

А.И. Маринин

**ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
РАЗРЯДА НА ПРОЧНОСТЬ СТЕРЖНЕЙ-ТОКОВОДОВ**

*Национальный университет пищевых технологий,  
ул. Владимирская, 68, г. Киев, 01033, Украина, [a\\_marinin@ukr.net](mailto:a_marinin@ukr.net)*

Проектирование надежности установок связано с прогнозированием показателей прочности технических систем и выявлением качественных и количественных закономерностей в зависимости от характера изменения нагрузки или каких-либо условий.

В настоящей работе рассматривается влияние режима выделения энергии при электроразряде в жидкости на изменение механических напряжений и определения запаса прочности в стержне-токовом электроодной системы электрогидравлической установки (ЭГУ).

Стержень-токовод представляет собой цилиндр [1]. Характер его напряжения определяется динамикой канала электроразряда и следующей за ним парогазовой полости.

Рассмотрим деформирование стержня-токовода давлением плазмы  $P_a(t)$  цилиндрического канала радиуса  $r_k(t)$ . Если принять  $P_a(t)$  распределенным равномерно по всему объему канала [2–4], то напряжение  $\sigma(t)$  в продольно нагружаемом стержне-токовоме оценится по формуле

$$\sigma(t) = \frac{P_a(t) \pi r_k^2(t)}{S_0}, \quad (1)$$

где  $S_0$  – площадь поперечного сечения стержня.

Режим выделения энергии при электроразряде характеризуется величиной ее доли, выделившейся в первый полупериод тока электроразряда  $\xi$ . При этом связь между варьируемыми параметрами ЭГУ и  $\xi$  определена в монографии [3]:

$$\xi^3 = \frac{\pi A l_{II}^2}{U^2 \cdot \sqrt{LC}}, \quad (2)$$

где  $A=0,25 \text{ В}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^2$  – искровая постоянная;  $l_{II}$  – длина межэлектродного промежутка;  $U_0$  – напряжения на обкладках конденсаторных батарей емкости  $C$ ;  $L$  – индуктивность разрядного контура;  $\xi=0,44$  при колебательном режиме выделения энергии.

Режим выделения энергии электровзрыва сказывается на параметрах напряженно-деформированного состояния стержней-тоководов, а значит, и на их ресурсе, и прочности. Из уравнения (2) можно определить  $l_{II}$  – длину разрядного промежутка.

С учетом закона Гука из формулы (1) определим предельно допустимый диаметр стержня-токовода  $D_{np}$ , уменьшение которого приводит к появлению деформаций, превышающих предел пропорциональности  $\epsilon_{np}$ :

$$D_{np} \geq \sqrt{\frac{4P_a(t)r_k^2(t)}{E \cdot \epsilon_{np}}}, \quad (3)$$

где  $E$  – модуль Юнга материала стержня.

В настоящей работе по сравнению [2–4] получено уравнение для определения запаса прочности, что превышает предел пропорциональности.

В первом приближении считаем, что радиус канала  $r_k$  равен острию с радиусом округления  $r_1$  (с учётом нарастания стримера) [5].

Тогда из формулы (1) следует

$$\sigma(t) = P_a(t) \cdot \frac{r_1^2}{R_1^2} = P_a(t) \frac{d_1^2}{D_1^2}, \quad (4)$$

$$\text{где } d_1 = \sqrt{\frac{4F \cdot K}{\pi \sigma_T}}; D_1 = \sqrt{\frac{4F \cdot K}{\pi \cdot \sigma_{-1}}}.$$

Здесь  $K$  – коэффициент запаса прочности;  $F$  – равнодействующая сила;  $\sigma_T$  – предел текучести металла;  $\sigma_{-1}$  – предел усталости;  $D_1$  – диаметр стержня-токовода,  $r_1 = \frac{d_1}{2}$ .

Отношения диаметров

$$\frac{d_1^2}{D_1^2} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_T}. \quad (5)$$

Тогда из (4) имеем

$$\sigma(t) = Pa(t) \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_T}. \quad (6)$$

Допускаемое напряжение  $[\sigma] = \sigma_{\text{пр}} / K$ , где  $\sigma_{\text{пр}}$  – предельное напряжение.

В случае пластических материалов  $[\sigma] = \frac{\sigma_T}{K_T}$ .

В первом приближении можно считать, что

$$\sigma(t) = P_a(t) \cdot \frac{K_{\text{уст}}}{K_T}. \quad (7)$$

Это значит, что для одних режимов ограничивающим условием прочности является предел усталости, а для других – предел текучести.

Запас прочности по текучести [5]

$$K_T = \frac{\sigma_T}{(\sigma_a + \sigma'_{\text{cp}})}, \quad (8)$$

$$\text{где } \sigma'_a = \frac{\sigma_{\text{max}} - (-\sigma_{\text{min}})}{2}; \sigma'_{\text{cp}} = \frac{\sigma_{\text{max}} + (-\sigma_{\text{min}})}{2}.$$

Развитие искрового разряда во времени происходит путем последовательного «прорастания» стримеров в межэлектродном промежутке. Растущий стример, как правило, состоит не из одного, а из многих каналов с многочисленными ответвлениями от них. В процессе роста стримеров возникает основная масса тех газообразных продуктов, из которых в дальнейшем образуется парогазовая «рубашка» канала искрового разряда.

Этапы ступенчатого развития прорастания стримера имеют основные процессы для момента IV–VI этапов.

Амплитуда напряжений и среднее напряжение определяются по этапам развития растущего стримера [6] по формуле (1).

Для IV этапа –  $\sigma_{\text{min}}$ , для VI –  $\sigma_{\text{max}}$ .

Запас прочности по усталости:

$$K_{\text{уст}} = \frac{\sigma_{-1}}{\left( \frac{\sigma'_a}{\varepsilon} + \varphi_{\sigma} \cdot \sigma'_{\text{cp}} \right)}, \quad (9)$$

где  $\varphi_{\sigma} < 1$  – коэффициент уменьшения допускаемого напряжения,  $\varepsilon$  – предел усталости,  $\varepsilon \geq 1$  – при  $D_1 \geq 10$  (табличные данные).

Из сравнения полученных запасов прочности можно определить, что именно опаснее – наступление поломки стержня-токовода или возникновение в нем пластических деформаций в случае появления деформаций, превышающих предел прочности  $\varepsilon_{\text{пр}}$ .

Если  $K_T < K_{\text{уст}}$  – возникновение пластических деформаций, в противном случае – наступление поломки стержня-токовода. Иными словами, режим выделения энергии электровзрыва сказывается

на параметрах напряженно-деформированного состояния строжней-тоководов, а значит, и на их ресурсе прочности.

Таким образом, основным механизмом износа наконечника следует считать термическую эрозию, при которой в результате действия канала разряда некоторый объем материала электрода плавится, а давление плазмы удаляет расплав с поверхности электрода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гулый Г.А., Малюшевский А.П. Электрический разряд в силовых импульсных системах. К.: Наук. думка, 1977. 175 с.
2. Окунь И.З. Исследование электрических характеристик импульсного разряда в жидкости // Журн. техн. физики, 1969. 39. № 5. С. 850–867.
3. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. К.: Наук. думка, 1980. 207 с.
4. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971. 155 с.
5. Кинасошвили Р.С. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1975. 384 с.
6. Юткин Л.Я. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд. 1986. 253 с.

*Поступила 20.06.09*

#### Summary

Dissipation of energy regimes with the electric discharges have been considered. Dissipation of energy effects the deformed-stressed condition of the conducting road, and thus, determines its strength and resources.

---