состоянием);

– вариант 2: микроплазмоискровое легирование с последующей ультразвуковой (частота $f > 20$ кГц) модификацией поверхности катода посредством вибрационной обработки анодом (МПИЛ+УЗМ). Прогнозируется формирование поверхности с более однородной микроструктурой, регулируемой пористостью и шероховатостью, пониженным уровнем внутренних напряжений;

– вариант 3: предварительная механическая вибрационная высокочастотная (> 20 кГц) обработка поверхности катода анодом с ее последующим микроплазмоискровым легированием и ультразвуковым модифицированием (УЗМ+МПИЛ+УЗМ). На металлической основе с произвольными структурой и твердостью в исходном состоянии ожидается получение слоев более высокого качества и регулярной структуры со сниженным уровнем внутренних остаточных напряжений.

1. Теоретический анализ

Как следует из анализа разнообразных физических механизмов, вносящих вклад в формирование упрочненной поверхности при различных комбинациях внешних воздействий (МПИЛ, МПИЛ+УЗМ, УЗО+МПИЛ+УЗМ), не представляется возможным построить универсальную теорию, основанную на фундаментальных принципах физики твердого тела, объясняющую и прогнозирующую результаты каждого из рассматриваемых способов обработки поверхности, основой которых является процесс МПИЛ.

В связи с этим предлагается новый интегрированный подход, справедливый как для описания каждого из изучаемых вариантов легирования, так и для сравнительного анализа между ними и, следовательно, пригодный для их параметрической оптимизации [3]. Данный подход основан на физической интерпретации экспериментальных данных по массопереносу в процессе обработки поверхности указанными способами. Неравномерный во времени характер изменения величины $\Delta m/\Delta t$ для каждого из рассматриваемых вариантов легирования свидетельствует об изменении со временем состояния контактирующих поверхностей взаимодействующих электродов, обусловленном различными физическими механизмами и явлениями, включая:

- изменение шероховатостей поверхностей катода и анода, что в соответствии с законом Пашена [1] приводит к изменению со временем условий для наступления электроискрового разряда;
- изменение твердости материалов обоих электродов в приповерхностных областях вследствие явления наклепа;
- изменение микроструктуры приповерхностных областей обоих электродов, объясняющееся явлением наноструктуризации.

Таким образом, в основе предлагаемого подхода для физической интерпретации совокупности экспериментальных данных по массопереносу лежит предположение о том, что при переходе от одного варианта обработки катода к другому, то есть с изменением интенсивности и частоты механического удара, интегрально меняется состояние исходной структуры обрабатываемой поверхности, которое в свою очередь оказывает влияние на последующий ход легирования. 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 [4, 5]. Эта теория оказывается справедливой для оптимизации режимов изучаемых вариантов микроплазменного искрового разряда и для прогнозирования результирующих свойств формируемой поверхности.

Из общего вида временной зависимости потери массы анода, вытекающего из анализа экспериментальных данных, следует, что совокупность этих результатов в общем виде можно представить как решение стохастического дифференциального уравнения второго порядка. Этот выбор объясняется тем, что класс решений дифференциального уравнения первого порядка слишком узок – решение его имеет вид экспоненциально возрастающей или убывающей функции, что не удовлетворяет соображениям общности решаемой задачи. Использование дифференциального уравнения более высокого порядка не оправдывает достижение более точного решения вследствие возникающих при этом вычислительных сложностей. Кроме того, коэффициенты уравнений более высокого порядка не имеют четкого физического содержания.

В основе идеологии описания поведения системы, совершающей малые колебания, лежит предположение о том, что свободные колебания в ней в реальных условиях затухают, поскольку на ее составляющие элементы действуют некоторые силы сопротивления R_i , вызывающие диссипацию общей механической (кинетической и потенциальной) энергии. Для механической системы со стационарными связями, имеющей одну степень свободы, длина пути r , пройденного точкой системы, является функцией обобщенной координаты q этой системы, зависящей от времени t [5]:

$$r = r(q).$$

Следовательно, скорость каждой точки системы

$$v = \frac{\partial r}{\partial q} \dot{q} \left(\stackrel{\text{def}}{=} \frac{dr}{dt} \right).$$

Допустим, что сила сопротивления R , действующая на отдельные i -тые точки системы, пропорциональна скорости:

$$R = -\mu v,$$

где μ_i – соответствующие коэффициенты пропорциональности.

