

**О НЕКОТОРОЙ АНАЛОГИИ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ
НЕПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЗРЫВЕ ВВ И
ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРОБОЕ**

И. И. КАЛЯЦКИЙ, В. В. КРИВКО

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института
высоких напряжений)

Успехи, достигнутые в области электрического разряда в диэлектриках, в последнее время позволили использовать разряд в ряде отраслей промышленности (электроискровая обработка металла, обработка и разрушение твердых непроводящих материалов ударной волной при электрическом разряде в жидкости и др.).

Простота получения больших мощностей в канале электрического разряда и возможность управления и регулирования величиной энергии и скорости ее выделения позволяют предполагать перспективность более широкого применения электрического разряда в народном хозяйстве.

С этой точки зрения представляет научный и практический интерес установление общих закономерностей разрушения твердых тел при импульсном электрическом разряде и энергии взрывающегося вещества.

Как показано в работе [12], импульсный электрический разряд по скорости выделения энергии и виду механического разрушения подобен микровзрыву ВВ (взрывчатого вещества).

При взрыве ВВ так же, как и при электрическом пробое, в твердом теле распространяется упругая волна в виде однократного импульса.

Условия распространения и затухания упругой волны, возникающей при взрыве ВВ, и последствия ее воздействия зависят:

- 1) от формы, размеров и свойств разрушаемого твердого тела;
- 2) от формы, размеров и свойств материала ВВ (удельное энергосодержание и скорость детонации).

При электрическом пробое условия распространения и затухания упругой волны и последствия ее воздействия также зависят:

- 1) от формы, размеров и свойств разрушаемого твердого тела;
- 2) от условий электрического пробоя образующегося канала разряда, его параметров (удельное энергосодержание и скорость выделения энергии в канале).

Таким образом, имеется внешняя аналогия между взрывом ВВ и импульсным электрическим пробоем. Эта аналогия касается как условий распространения разрушающей ударной волны, так и последствий от ее воздействия. В обоих случаях возникновение ударной волны в твердом разрушаемом теле связано с наличием весьма высоких давлений ($3 \cdot 10^5$ — $5 \cdot 10^5$ кг/см²) и температур (до 10^4 — $4 \cdot 10^5$) [1—11], сосредоточенных в малом (по отношению ко всему объему разрушаемого материала) объеме. В том и в другом случае определяющими параметрами являются удельное энергосодержание и скорость освобождения энергии.

Сопоставляя разрушение твердых тел при взрыве ВВ и электрическом пробое, следует иметь в виду различие физических процессов при этом.

При взрыве ВВ происходит реакция термического разложения ВВ, кинетика которой характеризуется мощностью заряда ВВ, плотностью энергии и прочими характеристиками [3], сопоставимыми с характеристиками выделения энергии при пробое [1]. Реакция термического разложения протекает при участии фотоионизации и возбуждения атомов тела ультрафиолетовым излучением из области взрыва [7]. В случае импульсного электрического пробоя энергия выделяется из конденсатора в разрядном контуре.

Удельное энергосодержание ВВ (энергия в единице веса или объема ВВ) и скорость детонации определяются его химическим составом и структурой. Удельное энергосодержание канала разряда при пробое и скорость выделения энергии определяются запасом энергии в контуре и условиями ее подвода к каналу. Удельное энергосодержание ВВ составляет $0,9 \cdot 10^3$ дж/см³ [11]. В канале импульсного разряда удельное энергосодержание может достигать $6 \cdot 10^2$ — $6 \cdot 10^3$ дж/см³.

Гипотезы, объясняющие разрушение твердых тел при взрыве ВВ, исходят из следующих положений [9]:

1. Разрушение тела взрывом происходит за счет давления газообразных продуктов разложения ВВ. Давление, а следовательно, и разрушение направлены от заряда к поверхности тела.

2. Разрушение тел при взрыве происходит вследствие волн напряжения, возникающих при импульсном воздействии газообразных продуктов. При этом волны распространяются от заряда во все стороны, образуя сложную картину распределения напряжений сжатия и растяжения в объеме тела, определяемую интерференцией падающих и отраженных от поверхности тела волн.

3. Разрушение происходит как под действием волн напряжения, так и за счет давления газообразных продуктов детонации.

При импульсном электрическом пробое твердых тел ограниченных размеров волны напряжения сжатия распространяются от канала пробоя к свободной поверхности тела и отражаются от нее [1]. Разрушение материала может происходить как под действием волн сжатия, так и волн растяжения. При этом на условие отражения волн от свободной поверхности оказывают влияние форма и размеры разрушаемого тела.

