

## SLOW ELECTRIC BREAKDOWN ALONG THE SURFACE OF POLYMER INSULATOR

A. D. MARGOLIN

*Slow electric breakdown along the polymer insulator surface is sensitive to humidity and modification of the surface. The carbon dendrite type structures appears and grows on polymer surface under electrical current. The process is developed due to oxidizing and electric destruction of polymer in oxygen containing atmosphere.*

**В статье дается понятие об электрическом пробое. Рассказывается о поверхностном пробое полимерного диэлектрика, поверхность которого покрыта тонким слоем электролита. После подачи напряжения на поверхности полимера появляются и распут карбонизированные дендриты. Разбирается механизм роста дендритов и измеряется их фрактальная размерность. Кратко даются представление о фракталах и определение их размерности.**

© Марголин А.Д., 1997

# МЕДЛЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

А. Д. МАРГОЛИН

Московский физико-технический институт,  
Долгопрудный Московской обл.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных причин, приводящих к выходу из строя электронной и электротехнической аппаратуры, является электрический пробой диэлектриков. Он также вызывает взгорания и пожары.

Электрический пробой – это резкое уменьшение электрического сопротивления диэлектрика и увеличение силы тока, проходящего через него, когда напряженность электрического поля достигает критической величины  $E_n$ , называемой электрической прочностью диэлектрика. При пробое образуется токовый канал (или шнур), удельное электрическое сопротивление в котором меньше, чем в окружающем веществе [1]. Почти весь пробойный ток течет по этому шнтуру (или шнуром).

При низкой напряженности электрического поля ( $E \ll E_n$ ) через диэлектрик течет слабый ток, поскольку удельное сопротивление диэлектрика очень велико:  $10^8$ – $10^{17}$  Ом · см. В таком режиме устанавливается равенство теплоприхода  $q_+$  (джоулевой теплоты) в области течения тока по диэлектрику и теплоотвода  $q_-$  из этой области в окружающую среду, находящуюся при температуре  $T_0$ . Так как удельная электропроводность  $\sigma$  диэлектрика возрастает с температурой  $T$  быстрее, чем линейно:  $\sigma \sim \exp(-A/T)$ , кривая теплоприхода  $q_+(T) \sim E^2 \sigma_0 \exp(-A/T)$  при

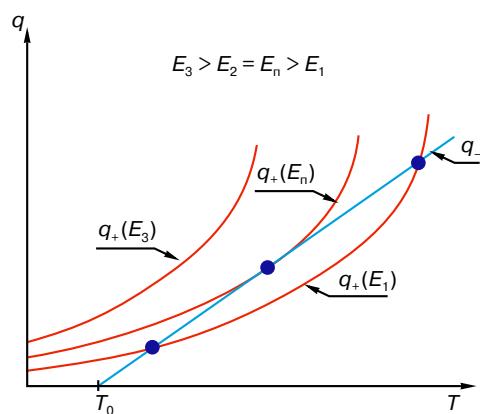


Рис. 1. Зависимость теплоприхода  $q_+$  и теплоотвода  $q_-$  от температуры

$E < E_n$  пересекает прямую теплоотвода  $q_+ \sim \alpha(T - T_0)$  в двух точках (рис. 1). Нижняя соответствует реализуемому устойчивому равновесию, а верхняя — неустойчивому, которое на практике не реализуется. При росте напряженности поля  $E$  температура  $T$  в устойчивом равновесном состоянии увеличивается. Напряженность поля, при которой кривая теплоотвода  $q_+(T)$  касается прямой теплоотвода  $q_-(T)$ , и есть электрическая прочность  $E_n$  (рис. 1). Когда  $E > E_n$ , теплоприход не уравновешивается теплоотводом, поэтому температура диэлектрика неудержимо возрастает. Еще быстрее возрастают удельная электропроводность. Это схема теплового механизма электропробоя диэлектриков.

Еще один механизм электропробоя — электрический, при котором генерация свободных носителей происходит под действием сильного электрического поля. В конкретных условиях реализуется тот механизм, который приводит к электропробою при меньшей напряженности поля. Различают электрический пробой через изолятор (твёрдый диэлектрик), воздушный промежуток и вдоль поверхности изолятора — поверхностный пробой. Электрическая прочность различных твёрдых диэлектриков находится в пределах  $10^5$ — $10^7$  В/см. Электрическая прочность воздуха в нормальных условиях составляет  $3 \cdot 10^4$  В/см.

