

УДК 537.529+531.2

## МАКСИМАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ В КАНАЛЕ НАНОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА С АНОДА В КРИСТАЛЛЕ KCl

В. Д. Соловей, В. Л. Колмогоров, Ю. Н. Вершинин\*

Институт машиноведения УрО РАН, 620219 Екатеринбург

\* Институт электрофизики УрО РАН, 620016 Екатеринбург

На основе экспериментальных данных по разрушению кристалла KCl при импульсном разряде с анода с использованием известной прочности этого кристалла и решения соответствующей статической краевой задачи анизотропной теории упругости выполнена оценка давления в канале пробоя кристалла KCl на его начальной стадии.

**Введение.** Знание величины давления в канале импульсного пробоя твердых диэлектриков необходимо для понимания проходящих в канале физических процессов и решения прикладных задач (например, электроимпульсного разрушения твердых диэлектрических сред). В настоящее время хорошо изучены закономерности изменения давления на завершающей стадии процесса (стадии расширения канала), когда канал пробоя замыкает разрядный промежуток и вводимая в канал энергия определяется параметрами электрической цепи [1]. Обычно полагалось, что максимальное давление в канале пробоя достигается именно на стадии расширения канала. При этом давлением в канале на начальной стадии пробоя (стадии распространения канала), длящейся с момента возникновения канала до момента замыкания каналом разрядного промежутка, пренебрегалось, поскольку энергия, вводимая в канал на этой стадии, значительно меньше энергии, вводимой на стадии расширения канала.

В то же время известно, что для начальной стадии разряда с анода характерны сверхзвуковая скорость распространения канала пробоя и существенное различие значений термодинамических параметров плазмы в головной части канала разряда и вне ее. Отсюда следует, что импульсный разряд с анода можно рассматривать как разновидность детонации (согласно [2] детонация — это возникновение и существование стационарного комплекса ударная волна — зона энерговыделения), а именно как электронную детонацию [3]. Для процессов детонации, в свою очередь, термодинамические параметры вещества (в том числе давление) максимальны в зоне энерговыделения за фронтом ударной волны и зависят от ее скорости.

Согласно количественной оценке, основанной на модели электронной детонации, давление в зоне энерговыделения на начальной стадии пробоя значительно превышает давление на завершающей стадии пробоя [3].

Целью настоящей работы является оценка максимального давления в канале на начальной стадии разряда с анода с помощью метода, не связанного с рассмотрением физических явлений в канале пробоя.

**Эксперимент.** На рис. 1 показан цилиндрический монокристаллический образец из KCl после его пробоя наносекундным импульсным разрядом с анода. Диаметр образца

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 01-01-00581).




---

Рис. 1. Монокристаллический образец из KCl после воздействия импульсного разряда с анода напряжением 220 кВ

---

$2b = 5 \cdot 10^{-2}$  м, высота  $5,4 \cdot 10^{-2}$  м. Заостренные электроды располагались выше образца (катод) и ниже его (анод). Чтобы исключить или свести к минимуму влияние завершающей стадии пробоя, генератором “Радан” формировались наносекундные импульсы высокого напряжения с амплитудой  $U = 220$  кВ, длительностью  $3 \cdot 10^{-9}$  с и энергосодержанием  $W \approx 1$  Дж. Канал разряда формировался вдоль оси образца в кристаллографическом направлении  $\langle 100 \rangle$ . При этом длина канала завершеного пробоя близка к длине канала незавершеного пробоя. В окрестности канала в плоскости осевого сечения образца, совпадающей с кристаллографической плоскостью  $\{100\}$ , образовались раскрытые трещины. В области надежной регистрации измерялись диаметр канала пробоя со стороны анода ( $2a = 4 \cdot 10^{-5}$  м), а также расстояния от вершин двух самых длинных трещин, расположенных вблизи нижней торцевой поверхности образца, до оси канала пробоя ( $d_1 = 4,44 \cdot 10^{-3}$  м,  $d_2 = 2,22 \cdot 10^{-3}$  м). Центры трещин находятся на расстояниях от этой поверхности  $5,3 \cdot 10^{-3}$ ;  $9,0 \cdot 10^{-3}$  м соответственно.

Отметим, что в данных условиях время воздействия давления, создаваемого в зоне энерговыделения, на стенки канала составляет доли наносекунды. Следовательно, можно считать, что диэлектрик в процессе разряда упруго деформируется и хрупко разрушается [4, 5].

**Поле напряжений в кристаллическом образце.** Воздействие электрического импульса на диэлектрик вызывает в нем волны упругой деформации, т. е. приводит к нестационарной деформации диэлектрика. Тем не менее в данной работе деформация кристалла KCl рассматривается как стационарная. Расчеты, основанные на допущении стационарности деформации, очевидно занижают истинную величину давления в канале импульсного пробоя, поэтому полученные результаты приближенных вычислений дают нижнюю оценку давления.

