

А. Д. Верхотуров, В. А. Ким

## К ФРАКТАЛЬНОЙ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ\*)

*Институт материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН,  
ул. Тихоокеанская, 153, г. Хабаровск, 680042, Россия*

### **Введение**

Электрическая эрозия, динамика анодного массового потока и образование покрытия при электроискровом легировании (ЭИЛ) происходят в неравновесных условиях воздействия электрического разряда на токопроводящий материал. Межэлектродный массовый поток представляет основное звено в системе ЭИЛ, определяющее свойства упрочненной поверхности. Плотность подводимой мощности и время активного взаимодействия искрового импульса с легирующим электродом (анодом) находится в таком соотношении, при котором формирующиеся тепловые диссипативные потоки не могут полностью уравновесить энергию, подводимую искровым разрядом, и ее несбалансированная часть расходуется на электрическую эрозию анодного материала. Диссипация в этом случае реализуется за счет энергетических затрат на образование общей поверхности всеми микрочастицами анодного потока, размерное распределение которой можно рассматривать как форму организации диссипативной структуры. Необходимо отметить, что фрактальный анализ не умоляет, а дополняет физическую сторону явления, и при раскрытии природы неравновесного процесса их необходимо рассматривать в единстве. Проявление фрактальности позволяет установить рекуррентную закономерность и упрощает методологию моделирования сложной неравновесной системы.

Целью данной работы является описание фрактальных параметров анодного массового потока и упрочненного поверхностного слоя при ЭИЛ.

### **Фрактальная параметризация ЭИЛ**

В зоне воздействия отдельного искрового разряда за счет теплового выброса материала над поверхностью образуется микролокальная область сверхвысокого давления. В результате электрическая эрозия анода осуществляется путем образования продуктов разрушения в твердокристаллическом, жидкокапельном и пароплазменном состоянии [1–3]. При перемещении твердо- и жидкофазных эродированных частиц в межэлектродном пространстве они многократно взрывообразно диспергируют, при этом часть их внутренней энергии расходуется на работу образования новых поверхностей. Процесс диспергирования будет протекать до тех пор, пока внутренняя энергия каждой микрочастицы анодного массового потока не придет в равновесие с ее поверхностной энергией. В ходе диспергирования большая часть твердокристаллических фрагментов перейдет в жидкофазное состояние и в момент осаждения анодный массовый поток будет состоять преимущественно из жидкокапельной фазы. Описанный процесс формирования анодного массового потока обладает всеми признаками самоподобия на разных масштабных уровнях и должен характеризоваться фрактальными свойствами. Таким свойством, в частности, обладает размерное распределение анодного массового потока, которое может быть формализовано фрактальной зависимостью вида [4]

$$N = N_0 \cdot \Delta^{-D}, \quad (1)$$

где  $N$  – общее число частиц анодного массового потока, характеристический размер которых превышает  $\Delta$ ;  $D$  – фрактальная размерность;  $N_0$  – const.

Суммарная площадь поверхностей всех частиц анодного массового потока в предположении, что они имеют сферическую форму, составит

\*) Печатается в порядке дискуссии

$$F_{\Sigma} = N_0 \int_0^A \pi \Delta^2 \left( -\frac{\partial N}{\partial \Delta} \right) d\Delta = \pi N_0 \left( \frac{D}{D-2} \right) \frac{1}{A^{D-2}}. \quad (2)$$

Энергетические затраты на образование такой поверхности определяют диссипативные свойства анодного массового потока и могут быть оценены

$$W = F_{\Sigma} \cdot \varphi, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – удельная поверхностная энергия жидкофазного состояния материала.

Из (2) следует, что диссипативная активность эрозионного процесса возрастает с уменьшением размеров микрочастиц  $\Delta$  и повышением фрактального размера  $D$ .

Эрозионные микрочастицы, оседая на упрочняемую поверхность (катод), создают покрытие с мезоструктурой, наследственно связанной со структурой межэлектродного массового потока. Покрытие можно рассматривать как совокупность застывших микрокапель и микрократеров, подвергнутых дополнительному механотермическому воздействию, со своей фрактальной размерностью. Фрактальность структуры покрытия можно определить по интегральному распределению микролунок, описываемому скейлинговой зависимостью (1). Окислительные и плазмохимические реакции, только частичное осаждение эрозионных частиц и электроконтактное взаимодействие электродов изменяют фрактальную размерность структуры покрытия по сравнению с фрактальной размерностью анодного массового потока.

