УДК 621.387.32

МЕХАНИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ НЕУПРАВЛЯЕМОГО РАЗРЯДНИКА-ОБОСТРИТЕЛЯ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Д. С. Маханько, старший научный сотрудник АО «Плазма», Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-7609-9970, e-mail: mahdim@rambler.ru
А. Я. Паюров, старший научный сотрудник АО «Плазма», Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-5632-5945, e-mail: apayurov@mail.ru

Рассматривается задача определения факторов, влияющих на механическую прочность неуправляемых разрядников-обострителей высокого давления, предназначенных для формирования импульсов напряжения амплитудой до 500 кВ с временами нарастания в доли наносекунды. ***Целью работы*** *является определение расчётным путём и методом прямых испытаний прочности конструкции разрядника-обострителя с рабочим давлением до 120 технических атмосфер (кгс/см^2). Установлено, что при изготовлении неуправляемых отпаянных разрядников-обострителей высокого давления в металлокерамическом исполнении серии РО – 48, РО – 43, РО – 49 с оптимальными с точки зрения обеспечения необходимой электрической прочности геометрическими размерами, при изготовлении корпуса из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т с толщиной стенки 2 мм и высоковольтного изолятора конусной формы из алюмооксидной керамики марки ВК94-1 (22ХС) с толщиной стенки 3 мм, они могут наполняться рабочими газами до давления 120 технических атмосфер.*

Ключевые слова: *разрядник-обострительь, механическая прочность, керамический изолятор, рабочие давления, аргонодуговая сварка, металлокерамические спаи.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-181-187

Введение

Важными параметрами разрядника-обострителя, определяющими возможности его применения, являются малые габаритные размеры, время коммутации, коммутируемый ток и рабочее напряжение [1, 2]. Для обеспечения высоких показателей коммутационных характеристик в разрядниках-обострителях в качестве рабочей среды используется водород при давлениях до 120 атмосфер (кгс/см^2). Большие значения давлений предъявляют очень жёсткие требования к механической прочности как отдельных узлов, так и конструкции разрядника в целом. Также необходим корректный подбор используемых электровакуумных материалов, которые обеспечивают высокую механическую прочность и вакуумную плотность спаев «металл – керамика» [3]. Следует отметить, что применение керамических изоляторов накладывает определенные ограничения и на их конструктивное исполнение, в частности в виде усечённого конуса. Кроме этого, конструкция разрядника-обострителя, работающая в наносекундном диапазоне времени, должна учитывать возможность согласования с линиями, формирующими высоковольтные импульсы наносекундной длительности [4].

Расчётная часть

На рисунке 1 представлена конструкция серийно выпускаемого неуправляемого разрядника-обострителя РО-49 на рабочее напряжение до 300 кВ.

Разрядник состоит из трёх основных частей: анодной ножки 1, цилиндрического корпуса 2 (диаметр 70 мм, высота 73 мм, толщина стенки 2 мм) и катодного узла 3. Анодная ножка 1 соединена с корпусом 2 посредством резьбового соединения М65х1,5-7Н и аргонодугового сварного (АДС) шва. Корпус 2 и катодный узел 3 соединены посредством аргонодугового сварного шва.

На заключительном этапе изготовления разрядник-обостритель наполняется водородом до давлений в 120 технических атмосфер. В связи с этим фактором возникает необходимость оценки прочности данной конструкции, которую можно рассматривать как тонкостенную цилиндрическую оболочку, герметизированную по торцам двумя фланцами: ножкой анода 1 и катодным узлом 3.

