

Ю.И. Мулин, Л.А. Климова, Д.А. Дмитриев, В.Д. Власенко*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАДАННОЙ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ

Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Тихоокеанская, 153, 680042, г. Хабаровск, Россия

**Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск*

ул. Ким-Ю-Чена, 65, 680000, г. Хабаровск, Россия

1. Введение

Одной из актуальных задач машиностроения является получение высококачественных покрытий и поверхностей деталей при их изготовлении. Метод электроискрового легирования (ЭИЛ) является высокоэффективным технологическим процессом для повышения срока службы быстроизнашивающихся деталей машин и режущего инструмента. Отсутствие математической модели процесса ЭИЛ в настоящее время объясняется сложностью происходящих электрофизикохимических явлений при его реализации. Это затрудняет определение соответствующих режимов обработки и используемых электродных материалов, снижает эффективность применения ЭИЛ в производстве и воспроизводимость результатов процесса [1–3]. Для того чтобы параметры технологического процесса ЭИЛ могли быть рассчитаны и реализованы при использовании любой модели установки, в ее паспорте должны быть сведения о величине энергии, выделяющейся в искровом промежутке за один разряд W_u [Дж], частоте следования f_u [Гц] и длительности искрового разряда τ_u [с]. В данной работе описывается методология и примеры использования программы для ПЭВМ IBM PC, разработанные для определения технологических параметров процесса ЭИЛ и образования покрытий заданной толщины по закономерностям, полученным на основе ранее выполненных исследований для различных электродных материалов [4–6].

2. Характеристики зависимостей, используемых для расчета модели

В качестве модели зависимости величины суммарного массопереноса материала с анода на катод ($\sum \Delta^k$) от управляемых параметров ЭИЛ используется функция [6]

$$\sum \Delta^k = A \cdot W_n^{1+b \cdot f_u} \cdot \exp(c \cdot \tau_u \cdot W_n^2), \quad (1)$$

$$W_n = 60 \cdot W_u \cdot t \cdot f_u \cdot \kappa_u, \quad (2)$$

где W_n – выделившаяся энергия (кДж/см²); f_u – частота следования импульсов (Гц); τ_u – длительность следования импульса (с); W_u – энергия единичного импульса (кДж); t – удельное время легирования (мин/см²); κ_u – коэффициент вероятности прохождения искрового разряда ($\kappa_u = 0,7-0,85$).

Графические зависимости суммарного привеса катода ($\sum \Delta^k$) и эффективности массопереноса Y , скорости изменения привеса катода от величины приведенной энергии W_n представлены на рис. 1,а и рис. 1,б.

Параметры этой зависимости A , b , c оцениваются для каждой пары электродов по результатам не менее 3 опытов с помощью метода наименьших квадратов; результаты приведены в таблице, оценка сделана для материалов имеющих применение в производстве. Если $A > 0$, $b > 0$, $c < 0$, то функция (1) обладает следующими свойствами, характерными для реальных процессов легирования:

1. В начальный момент ($W_n = 0$) величина ($\sum \Delta^k$) и скорость ее изменения равны 0;

2. Зависимость (1) имеет максимум при энергии $W_{\text{нк}} = \sqrt{(1+b \cdot f_u)/2 \cdot (-c) \cdot \tau_u}$, соответствующей порогу хрупкого разрушения материала покрытия;

3. График функции (1) имеет точку перегиба при энергии $W_{\text{nv}} = \sqrt{\{2b \cdot f_u + 3 - \sqrt{9 + 8 \cdot b \cdot f_u}\} / 4 \cdot (-c) \cdot \tau_u}$, расположенную ближе к началу процесса ($W_n \approx 1-3$ кДж/см²); эта точка соответствует максимуму скорости $V_{\Sigma \Delta^k}$ изменения массопереноса;

4. При $W_n > W_{\text{нк}}$ и неограниченно возрастающей W_n величина массопереноса $\Sigma \Delta^k \rightarrow 0$.