В общем виде обобщенная сила сопротивления определяется по следующей формуле:

$$Q_R \stackrel{\text{def}}{=} R \frac{\partial r}{\partial q}.$$

Поскольку

$$v = \frac{\partial r}{\partial t} = \frac{\partial r}{\partial q} \dot{q},$$

то

$$\frac{\partial v}{\partial \dot{q}} = \frac{\partial r}{\partial q}.$$

Подставляя эти значения в выражение обобщенной силы сопротивления, получаем

$$Q_R = -\mu v \frac{\partial v}{\partial \dot{q}} = -\frac{\partial}{\partial \dot{q}} \left(\frac{\mu v^2}{2} \right).$$

Введем диссипативную функцию (понятие о ней введено Рэлеем в его классическом труде "Теория звука") или функцию рассеивания, которая имеет такую же форму, как и выражение для кинетической энергии:

$$\Phi = \frac{\mu v^2}{2}.$$

Тогда обобщенные силы сопротивления определяются по следующей формуле:

$$Q_R = - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}}.$$

Для записи дифференциального уравнения движения системы с одной степенью свободы можно воспользоваться уравнением Лагранжа [220]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial q} \right) = Q_P + Q_R, \quad (1)$$

где $Q_P = - \frac{\partial U}{\partial q}$ – так называемые “восстанавливающие” силы, стремящиеся привести систему в

состояние равновесия, а T и U – кинетическая и потенциальная энергии системы соответственно.

Для системы с одной степенью свободы в обобщенной системе координат выражения для кинетической T , потенциальной U и диссипативной Φ энергий имеют следующий вид [4, 5]:

$$T = \frac{1}{2} a \dot{q}^2, \quad U = \frac{1}{2} c q^2, \quad \Phi = \frac{1}{2} b \dot{q}^2,$$

а соответствующие обобщенные “восстанавливающие” силы Q_P и силы сопротивления Q_R :

$$Q_P = -c q; \quad Q_R = -b \dot{q}^2.$$

Подставляя эти значения в уравнение Лагранжа (1), получаем

$$a \ddot{q} = -c q - b \dot{q}. \quad (2)$$

Введем обозначения

$$c = k^2 / a; \quad b = 2 n / a.$$

Тогда уравнение (2) примет вид

$$\ddot{q} + \frac{2 n}{a} \dot{q} + \frac{k^2}{a} q = 0. \quad (3)$$

Рассмотрим общий случай движения системы с одной степенью свободы около положения равновесия, когда на точки системы действуют восстанавливающие силы Q_P , стремящиеся вернуть систему в равновесное состояние, силы сопротивления Q_R (противодействующие изменению состояния подложки), а также возмущающие силы Q_F (определяющие внешнее воздействие на систему, то есть электрические параметры, управляющие процессом нанесения покрытий). При $Q_F=0$, то есть при нулевом значении правой части уравнения (3), отсутствуют вынужденные колебания системы – в рассматриваемом МПИЛ процессе это состояние соответствует потере массы анода только в начале обработки.

Таким образом, уравнение Лагранжа для рассматриваемой системы с учетом возмущающих сил имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial q} \right) = Q_P + Q_R + Q_F.$$

Подставив в это уравнение значения всех указанных величин (см. уравнения (1) и (2)), получим

$$\ddot{q} + \frac{2 n}{a} \dot{q} + \frac{k^2}{a} q = \frac{1}{a} Q_F(t). \quad (4)$$

Уравнение (4) является обобщенным дифференциальным уравнением вынужденных колебаний системы с одной степенью свободы.

Рассматривая правую часть уравнения (4) как описывающую процесс с гауссовым распределением с независимыми приращениями, вычислим коэффициенты k , n и a , которыми приводятся в соответствие силы упругости, силы сопротивления и силы инерции системы. Эти коэффициенты вы-

числяются на основании однородного уравнения (3), определяющего свободные колебания механической системы в реальных условиях при наличии сил сопротивления, вызывающих рассеяние механической энергии системы.