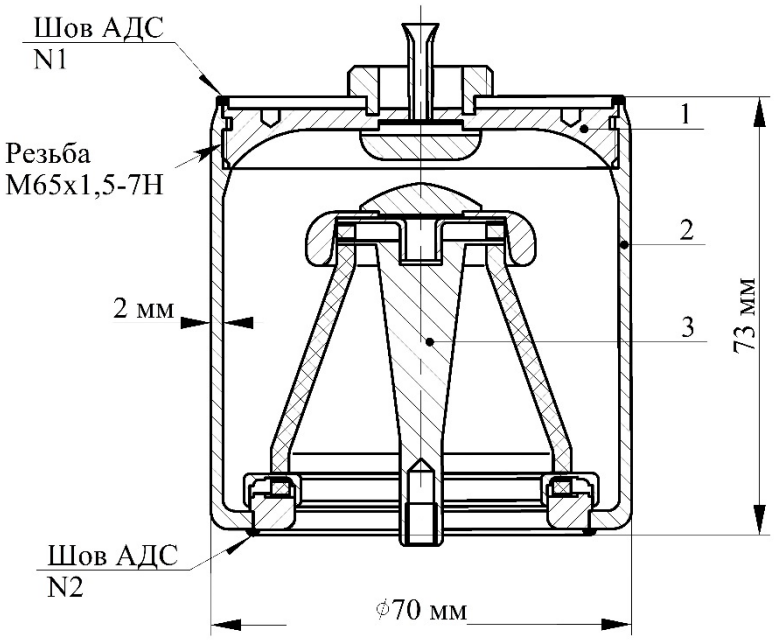

Рисунок 1– Конструкция разрядника-обострителя РО-49
Figure 1 – Spark gap-sharpener RO-49 design

Герметичность корпуса обеспечивается двумя АДС швами. Дополнительным фактором прочности конструкции разрядника служит резьбовое соединение М65х1,5-7Н анодной ножки с корпусом, а также упор катодного узла за счёт превышения диаметра его основания по отношению к диаметру торцевого отверстия корпуса-оболочки.

В сварном шве возникают усилия среза. В предположении их равномерного распределения можно записать [5]:

$$\tau = \frac{Q}{F} \le [\tau_{\text{ср}}],$$

где τ – расчётное касательное напряжение среза, кгс/см^2; Q – усилие среза, кгс; F – площадь поперечного сечения шва, см^2;$[\tau_{\text{ср}}]$ – допустимое касательное напряжение среза, кгс/см^2.

Для материала корпуса (нержавеющая сталь 12Х18Н10Т) можно принять

$$[\tau_{ср}] = 0,6 \cdot [\sigma_{в}] \approx 3120 \text{ кгс/см}^2,$$

где $[\sigma_{в}]$ – допустимое напряжение при растяжении (принимается равным 5200 кгс/см^2).

Усилие среза Q, возникающее под действием внутреннего давления:

$$Q = \text{p} \cdot \pi \cdot R^2,$$

где p – давление внутри разрядника (равное 120 кгс/см^2), R – радиус сечения шва АДС.

Площадь F поперечного сечения шва АДС:

$$F = 2 \cdot t \cdot \pi \cdot R,$$

где t – глубина сварочного шва.

Для шва № 1 (катодный узел – корпус) t_1 = 0,1 см, R_1 = 2,8 см:

$$F_1 = 2 \cdot 0,1 \cdot \pi \cdot 2,8 \approx 1,76 \text{ см}^2.$$

Для шва № 2 (анодная ножка – корпус) t_2 = 0,15см, R_2 = 3,4 см:

$$F_2 = 2 \cdot 0,15 \cdot \pi \cdot 3,4 \approx 3,2 \text{ см}^2.$$

Допустимые усилия среза:

$$Q_{\text{доп1}} = F_1 \cdot [\tau_{\text{ср}}] = 1,76 \cdot 3120 = 5491,2 \text{ кгс},$$

$$Q_{\text{доп2}} = F_2 \cdot [\tau_{\text{ср}}] = 3,2 \cdot 3120 = 9984 \text{ кгс}.$$

Расчётные усилия среза, возникающие под действием внутреннего давления в 120 технических атмосфер, составляют:

$$Q_1 = 120 \cdot \pi \cdot 2,8^2 \approx 2955,6 \text{ кгс},$$

$$Q_2 = 120 \cdot \pi \cdot 3,4^2 \approx 4358 \text{ кгс}.$$

Запас прочности по усилию среза определяется соотношением

$$\frac{Q_{\text{доп}}}{Q} = n.$$

При рабочем давлении в 120 кгс/см^2 получаем:

$$n_1 = \frac{5491,2}{2955,6} = 1,86,$$

$$n_2 = \frac{9984}{4358} = 2,29.$$

Таким образом, расчёт запаса прочности швов АДС № 1 и № 2 показывает, что данная конструкция разрядника-обострителя может эксплуатироваться при внутренних рабочих давлениях до 120 технических атмосфер.