### Методика исследования

Размерному анализу продуктов электрической эрозии посвящены работы [5, 6], в основе которых лежит следующая методика. В диэлектрической среде между торцами цилиндрического анода и катода инициировался единичный электрический разряд, вызывающий преимущественно эрозионное разрушение анода. Весовое распределение продуктов эрозии определяли по кинетическим зависимостям привеса микрочастиц, осаждаемых на измерительную чашу аналитических весов, помещенных в жидкую среду (керосин). Исходя из того, что скорость осаждения пропорциональна среднему весу частиц фракции, относительное количество частиц продуктов эрозии, имеющих средний диаметр  $\Delta_i$  можно определить

$$f_i = \frac{\delta m_i}{M \cdot \delta \Delta_i}, \quad (4)$$

где  $\delta \Delta_i$  и  $\delta m_i$  – интервал диаметральных размеров и масса  $i$ -й фракции продуктов эрозии;  $M$  – суммарная эрозия материала за один разряд.

Для определения размерного распределения микрократеров, возникающих при ЭИЛ, на зеркальную плоскость металлического образца, приготовленную по технологии металлографического шлифа, однопроходно наносили покрытие в виде узкой дорожки. Диаметр лунок и их количество определяли по микрофотографиям упрочненных поверхностей, по которым рассчитывали частоты

$$P_i = \frac{n_i}{\sum n_i} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $n_i$  – число микролунок на  $i$ -м интервале со средним диаметральным размером  $\Delta_i$ .

Фрактальную размерность анодного массового потока и упрочненного покрытия определяли по известной методике [7] как тангенс угла наклона выражений  $\Sigma f_i = F(\Delta)$  и  $\Sigma P_i = F(\Delta)$ , построенных в логарифмических координатах.

Электроискровое легирование осуществляли на установке «ЭЛИТРОН 22А».

### Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 1 и 2 в логарифмических координатах представлены интегральные распределения диаметральных размеров продуктов электрической эрозии олова, меди и вольфрама, рассчитанные по экспериментальным данным работы [5], и размеров микролунок, образованных при упрочнении инструментальной стали 9ХС легирующим электродом из ВК6М. Представленные зависимости являются по сути графиками Ричардсона и доказывают самоподобность исследуемого объекта. Структура анодного массового потока самоподобна в широком масштабном интервале и приближена к регулярным фракталам. Структура покрытия самоподобна лишь в ограниченном диапазоне масштабов, и наличие точек излома на графиках Ричардсона с появлением верхних ветвей с меньшей фрактальной размерностью подтверждает это. Расчетные значения фрактальных размерностей сведены в табл. 1 и 2.

Представленные результаты показывают, что с понижением электроэрозионной стойкости электродного материала фрактальная размерность анодного массового потока уменьшается, а диапазон рассеивания продуктов эрозии возрастает и сдвигается в область больших диаметров. С повышением мощности единичного искрового разряда для всех исследованных материалов фрактальная размерность продуктов эрозии возрастает и, как следствие этого, сужается диапазон их диаметрального рассеивания. Высокая чувствительность к изменению фрактального размера проявляется у электродных материалов с более низкой эрозионной стойкостью. Большие значения фрактальных размеров ( $D > 2$ ) указывают на высокую степень неравновесности электроэрозионного процесса.

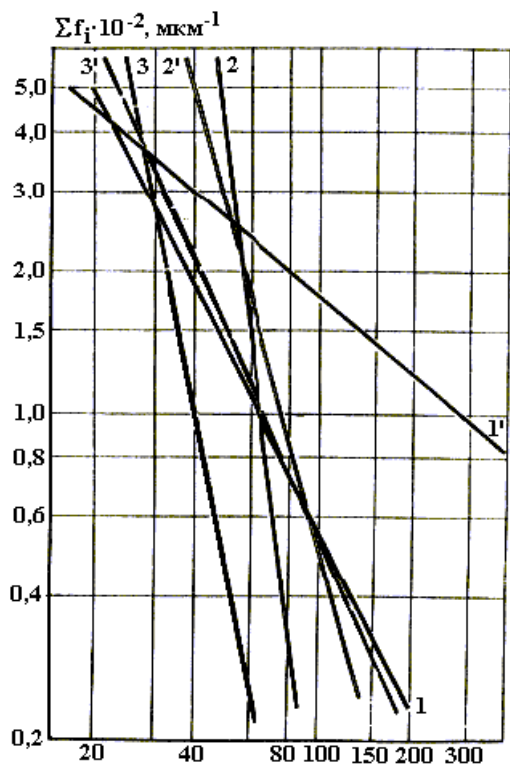


Рис. 1. Интегральное распределение диаметральных размеров продуктов электрической эрозии олова 9 (1), меди (2), и вольфрама (3). 1; 2; 3 – мощность искрового разряда  $8 \cdot 10^4$  Вт; 1'; 2'; 3' – мощность искрового разряда  $10^4$  Вт.

