

63. Брехаря Г.П., Герту Е.Ю., Немошкаленко В.В. и др. Влияние состава электролита и условий осаждения на аморфизацию хромовых покрытий // Металлофизика и новейшие технологии. 1997. Т. 19. № 9. С. 74–79.
64. Горбунова Л.М., Глазунова В.К. Современное состояние проблемы самопроизвольного роста нитевидных кристаллов на электролитических покрытиях // Защита металлов. 1984. Т. 20. № 3. С. 342–358.
65. Скоров Д.М., Дашковский А.И., Маскалец В.Н., Хижный В.К. Поверхностная энергия твердых металлических фаз. М., 1973.
66. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. М., 1975.
67. Поздняков П.Г. Периодические напряжения как стимулятор роста нитевидных кристаллов // Кристаллография. 1994. Т.39. № 1. С. 141–144.

*Поступила 16.10.2000*

### **Summary**

The hypothesis is expounded that at electrolytic precipitation of metals in the moving surface layer, a highly excited shift-unstable state analogous to the supercooled liquid takes place. Such layer is called PH-layer. General and common mechanism of residual stresses formation in electrolytical coating is offered on the base of this hypothesis.

---

А. В. Семенчук, И. И. Сафронов

## **О ФОРМЕ ЛУНКИ ЕДИНИЧНОГО РАЗРЯДА ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИИ**

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

При исследовании влияния виброударной скорости на параметры электроискрового легирования при прямом [1] и косом [2] ударах электрода о деталь нами установлено, что форма лунок (в плане) единичного разряда соответственно круглая или эллиптическая, распределенная по одно- и двумерному логнормальному закону. В работе [3] уточнено, что данная форма лунок может рассматриваться лишь в первом приближении, в действительности же она имеет "амебообразную" форму. Для оценки отклонения формы лунки от эллиптической нами рекомендовалось использовать коэффициент высших гармоник разложения в ряд Фурье отклонений границ лунки от эквивалентного эллипса. Данный метод является обобщением предложенного в работе [4] отклонения формы лунки от эквивалентного круга при размерной обработке. Недостатками метода являются: 1. отсутствие строгого определения термина "эквивалентный эллипс" и замена его интуитивным представлением; 2. метод предполагает однозначность вдоль каждой центральной оси радиального отклонения формы лунки от эллипса (рис. 1,а), в то время, как в действительности в 20–25% реализаций отклонение формы лунок было многозначным (рис. 1,б), а в 1–2% реализаций форма лунок была даже многосвязной (рис. 2,в), состоящей из нескольких разобщенных областей.

---

© Семенчук А.В., Сафронов И.И., Электронная обработка материалов, 2001, № 5, С. 31–33.

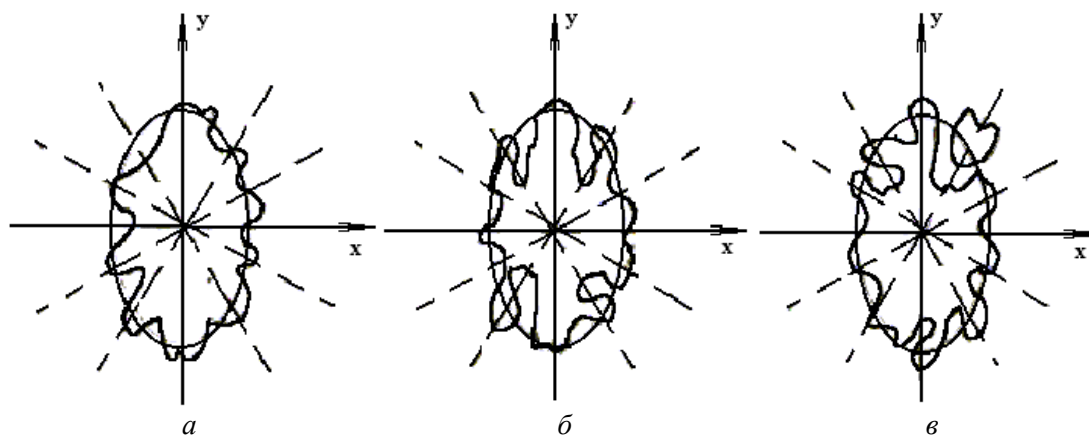


Рис. 1. Формы лунок единичного искрового разряда при легировании:  
*a* – однозначная; *б* – многозначная; *в* – многосвязная.