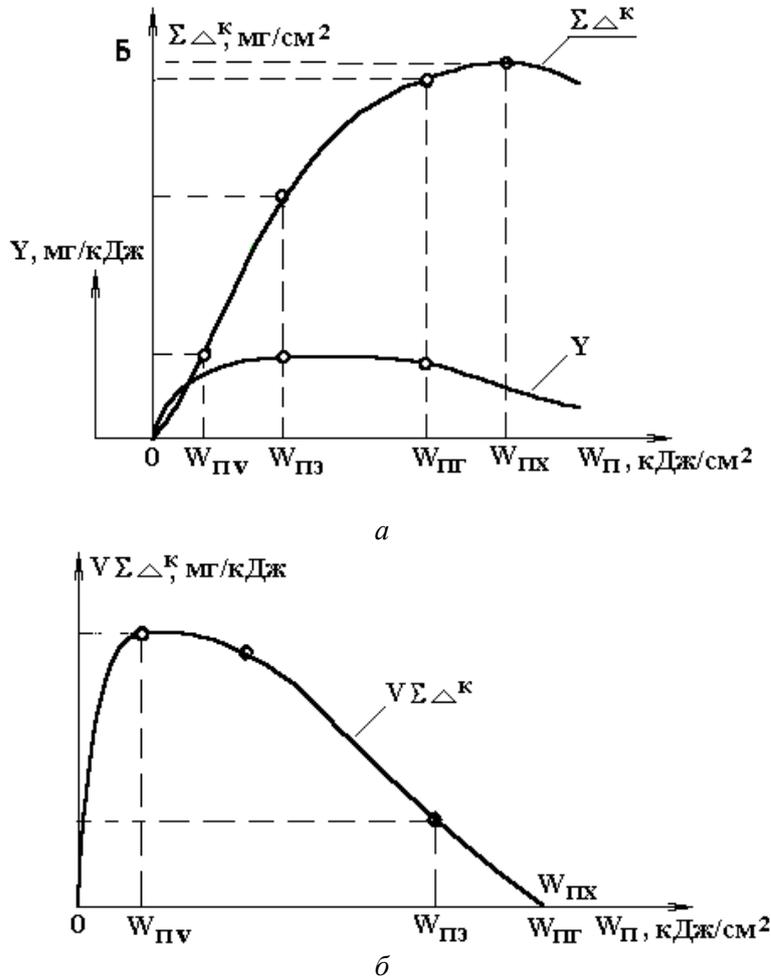


Рис. 1. Зависимости суммарного привеса катода $\Sigma \Delta^k$, эффективности массопереноса Y – (а), скорости изменения привеса катода $V_{\Sigma \Delta^k}$ – (б) от величины приведенной энергии.

При других сочетаниях знаков параметров A , b , c нарушаются все или некоторые перечисленные свойства. Например, при $A > 0$, $b < 0$, $c > 0$ скорость $V_{\Sigma \Delta^k}$ становится неограниченно большой при $W_n = 0$, что мало соответствует представлениям о начале процесса. При этом величина $(\Sigma \Delta^k)$ при $W_n \rightarrow 0$ тоже неограниченно возрастает ($c > 0$).

Толщина покрытия (толщина легированного слоя) h связана с величиной суммарного массопереноса $(\Sigma \Delta^k)$ формулой

$$h = 10 \cdot \kappa_n \cdot \Sigma \Delta^k / \rho_n = 10 \cdot \kappa_n \cdot A \cdot W_n^{1+b \cdot f_u} \exp(c \cdot \tau_u \cdot W_n^2) / \rho_n, \quad (3)$$

где ρ_n – удельная плотность материала покрытия (г/см³); κ_n – коэффициент неравномерного образования толщины покрытия ($1,1 \leq \kappa_n \leq 1,3$).

Расчетное удельное время легирования t_p , необходимое для образования толщины покрытия h при заданных f_u и τ_u и принятом материале электрода, определяется из соотношения

$$t_p = 2 W_n / (60 \cdot C \cdot U^2 \cdot \kappa_s \cdot f_u \cdot \kappa_u), \quad (4)$$

где W_n – величина приведенной энергии, соответствующая заданной толщине покрытия h , которая определяется предварительно любым численным методом из формулы (3); C – емкость конденсаторов установки; U – напряжение; κ_s – коэффициент эффективности использования энергии ($\kappa_s = 0,5-0,6$).

