

А.В. Семенчук, И.И. Сафронов

О ЗАКОНЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

Качество покрытия детали материалом электрода при электроискровом легировании определяется рядом параметров процесса: энергетических (емкостью конденсатора и напряжением его зарядки), механических (виброударной скоростью и углом удара электрода о деталь), физико-химических свойств электродных материалов, состава и состояния межэлектродной среды.

При разработке новых типов технологических установок для легирования необходимо прогнозировать ожидаемые параметры покрытия: макро- и микрогеометрию нанесенного слоя, его микротвердость, физико-химический состав и эксплуатационные свойства, что вызывает необходимость моделирования процессов в электроискровом промежутке на стадии проектирования установок.

В настоящее время при теоретическом анализе и расчете процессов в электроискровом промежутке используют детерминированные модели, в которых полагают наличие жесткой функциональной причинно-следственной связи между различными параметрами процессов. Однако во многих случаях параметры имеют значительный разброс (табл. 1). При этом детерминированные модели недостаточно адекватно отражают состояние процесса и должны быть заменены статистическими (индетерминированными).

Одним из перспективных способов реализации статистического моделирования является метод Монте-Карло, который предусматривает три этапа: 1 – генерирование вектора входных параметров с заданным законом распределения; 2 – нахождение по полученному вектору входных параметров функционально связанного с ним вектора выходных параметров; 3 – обработка полученного множества векторов выходных параметров методами математической статистики [1].

Осуществление первого этапа (генерации входного вектора) предполагает, что закон распределения генерируемого вектора определен.

О статистическом характере некоторых величин неоднократно упоминалось как нами, так и другими авторами. Так, в табл. 1 [2] приведены данные распределения пробивного расстояния при фиксированном пробивном напряжении для различных состояний электродных материалов и межэлектродной среды. Закон распределения в упомянутой работе не приводится. Анализ этих данных, проведенный нами при помощи критерия Пирсона [3], показал, что закон распределения пробивного расстояния d логнормален [4]:

$$f(d) = (\sqrt{2\pi}d\sigma)^{-1} \exp\left[-0,5(\ln d - \ln a)^2 / \sigma^2\right] \text{ при } d > 0. \quad (1)$$

или, что то же самое

$$f(y) = (\sqrt{2\pi}\sigma)^{-1} \exp\left[-0,5(y - m)^2 / \sigma^2\right], \quad (2)$$

Таблица 1. Количество пробоев при 100 испытаниях МЭП 1–10 мкм и при 25 испытаниях 0,1–1,0 мкм [2]

d, мкм	А		Б	
	Обычный воздух	Загрязненный воздух	Обычный воздух	Загрязненный воздух
10	5	12	–	–
10-9	0	3	16	24
9-8	1	4	5	6
8-7	0	7	7	9
7-6	1	9	9	13
6-5	1	10	12	10
5-4	0	7	9	7
4-3	2	6	10	9
3-2	1	4	8	6
2-1	3	5	5	3
1	86	33	19	13

d, мкм	А				Б			
	Ва- куум	Очищен- ный воз- дух	Обычный воздух	Загрязнен- ный воздух	Ва- куум	Очищен- ный воз- дух	Обычный воздух	Загрязнен- ный воздух
1,0-0,9	2	3	5	16	22	22	23	24
0,9-0,8	0	0	1	0	0	0	0	0
0,8-0,7	1	0	1	1	1	0	1	0
0,7-0,6	0	2	2	2	0	1	1	0
0,6-0,5	2	0	1	1	1	0	0	1
0,5-0,4	1	2	3	0	0	1	0	0
0,4-0,3	2	3	2	0	0	0	0	0
0,3-0,2	3	3	2	1	1	0	0	0
0,2-0,1	3	2	0	0	0	0	0	0
0,1	11	10	7	4	0	1	0	0

Примечания: А – медные электроды, которые обрабатывались предварительным воздействием разрядов для получения заглаженной оплавленной поверхности; Б – электроды, поверхность которых перед каждым испытанием зачищалась наждачной бумагой.

где

$$Y = \ln d, m = \ln a. \quad (3)$$

Однако из-за ограниченности представленного в [2] материала сделано это с невысокой достоверностью (уровень значимости $\varepsilon = 0,3$). Дополнительный анализ полученных нами экспериментальных данных позволил довести уровень до $\varepsilon = 0,05$.