Далее оценим прочность резьбового соединения ножки анода 1 с корпусом 2, служащего дополнительным фактором обеспечения прочности шва АДС. Рассмотрим условие разрушения резьбы – среза её витков. Основными конструктивными параметрами в данном случае являются диаметр резьбы $d = 6,5$ см, шаг резьбы $P = 0,15$ см, длина свинчивания $l = 0,5$ см, соотношение механических характеристик материалов соединения.

Усилие, вызывающее срез витков

$$Q_p = \pi \cdot d \cdot k \cdot l \cdot k_m \cdot [\tau_{\text{ср}}],$$

где k – коэффициент полноты резьбы (для метрической резьбы 0,87); k_m – коэффициент, учитывающий неравномерность деформаций витков по длине свинчивания (принимается 0,6); $[\tau_{\text{ср}}]$ – предел прочности материалов соединения на срез,

$$[\tau_{\text{ср}}] = 0,6 \cdot \sigma_{\text{в}} = 3120 \text{ кгс/см}^2.$$

Расчётное значение усилия среза витков составляет:

$$Q_p = \pi \cdot 6,5 \cdot 0,87 \cdot 0,5 \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot 3120 \approx 9977,2 \text{ кгс}.$$

Под действием внутреннего давления водорода p = 120 кгс/см^2 возникает усилие среза:

$$Q_p^{'} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot p = \pi \cdot (6,5)^2 \cdot 0,25 \cdot 120 \approx 3981,6 \text{ кгс}.$$

Таким образом можно сделать вывод, что резьбовое соединение ножки анода и корпуса обеспечивает механическую прочность оболочки разрядника для давления наполнения в 120 кгс/см^2. Вместе с тем резьбовое соединение следует рассматривать только в качестве дополнительного условия прочности. Вакуумная плотность оболочки при этом давлении наполнения обеспечивается прочностью швов АДС.

Корпус разрядника 2 представляет собой цилиндрическую тонкостенную оболочку постоянной толщины, находящуюся под действием осесимметричных нагрузок из-за наполнения газом высокого давления. Кроме того, данную оболочку следует рассматривать как длинную, пренебрегая взаимным влиянием торцевых закреплений. Тонкостенные оболочки, у которых толщина стенок значительно меньше радиуса поверхности, как правило, относят к длинным. Критерием выбора служит параметр оболочки [6]:

$$\beta \cdot l = \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - \nu^2)}}{\sqrt{a \cdot h}} \cdot l \geq 3,$$

где β – коэффициент деформации срединной поверхности оболочки, мм$^{-1}$; l – длина оболочки, мм; ν – коэффициент Пуассона материала; a – радиус срединной поверхности (делит толщину пополам), мм; h – толщина оболочки, мм.

Для оцениваемой оболочки корпуса коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}3$, длина оболочки $l = 50$ мм, радиус срединной поверхности $a = 34$ мм и толщина оболочки $h = 2$ мм.

$$\frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - 0{,}3^2)}}{\sqrt{34 \cdot 2}} \cdot 50 = \frac{1{,}285}{8{,}25} \cdot 50 \approx 7{,}79 \geq 3.$$

Следовательно, оболочку можно рассматривать как длинную тонкостенную.