2. Методика вычислений

Ниже приводятся результаты вычисления в среде пакета *Mathematica* коэффициентов a, n, k с использованием экспериментальных данных, полученных методом МПИЛ при средних значениях напряжения $U = 96$ В и тока $I = 0,6$ А, а также средних параметрах УЗМ $U_{УЗМ} = 125$ В и $I = 0,8$ А для изучаемых вариантов процесса легирования: МПИЛ, МПИЛ+УЗМ и УЗМ+МПИЛ+УЗМ. Входные параметры записываются в следующем виде:

МПИЛ:

$$\begin{aligned} & \{0,5, 0,0050\}, \{1., 0,0100\}, \{1,5, 0,0115\}, \{2., 0,0045\}, \{2,5, 0,0175\}, \\ & \{3., 0,0180\}, \{3,5, 0,0190\}, \{4., 0,0200\}, \{4,5, 0,00205\}, \{5., 0,0215\}. \end{aligned} \quad (5)$$

МПИЛ+УЗМ:

$$\begin{aligned} & \{0,5, 0,00465\}, \{1., 0,0026\}, \{1,5, 0,00185\}, \{2., 0,00275\}, \{2,5, 0,0027\}, \\ & \{3., 0,00225\}, \{3,5, 0,0021\}, \{4., 0,00205\}, \{4,5, 0,00155\}, \{5., 0,0016\}. \end{aligned} \quad (6)$$

УЗМ+МПИЛ+УЗМ:

$$\begin{aligned} & \{0,5, 0,00022\}, \{1., 0,00012\}, \{1,5, 0,00008\}, \{2., 0,00025\}, \{2,5, 0,00005\}, \\ & \{3., 0,00005\}, \{3,5, 0,00022\}, \{4., 0,00024\}, \{4,5, 0,00012\}, \{5., 0,0002\}. \end{aligned} \quad (7)$$

По узлам интерполяции выражений (5), (6) и (7) строится интерполяционный сплайн $S_3(x)$ третьего порядка, удовлетворяющий условиям:

- 1) на каждом временном отрезке при фиксации массопереноса материала анода $[t_{k-1}, t_k], k = 1, \dots, 10, S_3(x)$ является многочленом 3-й степени;
- 2) во всем изучаемом диапазоне времени легирования – от 0,5 до 5 мин $[0,5, 5]$ $S_3(x)$ – имеют непрерывные производные до 2-го порядка включительно;
- 3) $S_3(t_k) = f(t_k)$ – значения потери массы анода.

На рис. 1 – 2 приведены интерполяционные сплайны для МПИЛ, МПИЛ + УЗМ и УЗМ + МПИЛ + УЗМ процессов соответственно.