Определим термин “эквивалентный эллипс” как эллипс с площадью  $S$  и отношением осевых моментов инерции  $J'_x / J'_y$ , равными соответственно площади и отношению моментов исходной фигуры  $J_x / J_y$ . В этом случае его полуоси соответственно равны:

$$a = \sqrt{\frac{S}{\pi} \sqrt{J_y / J_x}}, \quad b = \sqrt{\frac{S}{\pi} \sqrt{J_x / J_y}}. \quad (1)$$

Эллипс, определенный таким образом, обладает уникальным свойством – он имеет минимальный центробежный момент инерции из множества фигур с заданным отношением осевых моментов инерции. Для его доказательства рассмотрим вначале круг. Воспользовавшись методами функционального анализа [5], нетрудно показать, что он имеет минимальный центробежный момент инерции из всех фигур с заданной площадью. Проекцией круга на наклонную площадь является эллипс, откуда и следует минимум центробежного момента инерции для фигур с фиксированным отношением моментов. Данное свойство позволяет ввести новую меру “амебообразности” лунки единичного разряда  $k$ , равную корню четвертой степени из отношения центробежных моментов инерции исходной фигуры  $J_\rho$  и эллипса  $J'_\rho$ :

$$k = \sqrt[4]{J_\rho / J'_\rho - 1}, \quad (2)$$

взамен ранее использовавшегося коэффициента высших гармоник отклонения формы исходной фигуры от эквивалентного эллипса. Преимуществом новой меры является то, что она применима не только к однозначной функции радиального отклонения (рис. 1а), но и к многозначной (рис. 1б), и даже к многосвязной форме лунок (рис. 1в). Для эллиптической формы лунок  $k=0$ . С увеличением “амебообразности” он возрастает.

Сказанное легко может быть обобщено на трехмерное пространство, используемое при анализе формы лунки разряда с учетом ее глубины. “Эквивалентным эллипсоидом” в этом случае является трехосный эллипсоид с объемом и отношением плоскостных моментов инерции, равными объему и отношению моментов исходной фигуры. Полуоси эллипсоида при этом равны:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi} \sqrt{J_{yz}^2 / (J_{zx} \cdot J_{xy})}}, \quad b = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi} \sqrt{J_{zx}^2 / (J_{xy} \cdot J_{yz})}}, \quad c = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi} \sqrt{J_{xy}^2 / (J_{yz} \cdot J_{zx})}}, \quad (3)$$

а коэффициент “амебообразности” – корень четвертой степени из отношения полярного момента инерции относительно центров тяжести моментов инерции исходной фигуры  $K$  моменту эллипсоида.

$$k = \sqrt[4]{J_\rho / J'_\rho - 1}. \quad (4)$$

Законы распределения полуосей формы лунок в плоскости и в пространстве логнормальные соответственно, двух- и трехмерный с сильно коррелированными ( $\rho=0,8-0,9$ ) осями. 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.

При прямом ударе электрода о деталь эллиптическая форма лунок единичного разряда в плане вырождается в круглую, а двухмерный логнормальный закон распределения ее размеров – в одномерный.

Пространственная форма лунки при этом вырождается из трехмерного эллипсоида с произвольными осями в эллипсоид вращения, а закон распределения – из трехмерного логнормального – в двухмерный.

Таким образом, предлагаемая нами новая мера "амебообразности" формы лунки единичного разряда (2) и (4) позволила снять ограничения на однозначность отклонений ее геометрии от эллипса или эллипсоида и расширить использовавшуюся ранее методику практически на любую форму лунок.

Точное вычисление площади и моментов инерции фигур лунок, необходимое для нахождения осей и момента инерции эквивалентного эллипса по формулам (1) и (2) требует сложного ввода информации о их контуре при помощи сканера или координатным методом, необходимого для осуществления численного интегрирования. В большинстве случаев с достаточной степенью точности (погрешность – не более 5%), можно решить данную задачу приближенно, положив отношение моментов инерции равным отношению квадратов средних арифметических значений полуосей эллипсов, описанного вокруг исходной фигуры и вписанного в нее:

$$\frac{J_y}{(a_{оп} + a_{вп})^2} = \frac{J_x}{(b_{оп} + b_{вп})^2}, \quad (5)$$

и площади эквивалентного эллипса, вычисляемой по формуле

$$S = 0,25\pi(a_{оп} + a_{вп})(b_{оп} + b_{вп}). \quad (6)$$

Аналогично, отношение полуосей эквивалентного эллипсоида и может быть определено как отношение квадратов средних арифметических сечений полуосей описанного и вписанного в исходную фигуру эллипсоидов

$$\frac{J_{yz}}{(a_{оп} + a_{вп})^2} = \frac{J_{zx}}{(b_{оп} + b_{вп})^2} = \frac{J_{xy}}{(c_{оп} + c_{вп})^2}, \quad (7)$$

а его объем может быть вычислен по формуле

$$V = 0,167\pi(a_{оп} + a_{вп})(b_{оп} + b_{вп})(c_{оп} + c_{вп}). \quad (8)$$

Данные упрощения значительно сокращают объем работы по вводу информации в компьютер, обеспечивая в то же время достаточную точность для анализа исходной формы лунки единичного разряда.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Семенчук А.В. Влияние виброударной скорости на параметры электроискрового легирования // Прогрессивные методы электрохимической и электрофизической обработки материалов. Уфа, 1979. С. 162–163.
2. 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.
3. Сафронов И.И., Семенчук А.В., Цуркан И.В., Фатеев В.В. Электроэрозионные процессы на электродах и микроструктурно-фазовый состав легированного слоя. Кишинев, 1999.
4. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. М., 1980.
5. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. М., 1989.

Поступила после переработки 15.12.2000

## Summary

It's investigated the form of the hole of the single discharge in the time electric sparkle instalation process. It's showed the methods of the construction of the ellipse, equivalent the form of the hole. It's considered the estimate of the unformed of the hole.