Воздух очищали, пропуская через фильтр, заполненный очищенной стеклянной ватой. Искусственное загрязнение проводилось частицами дыма. Вакуум – $(10^{-3}-10^{-2}) \cdot 1,3$ Па, $U = 100$ В.

Исследование закона распределения пробивного расстояния при фиксированном пробивном напряжении производилось на экспериментальной установке, состоящей из двух сближающихся микрометрическим винтом электродов, к которым подводилось напряжение 200 В от предварительно заряженного конденсатора малой емкости (0,01 мкФ).

Момент пробоя определялся при помощи электростатического вольтметра С-50/4, пробивное расстояние – по показаниям микрометрического винта. Объем выборки равнялся 2000.

Приведенные в литературе [5] данные о нормальном законе распределения пробивного расстояния при больших напряжениях ($U \geq 30$ кВ), объясняются тем, что при $\ln a \gg \sigma$ и $\sigma \rightarrow 0$ логнормальное распределение вырождается в нормальное с параметрами $m_H = a$, $\sigma_H = a$, в чем нетрудно убедиться при помощи предельного перехода $\sigma \rightarrow 0$ в выражении (1). Строго говоря, распределение не может быть нормальным и при больших значениях пробивного расстояния, так как нормальное распределение определено на интервале $-\infty < d < \infty$, а отрицательные значения пробивного расстояния противоречат физическому смыслу процесса. Сказанное подтверждает

логнормальность распределения и при больших пробивных расстояниях, а используемый в этом случае нормальный закон является лишь вырожденной формой логнормального. При малых же пробивных расстояниях меняется характер пробоя, который перестает быть таунсендовским и становится автоэлектронным или взрывным [6], вследствие чего нормальный закон распределения становится неприемлемым, и требуется его замена более общим логнормальным.

При исследовании энергетических параметров эродирующих импульсов отмечался их значительный статистический разброс, особенно при использовании неразобренных релаксационных генераторов [6]. Для примера в табл. 2 приведены данные осциллографирования импульсного тока установки ЭФИ-10.

Таблица 2. Относительные разбросы напряжений и энергий импульсов установки ЭФИ-10

Режим	$I_{p,cp}, A$	U_c, B	k_{II}	E, B	$k_{B,max}$	k_A	$k_{A,max}$
1	0,5–0,7	11,5–6,7	1,7	15	2,23	2,89	4,97
2	0,6–1,2	10,8–8,2	2,05	25	3,04	4,2	9,24
3	1,2–1,5	27–16	1,68	45	2,81	2,82	7,89
4	1,5–2,0	45–28	1,60	75	2,67	2,56	7,12
5	2,0–2,5	58–25	2,32	140	5,60	5,38	31,36
6	2,0–2,5	120–86	1,39	200	2,32	1,93	5,38

Измерения проводились с настройкой вибратора в соответствии с номинальными значениями средних токов установки, так что на каждом режиме их величины изменялись от I_{min} до I_{max} (паспортные значения). В упомянутой работе [6] величина относительных разбросов параметров напряжения k_A и энергии k_B оценивалась при помощи коэффициентов

$$k_B = U_{max} / U_{min}, \quad k_A = A_{max} / A_{min}, \quad (4)$$

$$k_{B,max} = E / U_{min}, \quad k_{A,max} = A_E / A_{min}, \quad (5)$$

где E – ЭДС (напряжение холостого хода); $A_E = 0,5 \cdot CE^2$.

Как следует из данных табл. 2, энергии импульсов тока для различных режимов обработки могут отличаться от 5 до 31 раза.

Более поздние проведенные нами исследования показали, что и законы распределения энергетических параметров эродирующих импульсов также носят логнормальный характер.

В работах [7, 8] нами исследовалось влияние виброударной скорости, задаваемой углом отклонения маятникового механизма, на геометрические размеры лунок, оставляемых на детали единичными искровыми разрядами, при фиксированных энергетических параметрах (емкости конденсатора 100 мкФ и напряжения его зарядки 200 В) последних, соответственно при прямом и косом ударах электрода (ВК8) о деталь (сталь 45). При прямом ударе форма лунок была круглая, при косом – эллиптическая с сильно коррелированными осями эллипса ($\rho=0,8-0,9$).