Параметры уравнений регрессии (1) и их статистические показатели при обработке методом ЭИЛ поверхностей деталей из стали 45

Материалы анода на подложке из стали 45	Параметры			Критерий Фишера, F	Коэффициент детерминации, R^2	Критерий Мизеса, $n\omega^2$	Критерий Аббе, q_n
	A , мг/см ²	$b \cdot 10^4$, сек	c , см ⁴ /с·кДж ²				
W	1,19	9,95	-103,5	21,5	0,954	0,10	1,17
Cr	2,91	3,46	-26,9	34	0,971	0,18	1,10
Ni	2,29	5,09	-48,9	165	0,994	0,07	1,12
Ti	1,36	4,38	-39,3	102	0,990	0,16	1,03
Fe	3,24	6,32	-1,19	64	0,984	0,15	1,24
TiC	1,01	5,19	-73,4	31	0,968	0,23	0,86
BK-8	1,28	7,58	-45,1	108	0,991	0,09	1,00
W-Ni	2,06	5,37	-31,3	101	0,990	0,05	1,30
W-Fe	1,59	5,20	-23,0	101	0,990	0,08	1,58
W-Fe-Ti	1,20	5,23	-44,3	59	0,983	0,02	1,07
W-Co	1,23	5,13	-16,3	62	0,984	0,04	1,41
W-Zr	1,29	6,07	-27,6	49	0,980	0,11	1,31
W-Cr	2,60	4,53	-24,3	70	0,986	0,13	1,38
11X15H25M6AG2	23,3	6,27	-11,2	35	0,972	0,13	0,96
W-Ni-Zr	1,48	5,22	-21,7	43	0,977	0,26	1,00
W-Co-Mo	1,38	5,42	-21,1	81	0,988	0,18	1,51
W-Ni-Co	1,81	4,33	-18,9	61	0,984	0,08	1,03
W-Cr-Co	1,31	4,42	-18,7	64	0,984	0,08	1,08
W-Cr-Mo	2,39	4,42	-23,0	46	0,978	0,17	1,12
W-Cr-Ni	1,46	2,42	-20,3	78	0,987	0,17	1,33
W-Ni-Mo	1,91	5,05	-28,2	33	0,970	0,18	1,06

Величина $Y = \sum \Delta^k / W_n$ характеризует эффективность массопереноса при значении выделившейся энергии W_n . Максимум эффективности приходится на величину энергии, равную $W_{TD} = \sqrt{b \cdot f_u / 2 \cdot (-c) \cdot \tau_u}$. Численная величина энергии W_n может быть принята граничной, при которой оканчивается процесс легирования при образовании многослойных покрытий (кроме последнего слоя). Прирост массы покрытия значительно замедляется при W_n , близких к W_{nx} . В качестве ограничения на продолжительность легирования при образовании однослойного покрытия и последнего слоя многослойного покрытия предлагается промежуток времени, соответствующий граничной точке с энергией $W_{nz} = \sqrt{x/2 \cdot (-c) \cdot \tau_u}$, где x – единственный действительный корень уравнения из интервала $(bf, 1+bf)$:

$$x^3 - 3 \cdot (2 + b \cdot f_u) \cdot x^2 + 3 \cdot (1 + b \cdot f_u) \cdot x + b \cdot f_u - (b \cdot f_u)^3 = 0.$$

При отсутствии численных значений параметров A , b , c зависимости (1) для используемых материалов необходимо выполнить несложные экспериментальные исследования по известным методикам [6].

3. Рекомендации по статистической обработке результатов эксперимента и описание используемой программы

Число опытов n должно быть не меньше числа оцениваемых параметров $p = 3$. Приняв $n = 3$, можно определить параметры A , b , c , но число степеней свободы $\nu = n - p = 0$ не позволяет оценить

по методам математической статистики степень согласия опытных данных с расчетными по уравнению (1). Вывод данных на экран предусматривает $n \leq 8$.

