

## **О ТЕРМОРАЗРУШЕНИИ МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОДОВ В ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОМ РЕАКТОРЕ**

Порошковая металлургия занимает важное место в деле ускорения научно-технического прогресса для реализации новейших проектов и программ при производстве авиационной и ракетно-космической техники. Она развивается как в направлении совершенствования существующих технологических решений, так и в направлении разработки процессов получения новых материалов и покрытий, значительно повышающих надежность изделий. Непрерывно происходят процессы расширения номенклатуры изделий и покрытий с особыми функциональными свойствами (таблица.1) – самосмазывающиеся, износостойкие, коррозионно-стойкие, высокопористые проницаемые, высокопрочные.

Важным позитивным фактором, расширяющим перечень достоинств технологии порошковых материалов, является возможность использования относительно дешевых источников сырья для получения порошков. К таким источникам относятся отходы производства: металлургии, металлообработки, недорогие минеральные ресурсы и др.

Основными требованиями, предъявляемыми к свойствам порошков, являются размер частиц, форма частиц, насыпной вес, прессуемость, плотность, изотропность свойств, адгезия с подложкой и т.д. Наиболее востребованная форма частиц – сфера.

Одним из перспективных методов получения порошков с заданными гранулометрическими и дисперсионными свойствами является диспергирование исходных материалов в электроразрядном реакторе [1].

По мнению ряда авторов [2-4], наряду с процессами плавления, испарения и гидродинамического выброса расплавленного металла, подвергающегося электроэрозионной обработке, приводящей к образованию порошков сферической формы, значительный вклад в общую величину эрозии может внести хрупкое разрушение поверхностных слоев металла за счет возникающих в них термических напряжений при мощных кратковременных импульсах тока ( $10^{-5} - 10^{-6}$  с), малых площадях сосредоточенности теплового пятна искрового разряда, что приводит к появлению в диспергированном продукте осколков металла, нарушающих гранулометрический состав получаемых порошков.

В работе исследуется влияние термических напряжений на характер диспергируемых частиц в зависимости от процесса выделения тепла в месте электрического разряда.

Характер термических напряжений существенно зависит от величины плотности тока в пятне разряда. При плотностях тока выше  $10^8$  А/см<sup>2</sup> терморазрушение материалов, подверженных эрозии, обу-

словлено действием объемного разогрева, локализованного в основном в области под разрядным пятном.

Назначение и область применения покрытий  
для авиационной и ракетно-космической техники

| Область применения покрытий               | Назначение покрытий                                                                                          | Материал покрытий                                            |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Авиация                                   |                                                                                                              |                                                              |
| Лопатки газовых турбин, цапфы шасси       | Термостойкость                                                                                               | Al-Ni; Al; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                    |
| Тормозные колодки, барабаны               | Износостойкость                                                                                              | Карбиды Cr-B-Ni, окислы                                      |
| Сочленения и лопатки турбин и компрессора | Эрозионная стойкость                                                                                         | WC+Co; TiC; Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; Al+Ni; Cr+B+Ni  |
| Несущие конструкции крыла, фюзеляжа       | Прочность, жесткость                                                                                         | Композиционные материалы на основе Al; Ti                    |
| Обтекатели радиоантенн                    | Защита от атмосферного воздействия                                                                           | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> и материалы на ее основе      |
| Ракетная техника                          |                                                                                                              |                                                              |
| Головки и сопла ракет                     | Жаростойкость, жаропрочность, эрозионная стойкость                                                           | Оксиды алюминия, циркония, тугоплавкие материалы с пропиткой |
| Сопла ракет                               | Жаростойкость, жаропрочность, эрозионная стойкость                                                           | Слой окиси алюминия + слой Мо (5-6 чередующихся слоев)       |
| Теплоизоляция                             | Терморегулирование                                                                                           | Окиси, карбиды                                               |
| Космическая техника                       |                                                                                                              |                                                              |
| Обтекатели, экраны                        | Жаростойкость, жаропрочность                                                                                 | Вольфрам, окиси                                              |
| Теплоизоляция ракетоносителей             | Жаростойкость                                                                                                | Окись циркония, W, Мо                                        |
| Аппараты для космических исследований     | Жаростойкость, жаропрочность, терморегулирование, износостойкость, триботехнические свойства подвижных узлов | Окислы, карбиды, силициды W, Zr, Мо                          |

При плотностях тока ниже  $10^7 \text{ A/cm}^2$  преобладают поверхностные источники тепла, которые вызывают выброс материала в паровой и жидкой фазах, при охлаждении которых образуются мелкозернистые порошки сферической формы. Модель возникновения термоупругих напряжений за счет джоулевых источников тепла базируется на уравнении теплопроводности [4]

$$c\gamma \frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}(k \text{grad} \theta) + \rho j^2, r > 0, z > 0, \quad (1)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость;  $\gamma$  – плотность;  $k$  – коэффициент теплопроводности;  $\theta(r, z, t)$  – температура;  $\rho$  – удельное электросопротивление;  $j(r, z, t)$  – плотность тока на поверхности пятна.