Закон распределения полуосей X, Y эллипсов лунок отдельных разрядов [4] является двумерным логнормальным, имеющим в приведенном к каноническому виду плотность вероятностей

$$f(\ln X, \ln Y) = \frac{1}{2\pi\sigma_a\sigma_b} \exp \left[-\frac{(\ln X - \ln a)^2}{2\sigma_a^2} - \frac{(\ln Y - \ln b)^2}{2\sigma_b^2} \right], \quad (6)$$

где σ_a, σ_b – среднеквадратичные отклонения логарифмически преобразованных величин; a, b – медианы распределений большой и малой полуосей эллипса, являющиеся функцией виброударной скорости и угла удара электрода о деталь и изображенные на рис. 1 соответственно сплошной и штриховой линиями. Коэффициенты вариации γ одинаковы для обеих полуосей эллипса и равны отношению их среднеквадратичных отклонений σ'_a, σ'_b к медианам a, b . При изменении угла наклона образца γ менялся в малой степени, и его можно считать функцией только модуля виброударной скорости, изображенной на рис. 1 штрих пунктирной линией.

Совпадение эмпирического закона распределения с теоретическим двумерным логнормальным доказано в специально проведенном эксперименте с расширенной выборкой ($n=2000$) для виброударной скорости $V_0=2$ м/с и угла наклона $\alpha=45^0$ при помощи критерия Пирсона. При прямом ударе электрода ($\alpha=90^0$) двумерное распределение (6) вырождается в одномерное (2).

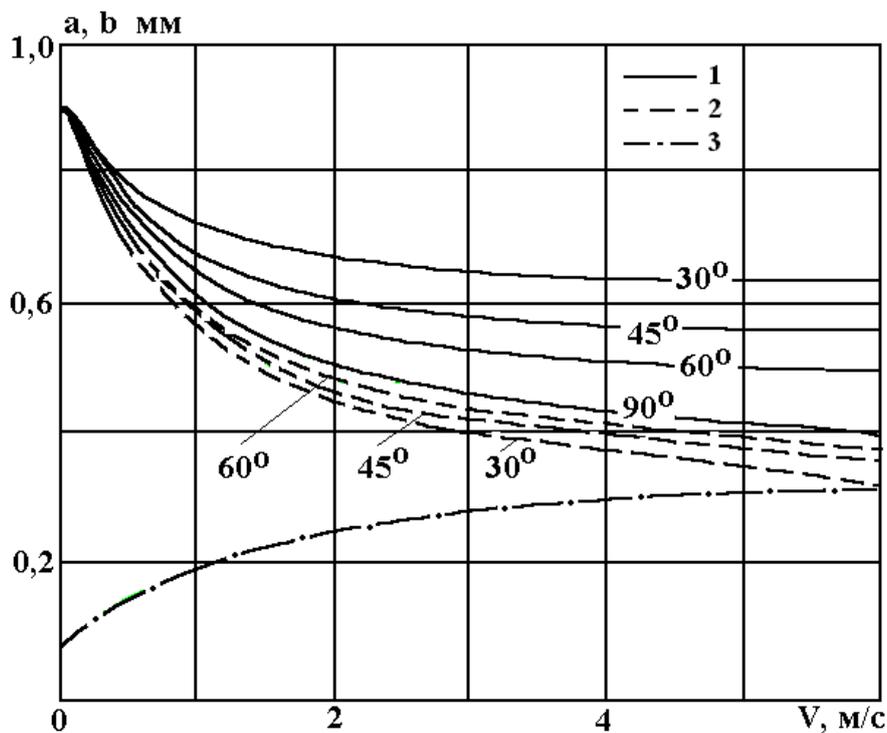


Рис. 1. Зависимость медиан полуосей эллипса лунок единичного разряда от виброударной скорости: 1 – большая полуось; 2 – малая полуось; 3 – коэффициент вариации γ .

Двухмерный логнормальный закон распределения геометрических размеров лунок (диаметра и глубины) единичных разрядов отмечался и при размерной обработке стальных деталей медным электродом [9]. В отличие от наших исследований эллипсности лунок в плане не наблюдалось, что дополнительно указывает на ее специфичность, связанную с наличием виброударного процесса с косым ударом электрода. Отмечался также логнормальный характер распределения глубины лунки. Коэффициент $K_h=r/h$, равный отношению радиуса лунки r к ее глубине h , в зависимости от энергетических параметров искровых разрядов, физико-химических свойств материалов электродов и других факторов изменялся в большинстве случаев от 4,5 до 5,5 (реже до 7,5) раз со средним значением 5. По другим данным диапазон его изменения был более широким: $K_h=5-12$ [10], $K_h=5-6$ при размерной обработке алюминия, $K_h=6-18$ – стали [11].