Степень согласия, то есть качество уравнения регрессии в логарифмируемом виде от формулы (1)

$$\ln \left(\frac{\sum \Delta^k}{W_n} \right) = \ln A + (b \cdot f_u) \cdot \ln W_n + c \cdot \tau_u \cdot W_n^2, \quad (5)$$

определяется с помощью двух показателей: критерия значимости Фишера (F) [7] и коэффициента детерминации R^2 .

Использование уравнения и выводов, сделанных при его анализе, будет более надежным, если F , полученное по результатам опытов, превышает четырехкратное значение $F_{кр}$: ($F > 4 \cdot F_{кр}$) [см., например, [8]].

Разработана программа для ПЭВМ, которая по результатам $n \geq 3$ опытов (значению величины приведенной энергии W_n , частоте f_u , длительности импульса τ_u и полученному значению суммарного массопереноса) позволяет рассчитывать параметры A , b , c и показатели качества статистической обработки; при этих значениях параметров также определяются характерные точки энергии W_{nx} , W_{nz} , W_{nz} и время легирования для достижения заданной толщины покрытия h исследуемым материалом при выбранном режиме легирования.

Величина суммарного массопереноса $\sum \Delta^k$ обозначена в программе mc , имена остальных переменных близки по написанию к их обозначениям в формулах (1) – (5): fu , tau , W_n , t . По порядку следования в компьютер вводятся значения следующих переменных: pl – удельная плотность материала покрытия ($г/см^3$); наименьшее и наибольшее значения f_u и τ_u , необходимые для построения линий уровня в этих интервалах изменения; коэффициент неравномерности образования покрытия κ_n ; число опытов n ; значения результатов каждого опыта и т. д.

При использовании программы на экране появляется следующая информация:

1. Название программы и таблица введенных опытных данных.
2. Результаты обработки опытных данных статистическими методами.
3. Таблица значений частоты следования импульса f_u , необходимая для получения заданной толщины покрытия h при выбранных W_n и τ_u .
4. Графики уровней получаемой толщины покрытия.
5. Рекомендуемое время легирования 1 см^2 обрабатываемой поверхности в минутах.

4. Примеры моделирования технологических параметров процесса ЭИЛ с использованием ПЭВМ

Задача 1: Процесс ЭИЛ выполняется для восстановления размеров поверхности детали из стали 4Х5В2ФС компактным электродом из сплава 11Х15Н25М6АГ2 на установке модели ИМ-101, имеющей по паспортным данным следующие технологические параметры: частота следования импульсов (f_u) – 100–1000 Гц, длительность следования импульсов (τ_u) – $(0,06 - 0,12) \cdot 10^{-3}$ с, усредненная энергия единичного импульса W_u для режима 3 – 0,00033 кДж, режима 4 – 0,00045 кДж, режима 5 – 0,00096 кДж.

Необходимо определить наибольшую толщину образуемого за один проход покрытия и удельное время легирования t_p ($мин/см^2$) для образования на поверхности покрытия толщиной $h = 0,40$ мм при использовании 3, 4 и 5-го режимов обработки. Для расчетов использовали информацию о величине суммарного массопереноса материала анода на катод от управляемых параметров, найденных по результатам эксперимента (6 опытов).

Расчеты показывают, что наибольшая толщина покрытия за один проход может достигать $h_{max} = 0,66$ мм. Для $h = 0,4$ мм длительность процесса при использовании режимов 3, 4, 5 составляет соответственно $t_3 = 1,8$ $мин/см^2$, $t_4 = 1,39$ $мин/см^2$, $t_5 = 0,65$ $мин/см^2$.

Выполнена экспериментальная проверка правильности расчета технологических параметров при использовании установки для электроискрового легирования на установке модели ИМ-101. Получены следующие результаты. Наибольшая толщина образуемого покрытия электродом из сплава 11Х15Н25М6АГ2 до его разрушения составляет 0,641 мм (по расчету 0,66 мм). При работе на установке с использованием 4-го режима в течение 1,4 мин при обработке 1 см^2 поверхности получена средняя толщина покрытия 0,388 мм (по расчету 0,4 мм). При работе на установке с использованием 3-го режима в течение 2 мин при обработке 1 см^2 поверхности получена средняя толщина покрытия

0,412 мм (по расчету 0,4 мм). Для приведенного примера средняя погрешность составляет 3%.