Для уравнения (1) задаются начальная температура, условие отсутствия теплообмена вне дугового пятна ( $z = 0, r > r_0$ ), а также тепловой поток  $P$  на разрядном пятне ( $z = 0, 0 < r < r_0$ ).

В случае поверхностного источника тепла представляется естественным в качестве модели температурного поля на поверхности электрода использовать сферическую модель  $b = r_0 / \sqrt{2}$ , на которой

$$-k \frac{\partial \theta(b, t)}{\partial r} = P_0 t, \quad (2)$$

где  $P_0$  – скорость нарастания поверхностного теплового потока;  $r_0$  – начальный радиус тепловоспринимающего пятна;  $r$  – текущий радиус токового пятна.

Главные компоненты тензора напряжений определяются из соотношений [4]:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= -\frac{2E\alpha_0}{1-\mu} \frac{1}{r^3} \int_b^r x^2 \theta(x, t) dx; \\ \sigma_{\phi\phi} &= -\frac{\sigma_{rr}}{2} - \frac{E\alpha_0}{1-\mu} \theta(r, t). \end{aligned} \quad (3)$$

Решение задачи для температуры  $\theta(r, t)$  имеет вид

$$\begin{aligned} \theta(r, t) &= \frac{bP_0 t}{k} \frac{\beta}{\alpha} \left\{ \text{erfc}(\alpha - \beta) - 2(\alpha + \beta) i \text{erfc}(\alpha - \beta) + \right. \\ &\quad \left. + 4\beta^2 e^{-(\alpha - \beta)^2} \left[ \eta(\alpha - \beta) - \eta\left(\alpha - \beta + \frac{1}{2\beta}\right) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\alpha = \frac{r}{2\sqrt{at}}$ ;  $\beta = \frac{b}{2\sqrt{at}}$ ;  $r$  – радиус-вектор точки, в которой определяется напряжение;  $\eta(z) = e^{z^2} \operatorname{erfc}(z)$  – функция ошибок;  $a$  – температуропроводность.

Подставляя значение (4) в выражение (3), находим компоненты тензора напряжений. Если  $\sigma_{\text{в}}$  – предел прочности материала электрода, то условие отсутствия его термоупругого разрушения в простейшем случае  $|\sigma_{rr} - \sigma_{\phi\phi}| < \sigma_{\text{в}}$  примет вид [4]:

$$\frac{E\alpha_0}{1-\mu} \frac{P_0 t b}{k} \left| \frac{4\alpha}{\sqrt{\pi}} - 1 - 4\beta^2 \left[ 1 - \eta\left(\frac{1}{2\beta}\right) \right] \right| < \sigma_{\text{в}}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{\text{в}}$  – предел прочности материала электрода;  $E$  – модуль упругости;  $\alpha_0$  – коэффициент температурного расширения материала;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $P_0$  – скорость нарастания поверхностного теплового потока, определяемая из вольт-амперной характеристики разряда;  $t$  – текущее время воздействия теплового потока.

По выражению (5) были рассчитаны максимальные напряжения, возникающие в материале электрода (сталь 20, алюминий) для двух случаев: на фиксированном расстоянии от центра тепловоспринимающего пятна в зависимости от времени воздействия теплового потока (рис. 1) и при фиксированном времени разряда (соответствующем максимальному значению скорости нарастания теплового потока) на различных расстояниях от центра пятна (рис. 2).