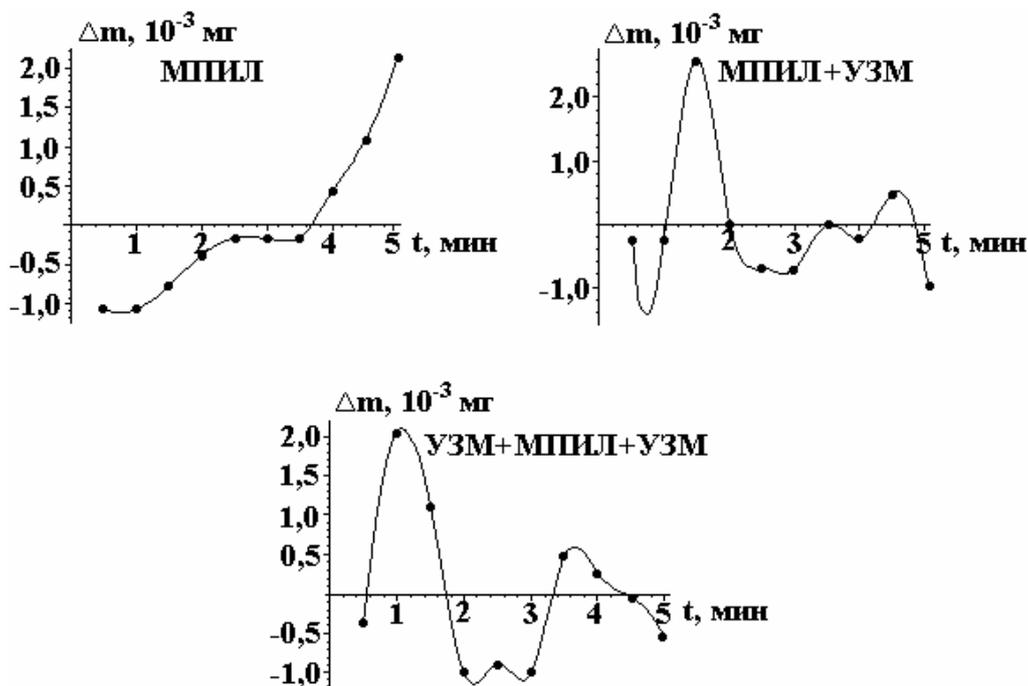


Рис. 1. Интерполяционные сплайны зависимости потери массы анода Δm от времени легирования t

Построенные сплайны используются для перерасчета количества узлов интерполяции (исходные данные по времени приведены с шагом 0,5, а благодаря сплайн-интерполяции появляется возможность рассчитать значения потери массы анода при любом t , поскольку они определены в каждой точке временного отрезка $[0,5, 5,0]$, соответствующего первому моменту времени экспериментального определения потери массы анода (0,5 мин) и последнему (5 мин)). На следующем этапе произво-

дятся вычисление коэффициентов a , n , k , входящих в уравнение (3). С этой целью для каждого из технологических вариантов реализации процесса легирования производится численное интегрирование уравнения (3) с начальными условиями

$$y(0,5) = S_3(0,5), \quad y'(0,5) = S_3'(0,5).$$

Данная операция производится с конкретными значениями коэффициентов a , n , k до тех пор, пока на какой-то группе значений a , n , k , выбираемых по определенному правилу, не будет достигнут наиболее оптимальный результат (с точки зрения удовлетворения уравнению (4)). Указанным образом были рассчитаны коэффициенты a , n и k для МПИЛ (5), МПИЛ+УЗМ (6) и УЗМ+МПИЛ+УЗМ (7) при легировании металлической основы в диапазоне режимов МПИЛ: $I=0,6$ А; $U=96$ В; УЗО: $I=0,5$ А, $U=85$ В и УЗМ: $I=0,8$ А, $U=125$ В.

$$\{k = 8,98433, n = 0,04965, a = 0,454860\}, \quad (8)$$

$$\{k = 0,00044, n = 1,56958, a = 0,673953\}, \quad (9)$$

$$\{k = 3,67472, n = 0, a = 0,841726\}. \quad (10)$$

Следующим этапом описываемого алгоритма является вычисление правой части уравнения (4) в соответствии с методологией вычислений коэффициентов a , n и k однородного уравнения (3). В данном случае вместо a , n , k вычисляются коэффициенты c_k в разложении правой части уравнения

$$\frac{1}{a} Q_F(x) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k J_0\left(\frac{z_k}{10-0,5}(x-0,5)\right), \quad (11)$$

где $J_0(x)$ – функция Бесселя первого рода и нулевого порядка, а z_k – корни этой функции.

Ограничиваясь конечным числом слагаемых в правой части (5), находим коэффициенты c_k . Вычисленные правые части уравнения (11) позволяют решить уравнение (4) и дать прогноз эволюции потери массы анода для будущих значений времени при более длительном легировании.

Проанализируем полученные с использованием описанного алгоритма вычисления коэффициентов a , n и k для различных вариантов микроплазмоискрового легирования (табл. 1).

В табл. 1 приведены значения коэффициентов k , n и a , рассчитанных в рамках предложенного алгоритма численного решения уравнения Лагранжа, описывающего малые колебания системы и интерпретирующего состояния контактирующих поверхностей анода и катода для тех же режимов рассматриваемых комбинированных процессов.