Предполагается также, что в поперечном сечении образца реализуется плоское напряженное состояние (рис. 2). Координатные линии декартовой прямоугольной системы координат  $(x, y)$  направлены вдоль кристаллографических осей  $\langle 100 \rangle$  кубического кристалла KCl. Распределение напряжений в кристалле находится из решения второй основной задачи анизотропной теории упругости для кольца, нагруженного по внутреннему контуру равномерно распределенными нормальными усилиями. Считая кристалл KCl слабоанизотропным, используем известное решение задачи [6]. Единственная необходимая для расчетов компонента тензора напряжений  $\sigma_{\varphi\varphi}$  из этого решения в полярных координатах  $r, \varphi$

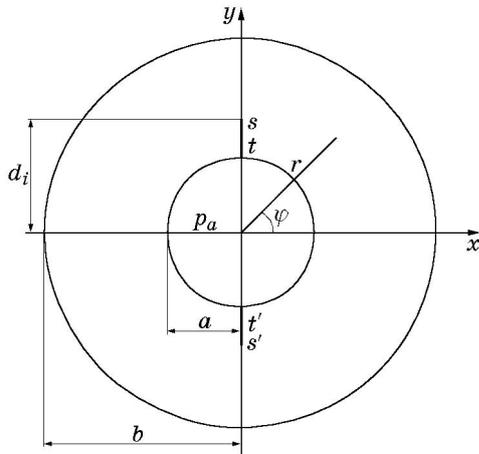


Рис. 2. Схема поперечного сечения кристаллического образца из KCl:  $st, s't'$  — следы трещин;  $s, s'$  — вершины трещин

(рис. 2) имеет вид

$$\sigma_{\varphi\varphi} = p_a k [1 + \bar{r}^{-2} - \lambda(3A\bar{r}^4 + B\bar{r}^2 + C\bar{r}^{-4} + D\bar{r}^{-6}) \cos 4\varphi], \quad (1)$$

где  $k = c^2/(1 - c^2)$ ;  $A = 5(1 + c^2)/(2\delta)$ ;  $B = -3(1 + 4c^2 + 3c^4)/(2\delta)$ ;  $C = -3c^2(1 + c^2) \times (1 + 5c^2 + c^4)/(2\delta)$ ;  $D = 5c^4(1 + 4c^2 + c^4)/(2\delta)$ ;  $\delta = 1 + 4c^2 + 10c^4 + 4c^6 + c^8$ ;  $c = a/b$ ;  $\bar{r} = r/b$ ;  $\lambda = (\sqrt{|\alpha_1|} - 1)(\sqrt{|\alpha_2|} - 1)$ ;  $\alpha_1 = (-k_1 + \sqrt{k_1^2 - k_2^2})/k_2$ ;  $\alpha_2 = (-k_1 - \sqrt{k_1^2 - k_2^2})/k_2$ ;  $k_1 = c_{11}^2 - c_{12}^2 - 2c_{12}c_{44}$ ;  $k_2 = 2c_{11}c_{44}$ ;  $p_a$  — давление на внутренней окружности кольца;  $b, a$  — радиусы внешней и внутренней окружностей кольца соответственно;  $\lambda$  — малый параметр анизотропии материала образца ( $|\lambda| < 1$ ), для которого  $k_1 > 0$  и  $k_1 > k_2$  (например, для KCl);  $c_{11}, c_{12}, c_{44}$  — модули упругости для материала с кубической симметрией упругих свойств.

Для исследуемого кристалла  $c_{11} = 3,980 \cdot 10^{10}$  Па,  $c_{12} = 0,620 \cdot 10^{10}$  Па,  $c_{44} = 0,625 \times 10^{10}$  Па,  $\lambda = -0,811$  [7].

**Оценка давления в канале электроимпульсного пробоя.** Давление в канале пробоя  $p_a$  находится из соотношения (1), если в него подставить известное в какой-либо точке напряжение  $\sigma_{\varphi\varphi}$  и координаты этой точки. Такими точками  $s, s'$  являются вершины двух трещин (рис. 2), координаты которых равны  $r_s = d_i, \varphi_s = \pi/2, i = 1, 2$  ( $d_1, d_2$  измерены в эксперименте).