Задача 2: Процесс ЭИЛ выполняется для легирования поверхности детали из стали 45 электродом из сплава W–Cr на установке модели "Элитрон-16", имеющей по паспортным данным следующие технологические параметры: частота следования импульсов (f_u) 600 Гц; усредненная энергия единичного импульса (W_u) для 1 и 5-го режимов соответственно – от 0,0000412 до 0,00024 кДж; длительность следования импульса (τ_u) – $0,04 \cdot 10^{-3}$ с.

Необходимо определить наибольшую толщину покрытия, образуемого за один проход, и удельное время легирования t_p (мин/см²) для образования на поверхности покрытия наибольшей толщины и толщины $h = 0,05$ мм при использовании режима с усредненной энергией единичного импульса $W_u = 0,00024$ кДж, длительности следования импульса $\tau_u = 0,04 \cdot 10^{-3}$ с и частотой следования импульсов $f_u = 600$ Гц. Для расчетов использовалась информация о значениях коэффициентов A , b , c таблицы для электрода из сплава W–Cr: $A = 0,0026$, $b = 4,53 \cdot 10^{-4}$, $c = -24,3$. Удельная плотность материала покрытия 12,6 г/см².

Расчеты показывают, что наибольшая толщина покрытия за один проход может достигать $h_{max} = 0,08$ мм и удельное время легирования для получения покрытия толщиной 0,08 мм, при указанных выше режимах процесса составляет 3,36 мин/см². Для достижения толщины покрытия $h = 0,05$ мм при указанном режиме удельное время легирования должно быть 1,7 мин/см².

Выполнена экспериментальная проверка правильности определения технологических параметров при использовании установки для электроискрового легирования модели "Элитрон-16". Получены следующие результаты. Наибольшая толщина образуемого покрытия электродом из сплава W–Cr до его разрушения составляет 0,086 мм (по расчету 0,088 мм). При работе на установке с использованием технологических режимов: $f_u = 600$ Гц, $W_u = 0,00024$ кДж, $\tau_u = 0,04 \cdot 10^{-3}$ с в течение 1,7 мин при обработке 1 см² поверхности получена средняя толщина покрытия 0,048 мм (по расчету 0,05 мм). Для приведенного примера средняя погрешность составляет до 4%.

При исследовании массопереноса более чем 20 пар электродных материалов наибольшая погрешность получена при легировании титанового сплава ВТ20 электродом Cr–Ni и составляет 6 %.

Выводы

Предлагаемая методика определения технологических параметров процесса электроискрового легирования и связанного с этими параметрами необходимого времени легирования для образования заданной толщины покрытия может быть использована для инженерных расчетов и моделирования процессов электроискрового легирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н.И. Электроискровая обработка токопроводящих металлов. М., 1958.
2. Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д., Бовкун Г.А., Сычев В.С. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Киев, 1975.
3. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Прядко Л.Ф., Егоров Ф.Ф. Электродные материалы для электроискрового легирования. М., 1988.
4. Рыбалко А.В., Хамураев В.И. Электрические параметры электроэрозионного легирования // Электронная обработка материалов. 1988. № 6. С. 18–20.
5. Мулин Ю.И., Верхотуров А.Д. Электроискровое легирование рабочих поверхностей инструментов и деталей машин электродными материалами, полученными из минерального сырья. Владивосток, 1999.
6. Мулин Ю.И., Климова Л.А., Ярков Д.В. Феноменологическое описание закономерностей формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании // Физика и химия обработки материалов. 2000. № 3. С. 50–56.
7. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М., 1965.
8. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М., 1985.

Поступила 21.11.01

Summary

The main problems of simulations of electrosparking alloying process are: purpose of the technological regime for formation a functional surfaces, and including a production coating of the given thickness for this modeling is depicted in this article and it is oriented to IBM PC. The examples of solution this problems is leded.