Таблица 1. Экспериментальные данные потери массы анода

Время, мин	Потеря массы электрода Δm , г		
	МПИЛ	МПИЛ+УЗМ	УЗМ+МПИЛ+УЗМ
0,5	0,0050	0,00465	0,00022
1,0	0,0100	0,0026	0,00012
1,5	0,0115	0,00185	0,00008
2,0	0,0045	0,00275	0,00025
2,5	0,0175	0,0027	0,00005
3,0	0,0180	0,00225	0,00005
3,5	0,0190	0,0021	0,00022
4,0	0,0200	0,00205	0,00024
4,5	0,0205	0,00155	0,00012
5,0	0,0215	0,0016	0,0002

Из анализа представленных в табл. 2 данных видно, что при тройной обработке УЗМ+МПИЛ+УЗМ коэффициент k , характеризующий упругость системы, меньше, чем при стандартном легировании МПИЛ. В интенсифицированном методе более низкое значение k объясняется снижением шероховатости поверхности катода после предварительной ультразвуковой обработки, что способствует устранению стохастического характера создаваемых условий для наступления ис-

кровоого разряда. Коэффициент n , определяющий сопротивление системы, при тройном легировании, напротив, выше, что свидетельствует о более быстром затухании колебаний системы. При стандартном МПИЛ это означает более быстрый выход скорости потери массы анода на стационарный режим. Более высокое значение коэффициента a , характеризующего инерционность колебательной системы, при УЗМ+МПИЛ+УЗМ указывает на более плавное замедление стохастического характера искровых разрядов, обусловленное повышением твердости поверхности катода в результате предварительной УЗМ.

Таблица 2. Рассчитанные значения коэффициентов k , n , a и суммарной (кинетической T + потенциальной U) энергии системы ($T+U$)

Коэффициенты	Значения коэффициентов		
	МПИЛ	МПИЛ+УЗМ	УЗМ+МПИЛ+УЗМ
k	8,98433	0,00044	3,67472
n	0,04965	0,56958	0
a	0,45486	0,673953	0,841726
$T+U$	110	9	30

Как следует из выражений (1 – 3), состояние моделируемой системы «анод–катод» характеризуется ее кинетической T и потенциальной U энергиями, а также их суммой ($T+U$). На рис. 2–4 приведены зависимости от времени суммарной энергии исследуемой системы для каждого из сравниваемых вариантов легирования.

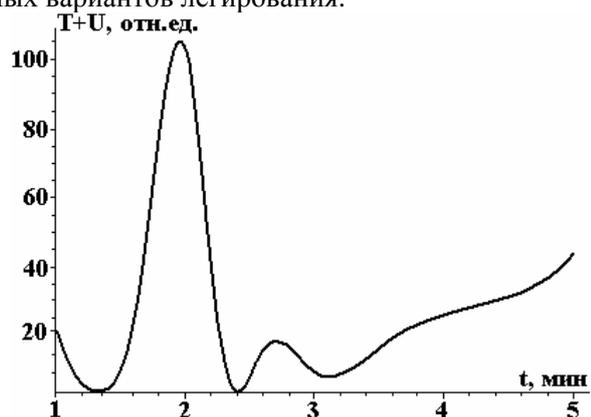


Рис. 2. Зависимость от времени легирования t суммарной энергии системы ($T+U$) при МПИЛ на режиме $I=0,6$ А; $U=96$ В

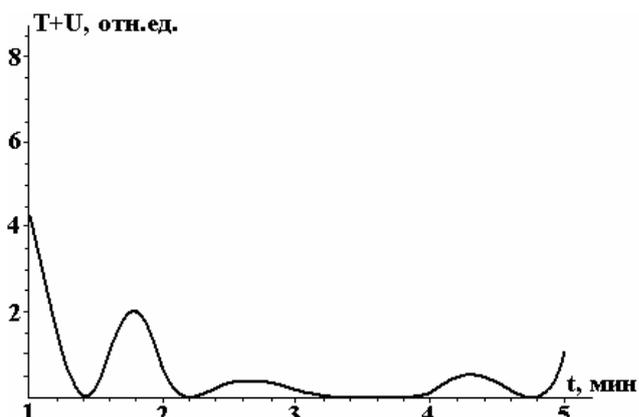


Рис. 3. Зависимость от времени легирования t суммарной энергии системы ($T+U$) при МПИЛ+УЗМ на режимах МПИЛ: $I=0,6$ А; $U=96$ В. УЗМ: $I=0,8$ А; $U=125$ В