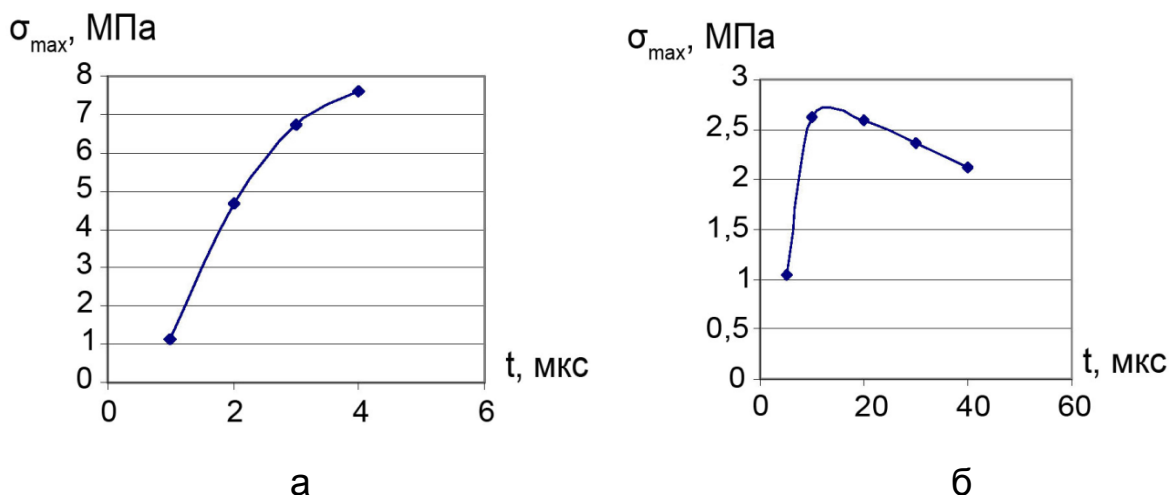


Рисунок 1 – Максимальные напряжения в электроде на расстоянии  $r$  от центра теплового пятна:

а – стальной электрод при  $r = 79 \cdot 10^{-4}$  см; б – алюминиевый электрод при  $r = 30 \cdot 10^{-4}$  см

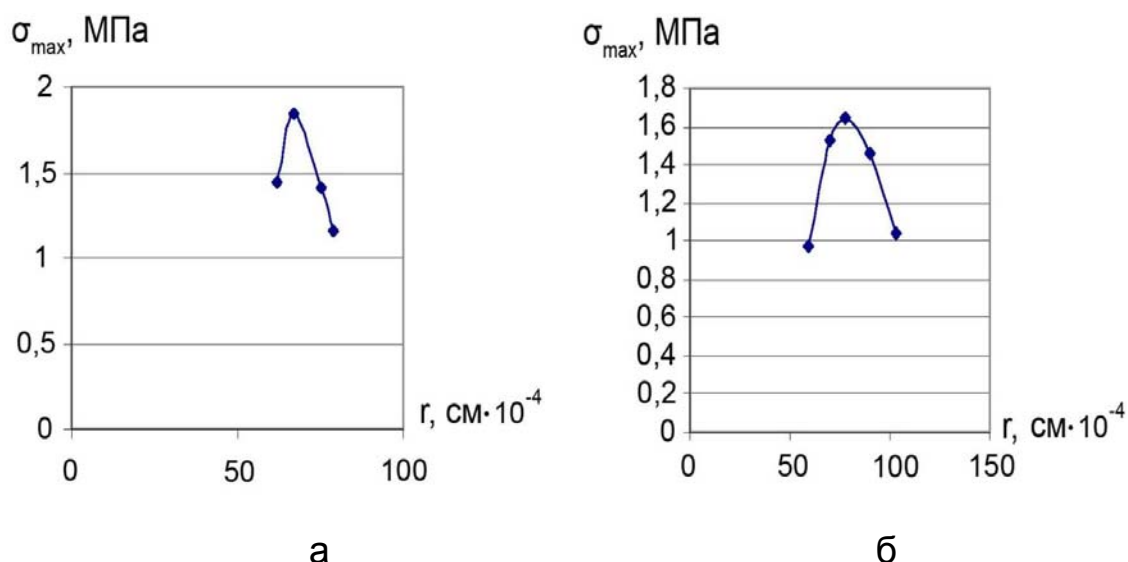
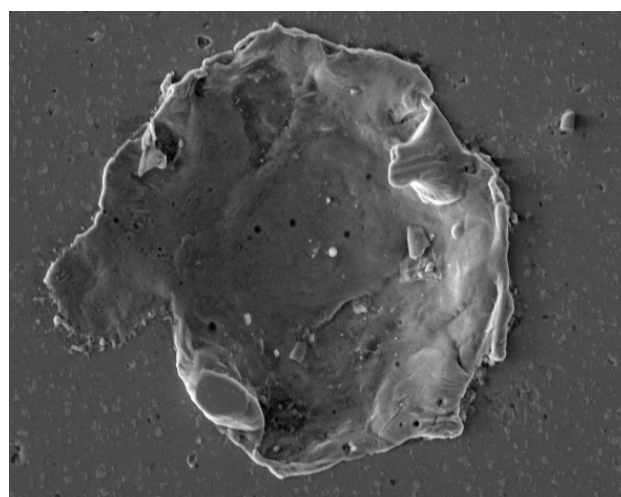
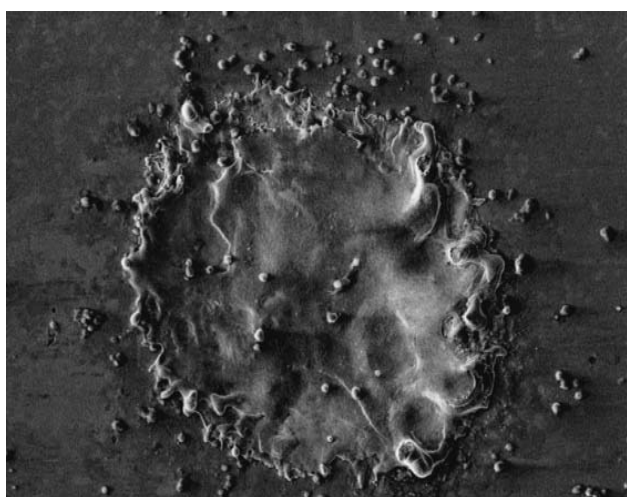