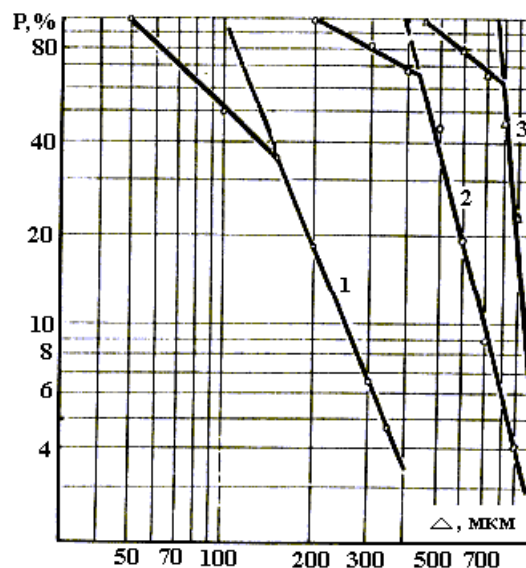


Рис. 2. Интегральное распределение размеров микролунок при ЭИЛ стали 9ХС электродом из ВК6М на воздухе. 1 – энергия разряда 0,02 Дж; 2 – энергия разряда 0,09 Дж; 3 – энергия разряда 0,25 Дж.

Таблица 1. Фрактальная размерность  $D$  анодного массового потока

Материал анода	Мощность единичного разряда, Вт	
	$1 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$
Олово	0,574	2,337
Медь	2,554	5,135
Вольфрам	1,521	3,338

Таблица 2. Фрактальная размерность  $D$  покрытия, сформированного ЭИЛ при упрочнении стали 9ХС легирующим электродом из ВК6М

Энергия искрового разряда, Дж	Основная ветвь	Верхняя ветвь
0,02	2,404	0,737
0,09	3,641	0,60
0,25	9,484	0,617

С учетом выражений (2) и (3) можно заключить, что повышенная электроэрозионная стойкость меди и вольфрама подкрепляется высокой энергоемкостью процесса формирования анодного массового потока. Традиционно электроэрозионную активность материала оценивают критерием Палатника

$$Pa = H_{пл} T_{пл} \lambda, \quad (6)$$

где  $H_{пл}$  – удельная энтальпия плавления;  $T_{пл}$  – температура плавления;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Величины  $H_{пл}$  и  $T_{пл}$ , входящие в формулу (6), являются инвариантной удельной внутренней или свободной энергией материала, с повышением которых динамическое равновесие между внутренней и поверхностной энергиями достигается при меньших характеристических размерах частиц, и диспергирование независимо от природы разрушающего воздействия идет по пути производства более мелких фракций. Эта закономерность проявляется и при электрической эрозии материалов.

При повышении энергии искрового разряда развитие эрозионного процесса идет не по пути выброса большего количества эрозионной массы, а в направлении роста фрактальной размерности продуктов эрозии, сужения диапазона их рассеивания и смещения самого диапазона в область меньших диаметров. Формирование анодного массового потока необходимо рассматривать в единстве с процессами вторичных структурных изменений, протекающих в поверхностных слоях электродов и повышающих эрозионную стойкость материала. Перечисленные факторы в совокупности определяют самоорганизацию электроэрозионной системы, эволюция которой в целом направлена на обеспечение большей сопротивляемости анодного материала эрозионному разрушению.

Характер изменения свойств покрытия с увеличением энергии искрового разряда принципиально сохраняет тенденцию роста фрактальности и сужения диапазона размерного рассеивания микролунок. Однако отличительной особенностью интегрального распределения микролунок, как было отмечено выше, является появление верхних ветвей с малой фрактальной размерностью. Учитывая, что структура анодного массового потока по степени самоподобия приближена к регулярным фракталам, трансформацию фрактальных свойств покрытия, включая ограниченность самоподобия, можно объяснить окислительными и плазмохимическими процессами в межэлектродном промежутке. Повышение фрактальной размерности основной ветви указывает на высокую степень неравновесности, а понижение фрактальности верхней ветви – на стремление к равновесности задействованных процессов. В общем случае фрактальность анодного массового потока и покрытия не должны совпадать. Действительно, фрактальные свойства покрытия наследственно связаны с эрозионным процессом, но подвержены сильному изменению за счет взаимодействия продуктов эрозии с упрочняемой поверхностью, представляющего самостоятельный неравновесный процесс. Между размером эрозионной частицы и образованной им лунки не всегда проявляется прямая пропорциональная зависимость. Эрозионные частицы несут в себе тепловую, кинетическую и электрическую энергии, но мелкие фрагменты являются в удельном соотношении более энергоемкими по сравнению с крупными. При осаждении продуктов эрозии анода на поверхность катода возникает тепловой импульс, при этом меньшая эрозионная частица инициирует тепловой источник с большей плотностью мощности. В целом можно заключить, что с понижением масштабного уровня степень неравновесности процесса формирования структуры покрытия падает, и такая закономерность проявляется практически для всех естественных фракталов [7].