Определим напряжение в вершинах трещин  $\sigma_{\varphi\varphi}^s$ , предполагая, что в указанных точках выполняется критерий разрушения теории разрушения кристаллов, основанный на законе нормального напряжения [8]:

$$\sigma_{\varphi\varphi}^s = \sigma_{\max}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\max}$  — предельное нормальное напряжение (прочность на разрыв) для кристаллографической плоскости  $\{100\}$ , не зависящее от вида напряженного состояния.

Значение прочности кристалла KCl на разрыв для одноосного растяжения без стеснения в направлении  $\langle 100 \rangle$  найдено в работе [8]:  $\sigma_{\max} = 5$  МПа. Это значение можно использовать в (2), если теоретическая прочность при растяжении в случае стесненной деформации больше, чем в отсутствие ее. (Известно [9], что для всех рассмотренных кристаллографических ориентаций кристалла NaCl это условие выполняется.) В этом случае использование в расчетах значения  $\sigma_{\max} = 5$  МПа должно привести к занижению давления в канале пробоя, что согласуется с полученной нижней оценкой.

Из соотношения (1), используя экспериментальные значения  $a, b, d_i$  ( $i = 1, 2$ ), а также указанные выше значения  $\lambda$  и  $\sigma_{\varphi\varphi}^s$ , находим приближенные значения давления  $p'_a \approx 23,97 \times 10^{10}$  Па,  $p''_a \approx 6,114 \cdot 10^{10}$  Па для  $i = 1, i = 2$  соответственно.

Отметим, что расчеты, выполненные без учета анизотропии упругих свойств кристалла КСl ( $\lambda = 0$ ), дают значения  $p'_a \approx 23,89 \cdot 10^{10}$  Па,  $p''_a \approx 6,112 \cdot 10^{10}$  Па. Видно, что анизотропия упругих свойств кристалла КСl слабо влияет на нижнюю оценку давления в канале пробоя.

Сравним полученные оценки давления в канале пробоя на начальной стадии разряда с анода с давлением в электронно-детонационной волне в зоне энерговыделения до его понижения волной разгрузки. Экспериментально найдено, что импульс напряжением  $U = 220$  кВ вызывает в кристалле КСl косую электронно-детонационную волну, движущуюся со скоростью, приближенно равной  $2,2 \cdot 10^4$  м/с (см. [3, рис. 7.8]). Согласно известным соотношениям этой скорости волны соответствует давление примерно  $3 \cdot 10^{11}$  Па, которое по порядку величины совпадает с приведенными выше оценками. Такие же по порядку величины давления в головной части канала пробоя КСl на стадии его развития получены теоретически в электронно-детонационном приближении и приближении плотной неидеальной плазмы:  $p_a \approx 18 \cdot 10^{10}$ ;  $11 \cdot 10^{10}$  Па соответственно [10].

**Выводы.** На основе экспериментальных данных по разрушению монокристаллического образца КСl с использованием методов анизотропной теории упругости выполнена статическая оценка максимального давления в канале пробоя кристалла на начальной стадии пробоя при импульсном разряде с анода. Упругая анизотропия кристалла КСl является слабой, и ее влияние на оценку давления в канале пробоя незначительно. Найденная таким образом оценка давления в канале пробоя исследованного кристалла по порядку величины согласуется с данными, полученными другими методами, и является их нижней оценкой. Для более точной оценки давления в канале пробоя необходимо использовать методы нестационарной теории упругости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Семкин Б. В., Усов А. Ф., Курец В. И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. СПб.: Наука. С-Петербург. отд-ние, 1995.
2. Прохоров А. М., Конов В. И., Урсу И., Михэнлеску И. Н. Взаимодействие лазерного излучения с металлами. М.: Наука; Бухарест: Изд-во Академии, 1988.
3. Вершинин Ю. Н. Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2000.
4. Степанов А. В. Основы практической прочности кристаллов. М.: Наука, 1974.
5. Финкель В. М. Физика разрушения. М.: Металлургия, 1970.
6. Лехницкий С. Г. Анизотропные пластинки. М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1947.
7. Хантингтон Г. Упругие постоянные кристаллов // Успехи физ. наук. 1961. Т. 74, вып. 3. С. 461–514.
8. Шмид Е., Боас В. Пластичность кристаллов, в особенности металлических. М.; Л.: ГОНТИ, 1938.
9. Макмиллан Н. Идеальная прочность твердых тел // Атомистика разрушения: Сб. ст. 1983–1985 гг. / Сост. А. Ю. Ишлинский. М.: Мир, 1987. С. 35–103.
10. Вершинин Ю. Н., Ильичев Д. С. Механизм электронной детонации в твердых диэлектриках при больших скоростях разряда // Докл. РАН. 2000. Т. 374, № 2. С. 187–189.

*Поступила в редакцию 24/X 2001 г.,  
в окончательном варианте — 10/I 2002 г.*