Рисунок 2 – Максимальные напряжения в электродах:  
 а – стальной электрод при  $t_p = 10^{-6}$  с; б – алюминиевый электрод  
 при  $t_p = 5 \cdot 10^{-6}$  с

Как видно из полученных результатов, максимальные термоупругие напряжения по модулю не превосходят предел прочности для стали и алюминия.

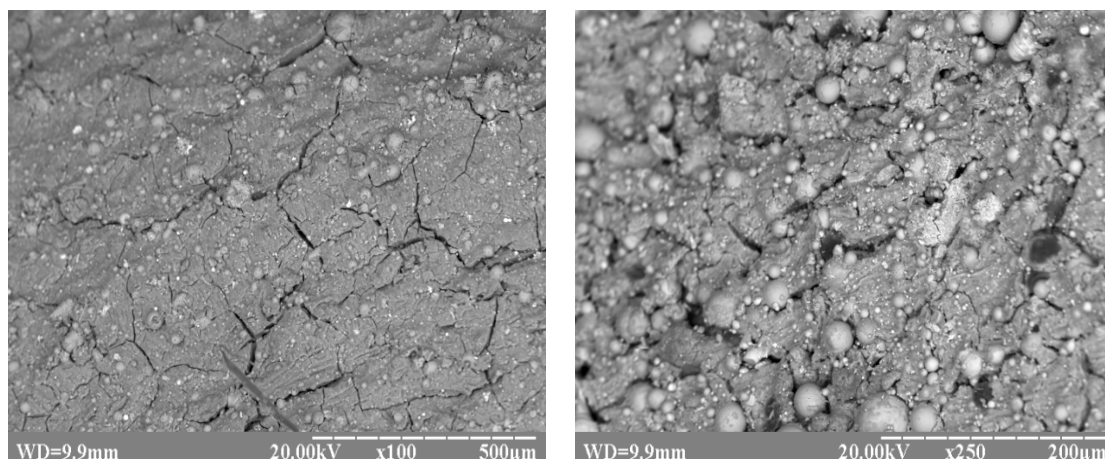
Это соответствует экспериментальным данным: на фотографиях лунок и микролунок (рис. 3), а также полученных порошков (рис. 4), трещин и частиц с отличительными кристаллическими сколами не наблюдается.



а

б

Рисунок 3 – Эрозионная лунка:  
 а – на стальном электроде; б – на алюминиевом электроде



а

б

Рисунок 4 – Внешний вид порошка:  
а – алюминиевого (Д16); б – стального (сталь 20)

Таким образом, хрупкого разрушения поверхностных слоев исследуемых материалов не происходит при данных параметрах импульсного разряда.

В результате проведенных исследований показано, что в электро-разрядном реакторе наблюдается поверхностный механизм передачи тепла, при котором не возникают термические напряжения выше предела прочности.

#### Список использованных источников

1. Кручина, В.В. Диспергирование металла из единичных лунок в электроразрядном реакторе [Текст] / В.В. Кручина // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 5 (56). – Х., 2008. – С. 126 – 132.
2. Золотых, Б.Н. О роли механических факторов в процессе эрозии в импульсном разряде [Текст] / Б.Н. Золотых, И.П. Коробова, Э.М. Стрыгин // Электрические контакты. – М., 1967. – С. 32 – 51.
3. Раховский, В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме [Текст]: моногр. / В.И. Раховский. – М.: Наука, 1970. – 563 с.
4. Ким, Е.И. Модель термоупругого разрушения в процессе импульсной электроэрозионной обработки материалов [Текст] / Е.И. Ким, С.Н. Харин // Электронная обработка материалов. – 1983. – № 2. – С. 5 – 6.

*Поступила в редакцию 13.11.2012.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Е. Тараненко,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*