Все электрические приборы изготавливают с необходимым запасом электрической прочности. Тем не менее телевизоры и другие электрические приборы нередко перегорают и горят. Это связано с тем, что в условиях эксплуатации изоляционные свойства материалов (и изделий из них) постепенно, а иногда и быстро изменяются. Особенно подвержены изменению изоляционные свойства поверхности диэлектриков. Поверхность диэлектриков увлажняется, покрывается пылью, подвергается физико-химическим превращениям. В результате таких процессов на поверхности диэлектрика появляется слой с повышенной по сравнению с исходным веществом удельной электропроводностью, способствующий электропробою. Насколько такое явление реально и опасно, проиллюстрируем только одним примером.

В один из дней декабря 1995 года в Москве на изоляторы троллейбусной сети попал солевой состав, который зимой используют для удаления льда с улиц города. В результате получилось короткое замыкание в 40 различных местах города и троллейбусное движение в громадном городе было парализовано на несколько часов. В этом случае на изоляторы попало большое количество электролита, что происходит иногда при неблагоприятном стечении многих обстоятельств. Гораздо чаще на поверхности изолятора появляется тонкая пленочка влаги, или электролита. Через пленку происходит небольшая утечка электроэнергии. Вскоре пленка испаряется, и изоляционные свойства вос-

становляются. Однако в некоторых случаях и такая тонкая пленка электролита на поверхности изолятора из полимера может запустить цепочку физических и химических процессов, в результате которых образуется проводящий углеродистый мостик, соединяющий электроды [2].

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ ПОВЕРХНОСТНЫЙ ПРОБОЙ ПОЛИМЕРОВ

Опишем опыты, в которых изучался слаботочный электрический пробой вдоль поверхности полимера [2, 3]. На увлажненной электролитом поверхности полимера, находящегося между электродами, через некоторое время после включения электрического напряжения (обычно через несколько минут) появляются и растут черные (или темные) углеродистые дендриты (рис. 2 и 3), похожие на негативные снимки искровых разрядов. Растут они в десятки тысяч раз медленнее развития классического электропробоя через твердый диэлектрик или воздух. Темп развития дендритов удобен для наблюдения — это минуты и десятки минут. Такой режим появляется при относительно низкой напряженности электрического поля (в 10—100 раз ниже электрической прочности воздуха).

Стволы и ветви углеродистых дендритов проводят ток подобно каналу молнии или электроискры. Но имеется и отличие. Вскоре после затухания разряда его канал перестает быть проводником электричества из-за остывания плазмы и рекомбинации положительных и отрицательных частиц. Время жизни карбонизированных дендритов значительно

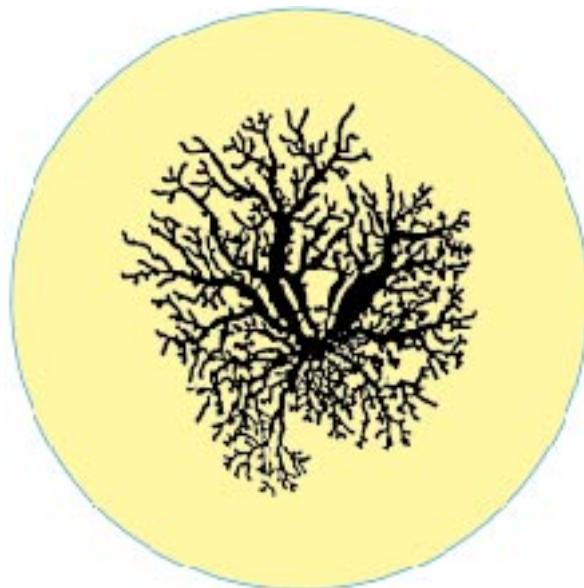
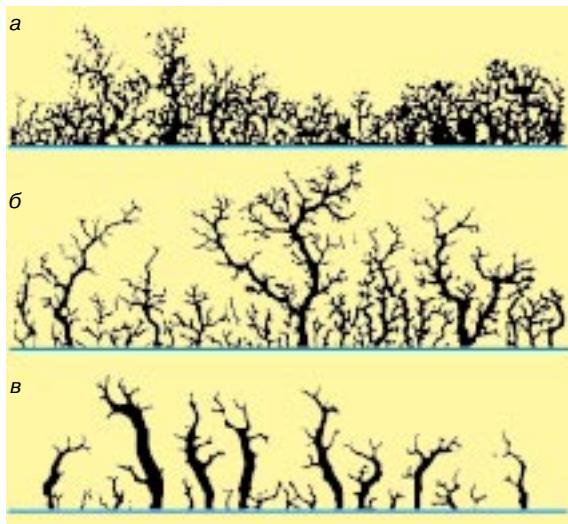