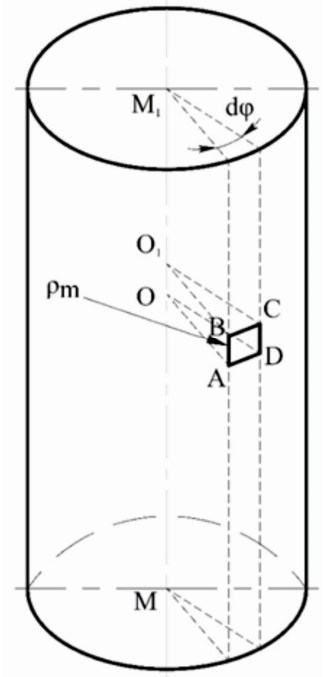

Рисунок 2 - Расчётная схема оболочки корпуса
Figure 2 – Calculating scheme of casing

Рассмотрим бесконечно малый элемент *ABCD* поверхности корпуса, выделенный двумя меридиональными плоскостями M_1BAM и M_1CDM с углом $d\varphi$ между ними и двумя плоскостями, перпендикулярными к оси симметрии MM_1, одна из которых пересекает поверхность оболочки по линии *BC*, а другая – по линии *AD*. Радиус кривизны поверхности элемента *ABCD* в меридиональной плоскости $\rho_m = \infty$, радиус её кривизны в плоскости, перпендикулярной к меридиану, равен радиусу оболочки $a = \rho_\theta$.

Учитывая малую толщину и осевую симметрию оболочки, можно пренебречь изгибом её поверхности и считать напряжения в её стенке равномерно распределёнными.

По боковым граням элементов AB и *CD*, совпадающим с меридиональными плоскостями, в силу симметрии оболочки и нагрузки касательные напряжения равны нулю, по этим граням действуют лишь нормальные напряжения σ_θ (окружные напряжения).

Из закона парности касательных напряжений [7] следует, что касательные напряжения по боковым граням BC и AD также равны нулю, по этим граням действуют лишь нормальные напряжения σ_m (меридиональные напряжения). Кроме напряжений σ_θ и σ_m, на элемент оболочки действует нагрузка в виде давления p, перпендикулярного к поверхности *ABCD*.

Запишем условие равновесия элемента ABCD в виде суммы проекций, приложенных к нему сил на ось v, совпадающую с нормалью к его поверхности:

$$\sum V = p \cdot ds_1 \cdot ds_2 - 2\left(\sigma_\theta \cdot h \cdot ds_2\right) \cdot \sin\left(\frac{d\alpha_1}{2}\right) - 2\left(\sigma_m \cdot h \cdot ds_1\right) \cdot \sin\left(\frac{d\alpha_2}{2}\right) = 0,$$

где h – толщина оболочки.

В этом уравнении величина $\sigma_\theta \cdot h \cdot ds_2$ представляет собой силу, действующую на каждую из боковых граней AB и CD элемента оболочки, а $\sigma_m \cdot h \cdot ds_1$ – на каждую из боковых граней BC и AD. Величина $2\left(\sigma_\theta \cdot h \cdot ds_2\right) \cdot \sin\left(\frac{d\alpha_1}{2}\right)$ равна проекции обеих сил $\sigma_\theta \cdot h \cdot ds_2$, а $2\left(\sigma_m \cdot h \cdot ds_1\right) \cdot \sin\left(\frac{d\alpha_2}{2}\right)$ – проекции обеих сил $\sigma_m \cdot h \cdot ds_1$ на ось *v*.

Вследствие малости углов $\sin\left(\frac{d\alpha_1}{2}\right) = \frac{d\alpha_1}{2} = \frac{ds_1}{2\rho_\theta}$, аналогично $\sin\left(\frac{d\alpha_2}{2}\right) = \frac{d\alpha_2}{2} = \frac{ds_2}{2\rho_m}$.

Тогда уравнение равновесия элемента ABCD преобразуется к виду:

$$\frac{\sigma_\theta}{\rho_\theta} + \frac{\sigma_m}{\rho_m} = \frac{p}{h}.$$

В общем случае для нахождения обеих неизвестных σ_θ и σ_m требуется дополнительное уравнение. Однако для оболочки, имеющей форму цилиндра или конуса, из данного уравнения можно определить σ_θ, так как в этих случаях $\rho_m = \infty$ (образующая оболочки вращения представляет собой прямую линию), а соответственно,

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} = 0 \text{ и } \sigma_\theta = \frac{p \cdot \rho_\theta}{h} = \frac{120 \cdot 3,4}{0,2} = 2040 \text{ кгс/см}^2.$$