Фрактальный анализ ЭИЛ в совокупности с раскрытием физических сторон этого процесса открывает новые перспективы исследования. Самоподобность анодного массового потока в широком масштабном диапазоне делает привлекательным моделирование процесса его развития модифицированными коврами [8]. Раскрытие фрактальных диссипативных каналов эрозионного процесса открывает новые пути повышения массопереноса и эффективности упрочнения.

### **Заключение**

Предложенные характеристики фрактальной параметризации анодного массового потока и упрочненного покрытия количественно отображают степень неравновесности сопутствующих ЭИЛ процессов, раскрывают возможные варианты самоорганизации системы ЭИЛ и открывают, наряду с традиционными подходами, новые перспективы повышения эффективности упрочнения.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электродинамическая теория искровой электрической эрозии металлов // Проблемы электрической обработки материалов. М., Изд-во АН СССР. 1962. № 2. С. 44–51.

2. *Золотых Б.Н.* О физической природе электроискровой обработки металлов // *Электрическая обработка металлов*. М., Изд-во АН СССР. 1957. Вып. 1. С. 38–69.
3. *Мик Дж., Кресс Дж.* Электрический пробой в газах. М., 1960.
4. *Фебер Е.* Фракталы. М., 1991.
5. *Головейко А.Г.* Диспергирование металлов при импульсном разряде в жидких диэлектриках // *Физические основы электроискровой обработки материалов*. М., 1966.
6. *Намитоков К.К.* Электроэрозионные явления. М.: Энергия. 1978.
7. *Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогов А.А.* Синергетика и фракталы в материаловедении. М., 1994.
8. *Vstovsky G.V.* A controlled multifractal // *Phys. Lett. A*. 1992. 165. № 1. P. 41–46.

*Поступила 22.08.2000*

### Summary

In paper is determined fractal dimension of an anode mass flow and hardened surface at electrosark alloying depending on an erosion resistance of a material of the anode and power of discharge. Is fixed, that the structure of an anode mass flow is self-similar in broad scale spacing and approximates to regular fractals, as against structure of a matting, which one is self-similar in the bounded range of scales.

Д. А. Игнатьков

## К ОБРАЗОВАНИЮ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИ ОСАЖДАЕМЫХ МЕТАЛЛАХ. II ЧАСТЬ

*Продолжение статьи, опубликованной в журнале Электронная обработка материалов, 2001, № 5. С. 21 – 31.*

*Институт прикладной физики АН РМ,  
ул. Академией, 5, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова  
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. Бровки, 6, г. Минск, 220027, Республика Беларусь*

**Механизм образования остаточных напряжений в электролитически осаждаемых металлах.** Механизм образования ОН представляется следующим образом. Пусть в рН-слое или приповерхностной области возникла метастабильная фаза с увеличенным удельным объемом кристаллической решетки. Когда слои осаждаемого металла зарастают в глубь покрытия, то ее превращение в устойчивую фазу сопровождается уменьшением удельного объема решетки. Сокращению объема препятствуют адгезионные связи с подложкой, что приводит к возникновению временных напряжений растяжения. По мере роста толщины покрытия их значения меняются вследствие наложения напряжений от вышележащих осаждаемых слоев. После электролиза временные напряжения растяжения становятся растягивающими ОН. Образование ОН сжатия происходит по обратной схеме: в рН-слое или приповерхностной области возникающая кристаллическая структура стремится сократить свой удельный объем, а в нижележащих слоях обнаруживается стремление их к расширению из-за появления устойчивой кристаллической структуры с большим удельным объемом. Если установление фазового равновесия происходит с запаздыванием, то процесс релаксации приводит к изменению значений временных напряжений в послеэлектролизном периоде времени по сравнению с тем уровнем, который был зафиксирован в момент выключения тока. После установления устойчивого фазового равновесия временные напряжения переходят в ОН. Пусть в момент выключения тока в покрытии действуют временные напряжения сжатия, а после