Из сопоставления наших данных [8] с данными [9] нетрудно заключить, что с учетом глубины лунка единичного разряда при косом ударе должна иметь форму трехосного эллипсоида, а закон распределения его полуосей должен быть трехмерным логнормальным.

В работе [12] приведены данные распределения диаметра лунок единичного разряда в зависимости от физико-химических свойств материалов (электрод – ВК6М, деталь – сталь Р6М5 и 9ХС), состава среды (кислород, углекислый газ, воздух) и энергии разряда (0,022 Дж, 0,09 Дж, 0,25 Дж). Для примера приведем заимствованные из данной работы кривые распределений диаметров (рис. 2, сплошные линии) при легировании детали из стали 9ХС электродом из ВК6М в углекислом газе при упомянутых энергиях разряда. Хотя авторами закон распределения не приводится, качественно хорошо просматривается его логнормальный характер: положительная асимметрия, уменьшающаяся при смещении моды вправо. Для количественного подтверждения данной гипотезы, прологарифмировав выражение (2) и введя обозначения

$$\ln(f(Y)) = p(Y), \quad \ln(2\pi) = A, \quad 1/\sigma = \alpha, \quad m/\sigma = \beta, \quad (7)$$

получим

$$p(Y) = -A + \ln \alpha - 0,5(\alpha Y - \beta)^2. \quad (8)$$

Прологарифмируем экспериментальное распределение логарифма диаметров лунок $\varphi(Y)$, определенное на интервале $g < Y < h$ ($-\infty < g < h < \infty$), и введем обозначение

$$\ln(\varphi(Y)) = q(Y). \quad (9)$$

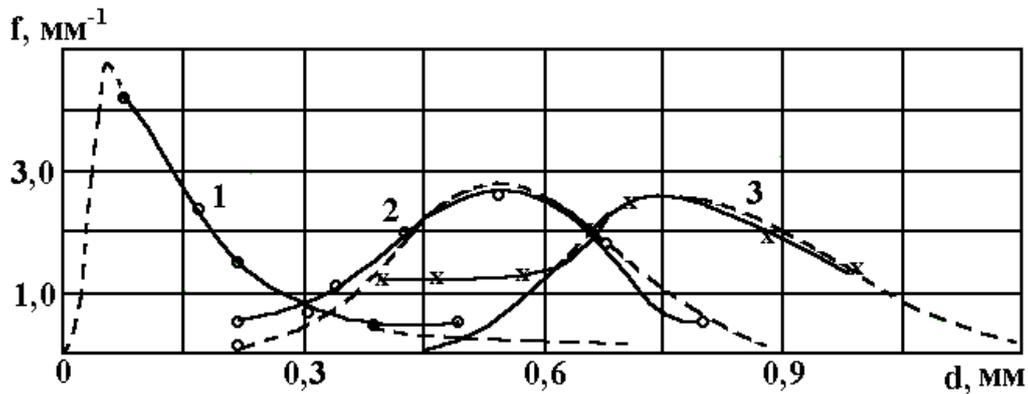


Рис. 2. Распределение диаметров лунок единичного разряда при легировании стали 9ХС электродом из ВК6М в углекислом газе при энергиях импульсов 0,022 Дж; 0,09 Дж и 0,25 Дж.

Применив к выражениям (7), (8) метод наименьших квадратов, получим минимизируемый функционал

$$S = \int_g^h [q(Y) - p(Y)]^2 dY = \int_g^h [q(Y) + A - \ln \alpha + 0,5(\alpha Y - \beta)^2]^2 dY, \quad (10)$$

минимум которого найдем гибридным методом [13]: приближенным (сходящихся интервалов) по α и аналитическим по β , приводящим при каждом фиксированном значении α к решению кубического уравнения

$$\beta^3 - 1,5\beta^2\alpha(g+h) + \beta \left[\alpha^2(g^2 + gh + h^2) - 2(\ln \alpha - A) + \frac{2}{h-g} \int_g^h d(Y) dY \right] - 0,25\alpha^3(g+h)(g^2 + h^2) + \alpha(g+h)(\ln \alpha - A) - \frac{2\alpha}{h-g} \int_g^h Y \cdot q(Y) \cdot dY = 0. \quad (11)$$

Переходя от параметров α и β при помощи выражений (7) и (3) к исходным параметрам d и $f(d)$, построим графики логнормального распределения (1) (рис. 2, штрих пунктирные линии). Из рис. 2 видно удовлетворительное совпадение экспериментального и теоретического логнормальных распределений. Мерой их расхождения является значение функционала (10). Аналогичные результаты дает анализ и других распределений из работы [12].