Коэффициент запаса $n = \frac{[\sigma_в]}{\sigma_\theta} = \frac{5200}{2040} = 2,55.$

Что касается прочности керамического конусного изолятора, входящего в состав катодного узла и образующего внутреннюю поверхность оболочки разрядника, то он работает на сжатие. Его можно также рассматривать как длинную оболочку и оценить прочность по аналогичной методике. Для алюмооксидной керамики марки ВК94-1 (22ХС) предел прочности на сжатие $[\sigma_в]$ составляет [6] 30 000 кгс/см^2. В наиболее опасном сечении (основание конуса катодной ножки): радиус керамической оболочки – 2,3 см, толщина – 0,25 см, и соответственно, получаем

$$\sigma_\theta = \frac{p \cdot \rho_\theta}{h} = \frac{120 \cdot 2,3}{0,25} = 1104 \text{ кгс/см}^2.$$

Коэффициент запаса по прочности внутренней керамической оболочки:

$$n = \frac{[\sigma_в]}{\sigma_\theta} = \frac{30000}{1104} = 27,2.$$

Таким образом, выполненные расчетные оценки прочности металлокерамической оболочки разрядника-обострителя РО-49 подтверждают возможность его уверенной эксплуатации при давлении наполнения до 120 атм.

Экспериментальная часть

Механическая прочность оболочек разрядников-обострителей определялась путём их заполнения водой под давлением до 200 кгс/см^2. Схема экспериментальной установки для проведения данных испытаний представлена на рисунке 3.

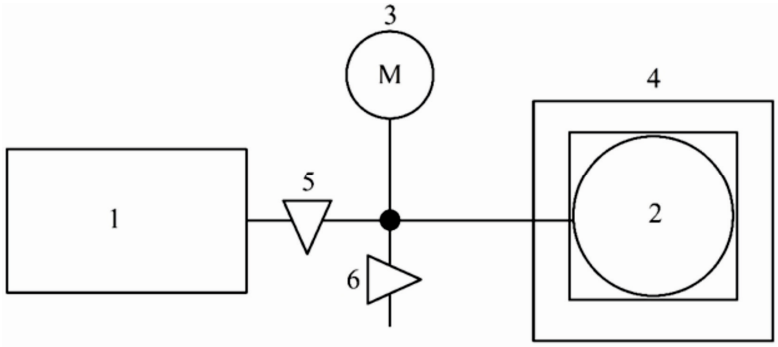

Рисунок 3 – Структурная схема установки для определения механической прочности оболочек разрядников-обострителей
Figure 3 – Structural scheme of the facility to determine mechanical strength of the casing of spark gap-sharpeners

В её состав входят: водяной насос высокого давления (1), испытываемый разрядник-обостритель (2), жидкостный манометр М (3), защитная камера (4) из толстостенного оргстекла и два крана высокого давления (5) и (6). Механическая прочность оболочек разрядников-обострителей проверялась визуально по изменениям формы цилиндрического корпуса или нарушениям спаев «металл – керамика».

Опытные данные показали, что конструкция разрядника-обострителя, рассчитанная на работу при давлении до 120 кгс/см^2, реально выдерживает давление до 200 кгс/см^2.

Заключение

В результате решения дифференциальных уравнений, описывающих механическую прочность оболочки металлокерамического разрядника-обострителя РО-49, были получены следующие результаты:

– цилиндрический корпус диаметром 70 мм и высотой 73 мм из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т с толщиной стенки в 2 мм, соединённый с анодной ножкой резьбовым соединениями аргонодуговой сваркой в верхней части и с катодным узлом посредством АДС в нижней части, позволяет выдерживать напряжения, создаваемые давлением 120 кгс/см^2;

– конусный керамический изолятор из алюмооксидной керамики ВК94-1 (22ХС) с толщиной стенки в 3 мм при использовании компенсированных спаев обеспечивает возможность работы разрядника-обострителя с рабочим давлением до 120 кгс/см^2.

Экспериментальная проверка механической прочности разрядника-обострителя показала, что конструкция разрядника РО-49 в состоянии выдерживать давление до 200 кгс/см^2.

Библиографический список

1. **Месяц Г.А**. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.