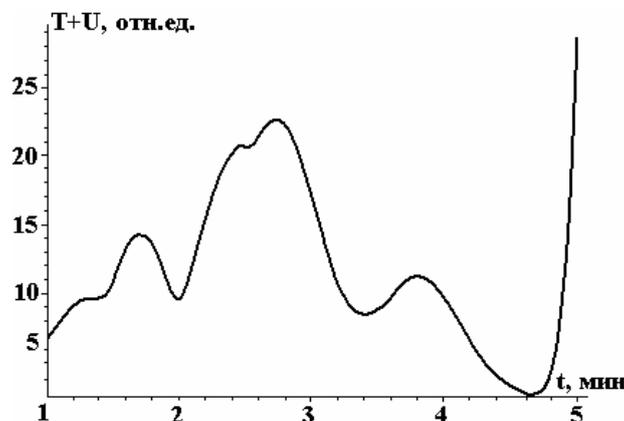


Рис. 4. Зависимость от времени легирования t суммарной энергии системы ($T+U$) при УЗМ+МПИЛ+УЗМ на режимах МПИЛ: $I=0,6$ А; $U=96$ В. УЗМ (до): $I=0,5$ А; $U=85$ В. УЗМ (после): $I=0,8$ А; $U=125$ В

Проверка справедливости выполненных оптимизационных расчетов осуществлялась при проведении экспериментов по фиксации величины деэрозии катода (рис. 5), по состоянию микроструктуры обработанной поверхности (рис. 6) и толщине сформированных покрытий (рис. 7) при обработке поверхности согласно изучаемым вариантам в оптимальном диапазоне электрических режимов МПИЛ и УЗМ.

Из представленных рисунков очевидно преимущество тройной схемы обработки.

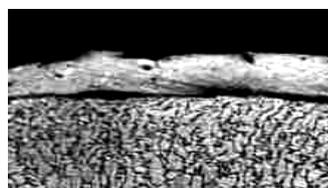
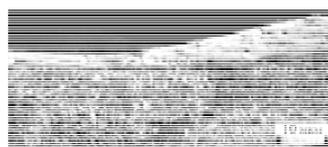
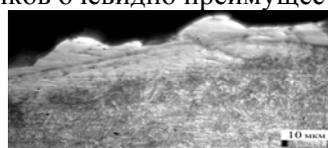
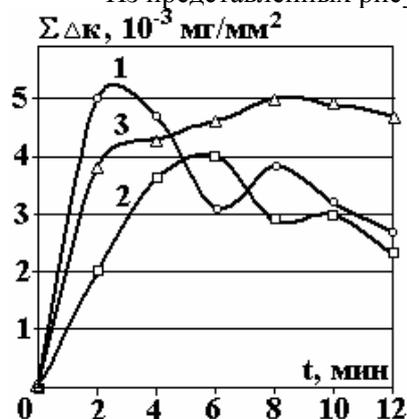


Рис. 5. Влияние интенсивности энергетического воздействия на величину деэрозии катода при легировании стали Р6М5 электродом из ВК на оптимальных режимах комбинированной обработки.