Возникновение волн напряжения от газообразных продуктов при импульсном разряде маловероятно.

При подземном взрыве ВВ условно различают [10] три зоны взрыва: ближняя зона, средняя и дальняя.

Размеры их в основном определяются весом заряда и типом породы. В ближайшей зоне еще выделяют две области: область сжатия и область разрушения. В области сжатия существует ударная волна с разрывным фронтом. Порода из-за огромных нагрузок дробится и уплотняется. Граница ее при взрыве тротильных зарядов определяется по эмпирической формуле

$$R_c = 19 K_c,$$

где R_c — относительный радиус области сжатия;

K_c — эмпирический коэффициент, зависящий от типа породы.

Область разрушения характеризуется нарушением сплошности породы и появлением трещин и определяется как

$$R_p = 19 K_p,$$

где R_p — относительный радиус сферы разрушения;

K_p — эмпирический коэффициент.

Средняя зона подземного взрыва, где происходят упруго-пластические деформации породы, простирается примерно до расстояния около $100 R_{03}$ (R_{03} — радиус заряда), и дальняя зона взрыва условно ограничивается диапазоном расстояний от 100 до $1000 R_{03}$.

Измельчение и дробление материала при взрыве ВВ, имеющие место в непосредственной близости от заряда, обуславливаются фронтом полного импульса взрыва и происходят при малом расширении продуктов детонации. Это так называемое бризантное действие взрыва. Большая часть полной работы взрыва, определяемая прохождением всего импульса, идет на разрушение и отбрасывание материала и составляет общее или фугасное действие взрыва [10]. Величина бризантных форм работы взрыва представляет небольшую часть полной работы и сильно зависит от скорости детонации ВВ. Величина фугасной формы работы взрыва определяется полной энергией взрыва за вычетом потерь и не зависит от скорости детонации.

В условиях импульсного электрического пробоя твердых тел также можно выделить две формы работы ударной волны, возникающей в канале разряда. Аналогично, как и при взрыве ВВ, измельчение и дробление материала при импульсном электрическом пробое происходят в непосредственной близости от канала разряда. Бризантность действия разряда определяется скоростью выделения энергии в канале разряда и с увеличением скорости возрастает. Величина полного разрушения тела определяется количеством энергии, выделяющейся в канале разряда за первый полупериод колебания тока после пробоя.

При взрыве ВВ, помимо механического разрушения твердого тела волнами напряжения, возможно также термическое разрушение некоторого объема тела за счет высоких температур и значительного количества тепла, выделяющегося при взрыве.

Термическое разрушение твердого тела (плавление, испарение) под действием высоких температур имеет место в малых объемах и при электрическом пробое твердых диэлектриков. При этом энергия, расходуемая на плавление стенок канала разряда, может составлять до 10% всей энергии, выделяющейся в канале [2].

Таким образом, вследствие некоторой аналогии разрушения твердых тел при взрыве ВВ и импульсном электрическом пробое, во-первых, принципиально возможно в отдельных случаях эффективное использование импульсного электрического разряда вместо ВВ с рядом преимуществ (отсутствие опасности хранения и транспортировки ВВ, простое получение энергии в контуре, управляемость процесса и т. д.); во-вторых, имеется возможность рассчитать взрывное действие импульсного электрического разряда, используя формулы гидродинамики для взрыва ВВ; в-третьих, при разрушении твердых тел импульсными электрическими разрядами имеется большая, по сравнению с использованием ВВ, возможность регулирования скорости выделения энергии в канале разряда и ее общего количества, а также возможность осуществлять направленное разрушение, используя условия избирательной направленности пути электрического разряда в диэлектрической среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Воробьев, Е. К. Завадовская. Электрическая прочность твердых диэлектриков. ГИТТЛ, 1956.
2. В. И. Обухов, А. И. Лисицын, ИФЖ, 1, 1963.
3. С. И. Андреев, М. П. Ванюков. ЖТФ, 31, в. 8, 1961; 32, в. 6, 1962.
4. Ю. В. Скворцов, В. С. Комельков, Н. М. Кузнецов. ЖТФ, 30, 10, 1959.
5. Н. А. Рой, Д. П. Фролов. Звукообразование при искровых разрядах в воде. Отчет 1, М., 1957.

6. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. ГЭИ, 1957.
 7. Ф. И. Боуден, А. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых породах и жидких телах. ИЛ., 1955.
 8. Г. И. Покровский. Физические основы взрывного дела. Знание. 1956.
 9. О. Е. Власов. Основы теории взрыва, Изд. ВИА, 1957.
 10. Ю. С. Яковлев. Гидродинамика взрыва. Судпромгиз, 1961.
 11. В. А. Асонов. Взрывные работы. Углетехиздат, 1958.
 12. И. И. Каляцкий, А. Г. Синебрюхова. Изв. вузов—Энергетика, 3, 1963.
-

C_0 — частичная емкость одного транспортера относительно статора,

U_B — напряжение возбуждения.

Транспортеры были взяты с круглым сечением потому, что такая форма электрода является наиболее эффективной при перемещении зарядов в области высокого градиента [5].

Величину коэффициента перезарядки можно определить по формуле [6]

$$K_i = \sqrt{1 + 4 \frac{C_1}{C_0}}, \quad (2)$$

где C_1 — частичная емкость между соседними транспортерами.

Зависимости частичных емкостей C_0 и C_1 были определены с помощью моделирования в электролитической ванне. В результате обработки опытных данных получены эмпирические зависимости для указанных величин при однорядном расположении транспортеров-проводников:

$$C_0 = \frac{4,3 E l a}{D_{\text{пр}}}, \quad (3)$$

$$\frac{C_1}{C_0} = \frac{1}{3} \left(\frac{D_{\text{пр}}}{2r} - 1 \right) \left(\operatorname{sc} \frac{\pi r}{a} - 1 \right)^{0,8}, \quad (4)$$

где E — диэлектрическая проницаемость смолы,

l — длина транспортера,

a — расстояние между осями транспортеров,

r — радиус транспортера.

$$D_{\text{пр}} = d_{\text{см}} + 2r + E d_{\text{воз}},$$

$d_{\text{см}}$ — толщина диэлектрика,

$d_{\text{воз}}$ — воздушный зазор.

С учетом зависимостей (3) и (4) уравнение (1) можно записать:

$$I_{\text{кз}} = U_B \cdot n \cdot 2 \cdot m \frac{4,3 E l a}{D_{\text{пр}}} \sqrt{1 + 4 \left[\frac{1}{3} \left(\frac{D_{\text{пр}}}{2r} - 1 \right) \left(\operatorname{sc} \frac{\pi r}{a} - 1 \right)^{0,8} \right]}$$

или

$$I_{\text{кз}} = \frac{8,6 U_B n m E l a}{d_{\text{см}} + 2r + E d_{\text{воз}}} \sqrt{1 + \frac{4}{3} \left(\frac{d_{\text{см}} + 2r + E d_{\text{воз}}}{2r} - 1 \right) \left(\operatorname{sc} \frac{\pi r}{a} - 1 \right)^{0,8}}. \quad (5)$$

При изменении радиуса транспортера r , оставляя U_B , n , a , l , $d_{\text{см}}$, $d_{\text{воз}} = \text{const}$, видно, что $I_{\text{кз}}$ будет возрастать с уменьшением радиуса r и увеличением количества транспортеров m . Поэтому для получения максимального тока короткого замыкания в генераторе с неизменным радиусом диска ротора необходимо увеличивать число транспортеров-проводников и уменьшать их радиус. Однако уменьшение радиуса транспортеров связано с трудностью изготовления.

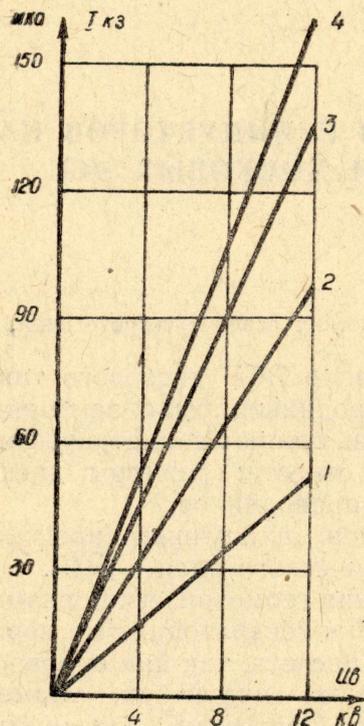


Рис. 1. График зависимости $I_{\text{кз}} = f(U_B)$ роторов с различным числом транспортеров: 1 — для ротора с $m = 27$, 2 — для ротора с $m = 45$, 3 — для ротора с $m = 54$, 4 — для ротора с $m = 74$.