2. **Месяц Г.А**. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Советское радио, 1974. 256 с.

3. **Меркулов Б. П., Маханько Д. С., Черепенникова Н. И., Новикова Т. Г.** Способ изготовления газонаполненного разрядника // Патент на изобретение №2550350 H01J 17/02, Рязань, 2013. 15 с.

4. **Сорокин Д. А., Белоплотов Д. В., Гришков А. А. и др.** Высоковольтный наносекундный разряд в неоднородном электрическом поле и его свойства. Томск: STT, 2020. 288 с.

5. **Биргер И. А.** Расчёт на прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.

6. **Скороходов Е. А., Законников В. П., Пакнис А. Б. и др.** Общетехнический справочник, 3-е издание. М.: Машиностроение, 1989. 512 с.

7. **Дарков А. В., Шпиро. Г. С.** Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1975. 655 с.

UDC 621.387.32

MECHANICAL STRENGTH OF UNCONTROLLED HIGH-PRESSURE SPARK GAP - SHARPENER DESIGN

D. S. Makhanko, senior researcher, JSC Plasma, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-7609-9970, e-mail: mahdim@rambler.ru
A. Ya. Payurov, senior researcher, JSC Plasma, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0001-5632-5945, e-mail: apayurov@mail.ru

The problem of determining the factors affecting mechanical strength of uncontrolled high-pressure spark gap-sharpeners designed to generate voltage pulses with an amplitude of up to 500 kV with rise times of a fraction of a nanosecond is considered. ***The aim of the work is*** *to determine by calculation and by direct testing the structural strength of a spark gap-sharpener with working pressure of up to 120 technical atmospheres (kgs/cm^2). It was found that when preparing uncontrolled sealed-off high-pressure spark gap-sharpeners in metal-ceramic versions of RO – 48, RO – 43, RO – 49 series with optimal geometric dimensions, from the viewpoint of ensuring necessary electrical strength, when manufacturing a 12H18N10T stainless steel case with wall thickness of 2 mm and high–voltage cone-shaped insulator made of aluminum oxide ceramics of VK94-1 (22HS) type with wall thickness of 3 mm, they can be filled with working gases up to the pressure of 120 technical atmospheres.*

Key words: *spark gap-sharpener, mechanical strength, ceramic insulator, operating pressures, argon arc welding, metal-ceramic soldered joint.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-181-197

References

1. **Mesjac G. A.** *Impul'snaja jenergetika i jelektronika.* (Pulse energy and electronics). Moscow: Nauka. 2004. 704 p. (in Russian).

2. **Mesjac G. A.** *Generirovanie moshhnyh nanosekundnyh impul'sov.* (Generating powerful nanosecond pulses). Moscow: Sovetskoe radio. 1974, 256 p. (in Russian).

3. **Merkulov B. P., Mahan'ko D. S., Cherepennikova N. I., Novikova T. G.** *Sposob izgotovlenija gazonapolnennogo razrjadnika.* (Method of manufacturing a gas-filled spark gap). Patent na izobretenie no. 2550350 H01J 17/02, Rjazan', 2013, 15 p. (in Russian).

4. **Sorokin D. A., Beloplotov D. V., Grishkov A. A. et al.** *Vysokovol'tnyj nanosekundnyj razrjad v neodnorodnom jelektricheskom pole i ego svojstva.* (High-voltage nanosecond discharge in inhomogeneous field and its properties). Tomsk: STT. 2020, 288 p. (in Russian).

5. **Birger I. A.** *Raschjot na prochnost' detalej mashin*. (Calculation of the strength of machine parts). Moscow: Mashinostroenie. 1993, 640 p. (in Russian).

6. **Skorohodov E. A., Zakonnikov V. P., Paknis A. B. et al.** *Obshhetehnicheskij spravochnik, 3-e izdanie*. (Common technical guide, third edition). Moscow: Mashinostroenie, 1989, 512 p. (in Russian).

7. **Darkov A. V., Shpiro G. S.** *Soprotivlenie materialov*. (Strength of materials). Moscow: Vysshaja shkola, 1975, 655 p. (in Russian).