1 – МПИЛ; 2 – МПИЛ+УЗМ; 3 – УЗМ+МПИЛ+УЗМ

Рис. 6. Микроструктура покрытия на стали Р6М5 после ПИЛ(а), МПИЛ+УЗМ(б), УЗМ+МПИЛ+УЗМ(в) в оптимальном диапазоне электрических режимов

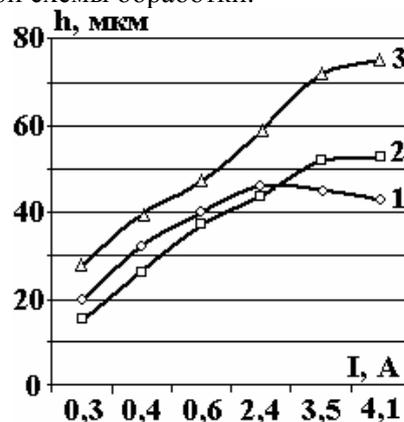


Рис. 7. Влияние способа обработки на толщину формируемого покрытия на поверхности стальной основы из Р6М5 при упрочнении в оптимальном диапазоне электрических режимов. 1 – МПИЛ; 2 – МПИЛ+УЗМ; 3 – УЗМ+МПИЛ+УЗМ

Заключение

На основании проведенного анализа данных отмечается ярко выраженная корреляция между упругими свойствами, силами сопротивления, инерционностью колебательной системы «анод-катод», а также максимальных значений ее механической энергии со свойствами покрытий, формируемых при использовании изучаемых вариантов легирования. Наибольшая упругость системы, определяемая величиной коэффициента k , и минимальное сопротивление энергетическим воздействиям, определяемое величиной коэффициента n , при микроплазмоисковой обработке в сочетании с высокой инерционностью системы «анод-катод» и максимальной суммарной кинетической энергией реализуются при обработке на режимах:

– стандартным методом МПИЛ: $I = 0,3 \text{ А}; U = 45 \text{ В};$

– методом МПИЛ+УЗМ: $I = 0,4 \text{ А}; U = 67 \text{ В. УЗМ: } I = 0,8 \text{ А}, U = 125 \text{ В};$

– методом УЗМ+МПИЛ+УЗМ: $I = 2,4 \text{ А}; U = 67 \text{ В. УЗМ (до): } I = 0,5 \text{ А}, U = 85 \text{ В}; \text{ УЗМ (после): } I = 1,3 \text{ А}, U = 125 \text{ В.}$

Именно для расчетных режимов обработки реализуются оптимальные показатели состояния формируемой поверхности, скорость массопереноса, максимальные толщина и равнотолщинность создаваемых покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чигринова Н.М. Совершенствование качества металлических изделий методом микроплазмоискового легирования с ультразвуковым модифицированием // Труды 12-го Международного симпозиума «Технологии. Оборудование. Качество». 2009. Минск. С. 115–117.
2. Чигринова Н.М. Физическая и математическая модели микроплазмоискового легирования с дискретным ультразвуковым воздействием // Труды Международной научной конференции «Импульсные процессы в механике сплошных сред». 2009. Николаев, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины. С. 114–115.

3. *Чигринова Н.М.* Разработка концепции моделирования энергетической интенсификации микроплазменной обработки в газовой среде // Труды 29-й Международной конференции «Композиционные материалы в промышленности». 2009. Славполик. С. 124–127.
4. *Владимиров В.С.* Уравнения математической физики // Учебник. 5-е изд., доп. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 512 с.
5. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика. М.: Наука, 1988. 208 с.

Поступила 07.12.09

Summary

The analysis for physical processes in microplasma spark material processing, as influenced by electrocharge plasma and mechanical different intensity impact: MPA, MPA+UM, UM+MPA+UM, has been carried out. On the basis of the given analysis, impossibility for universal theory construction, describing the peculiarities for the mentioned processes and being founded on the basic solid body physics principles, has been revealed. The novel integrated approach, which is fair for both: the description for each considered combined processing variant and for comparative analysis between them, has been proposed and, logically, it is appropriate for their parameter optimization. The suggestion about the fact, that during the transition from one way of cathode processing to another (from MPA towards MPA+UM and towards UM+MPA+UM), the integral change for the initial structure of the surface being processed- anode, determining in subsequent alloying structure formation peculiarities, occurs, underlies the basis of approach for physical interpretation for total experimental data. The high correlation between elastic properties, resistance forces, vibration system sluggishness, maximum values for mechanical energy with resultant properties of coatings, formed during alloying with different energy and mechanic impact intensity, has been noted.