Таким образом, на основании рассмотрения наших данных и данных других авторов можно заключить, что логнормальный закон распределения, одно- и двухмерный, является характерным для электроискрового легирования. Он описывает распределения пробивного расстояния при фиксированном пробивном напряжении, напряжения и энергии электроискровых импульсов, геометрических размеров лунок единичных разрядов. Параметры распределений определяются рядом факторов: энергетических (емкостью конденсатора и напряжением его зарядки), механических (виброударной скоростью и углом удара электрода о деталь), физико-химических свойств электродных материалов, состава и состояния межэлектродной среды.

Использование параметров распределений при статистическом моделировании процессов в электроискровом промежутке позволяет обеспечить адекватность отражения их состояния, что приводит к улучшению технологических показателей и сокращению сроков разработки новых установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенчук А.В., Бортник М.И. Использование метода Монте-Карло при прогнозировании качества изделий // Алгоритмы экономических процессов. Кишинев, 1988. С. 97–101.
2. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев, 1985.
3. Венцель Е.С. Теория вероятностей. М., 1968.
4. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М., 1985.
5. Электротехнический справочник. Изд. 5. М., 1974. Т. 1.

6. Фурсов С.П., Парамонов А.М., Добында И.В., Семенчук А.В. Источники питания для электроискрового легирования. Изд.2. Кишинев, 1983.
7. Семенчук А.В. Влияние виброударной скорости на параметры электроискрового легирования // Прогрессивные методы электрохимической и электрофизической обработки материалов. Уфа, 1979. С. 162–163.
8. Сафронов И.И., Семенчук А.В., Джигун О.А., Цуркан И.В. Влияние виброударной скорости при косом ударе на параметры электроискрового легирования // Электронная обработка материалов. 1996. № 2–3. С. 56–58.
9. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. М., 1980.
10. Золотых Б.Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой среде. Автореф. докт. дис. М., 1968.
11. Зингерман А.С., Каплан Д.А. Зависимость электрической эрозии катода от длины разрядного канала // Журнал теоретической физики. 1959. Т. 29. № 7.
12. Ким В.А., Коротаев Д.Н. Газовая среда – как фактор управления эрозионным процессом при электроискровом легировании // Электронная обработка материалов. 1998. № 3–4. С. 37–43.
13. Сафронов И.И., Семенчук А.В., Цуркан И.В., Фотеев В.В. Электроэрозионные процессы на электродах и микроструктурно-фазовый состав легированного слоя. Кишинев, 1999.

Поступила 15.12.99

Summary

There is well seen from our facts and literary dates, that the lognormal law of distribution – one – and multi-measured is the characteristic to electric sparkle installation. It describes the distribution of the stroked distance with the fixed and stroked tension, tension and energy of the electric sparkle impulses, the holes geometrical measures of the single discharges. The distributions parameters are formed by some factors: energetical (the condenser volume and the strain of its charge), mechanical (the speed and angle of the materials of electrode against the detail), phisico-chemical features of the materials of electrodes, the compositions and state interelectrodes environment.

В.А. Тимощенко

ИЗБИРАТЕЛЬНОЕ НАНЕСЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА РАБОЧИЕ ПОВЕРХНОСТИ ШТАМПОВ ДЛЯ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

г. Кишинев, Республика Молдова

Устойчивая работа штампов для горячей объемной штамповки может быть обеспечена при соответствии функционального назначения рабочих поверхностей гравюры штампа реальным условиям их работы. При этом важно обеспечить локальные оптимальные условия взаимодействия поверхностей с деформируемым металлом. Поэтому на основе оценки условий в зоне взаимодействия гравюры ручья штампа и деформируемой заготовки следует выявить участки рабочих поверхностей, свойства которых требуют изменения.

Основными причинами выхода из строя штампов для горячей объемной штамповки являются: разрушение или аварийная поломка, абразивный и адгезионный износ, разгарные трещины, смятие. Виды износа проявляются в локальных зонах гравюры штампа в зависимости от действующих на рабочую поверхность давления, теплового потока, от свойств и скорости течения по ней деформи-