Рис. 2. Углеродистые дендриты на поверхности полимера между концентрическими электродами



**Рис. 3.** Углеродистые дендриты на поверхности полимера между линейными параллельными электродами. Дендриты а–в получены в различных экспериментах

больше – они могут сохранять электропроводность часами и даже дольше. Если рост дендритов прерывается из-за выключения напряжения или высыхания электролита, то после повторного увлажнения и подачи напряжения эти же дендриты продолжают расти – дендрит как бы обладает долговременной памятью. Через некоторое время углеродистые дендриты соединяют электроды, после чего режим протекания тока резко изменяется. Можно считать, что электропробой произошел.

Каковы причины появления и роста дендритов? В проводящем слое увлажненной электролитом поверхности диэлектрика, находящегося под напряжением, идут многообразные физические и химические процессы. Постепенно высыхает влага. Высыхание происходит неравномерно. Эта неравномерность связана с неравномерностью джоулева тепловыделения в проводящем слое. Через некоторое время появляется узкая сухая полоска, обычно вдоль электрода. Так как электропроводность полоски мала (по сравнению с электролитом), здесь появляется высокая напряженность электрического поля. В результате эту сухую полоску пробивает электрическая искра. В месте искрового разряда концентрируется ток, искра выжигает полимер, появляется узкий углеродистый след, движущийся вслед за лидером-искрой. Через некоторое время эта искра пропадает, но одновременно возникает в другом месте, где ширина полоски меньше. Постепенно из коротких следов образуется дендрит. Искра перепрыгивает с ветки на ветку, и таким образом дендрит растет.

Карбонизированный след образуется в результате термического разложения полимера и окисления его кислородом воздуха. Происходит так называемая термоокислительная карбонизация полимера.

В зоне карбонизации тепло выделяется как в результате прохождения электрического тока, так и в процессе химических реакций. В атмосфере инертных газов (азота или аргона) при тех же условиях опыта, при которых в воздухе дендриты образуются и растут, дендритов не образуется.

Описанное явление можно назвать медленным или ползущим электрическим поверхностным пробоем. Длительное время развития такого явления определяется тем, что кроме быстрых электрических процессов здесь существенны такие относительно медленные процессы, как высыхание жидкости, миграция жидкости под действием поверхностного напряжения, деструкция полимера.

Отметим, что движение следа за лидером-искрой сродни горению или, точнее, электрогорению, так как выделение тепла в голове следа имеет и электрическую и химическую природу, а движение вперед связано со скоростью тепловыделения и прогревом новых слоев с помощью теплопроводности.

Вглядимся в дендрит. От ствола отходят сучья, от сучьев – сучки, далее ветки и веточки. Сук с сучками или ветка с веточками очень похожи на все дерево. Дендриты геометрически относятся к так называемым фракталам [4, 5]. Общая длина фрактала зависит от масштаба  $\lambda$ , которым его измеряют ( $L \sim 1/\lambda^{D-1}$ ). Если размерность самоподобия или фрактальная размерность  $D > 1$ , то в пределе ( $\lambda \rightarrow 0$ ) размер фрактала стремится не к постоянной величине, а к бесконечности.

Фракталом называют объект с нецелой размерностью  $D$ . Зависимость  $L \sim 1/\lambda^{D-1}$  можно проиллюстрировать следующим образом. Измеряя дендрит с помощью циркуля с раствором  $\lambda$ , равным высоте всего дерева, мы измерим высоту дерева. Если масштаб уменьшать, то постепенно к высоте ствола прибавится сначала длина сучьев, затем сучков, потом веток и т.п., и поэтому суммарная длина фигуры будет все время увеличиваться при уменьшении масштаба измерения. Устойчивой величиной, описывающей геометрию фрактала, является его размерность.

Отметим, что при измерении обычных кривых (например, длины окружности), имеющих размерность  $D = 1$ , в пределе при  $\lambda \rightarrow 0$  получается конечная величина, равная длине этой фигуры, например  $2\pi R$  для окружности радиусом  $R$ .

Размерность физических (природных) фракталов из-за их сложной формы принято измерять наложив на них прямоугольную сетку с длиной ячеек  $\lambda$ . Определяют число ячеек  $N$ , в которые попал измеряемый объект. Затем откладывают  $\log N$  как

функцию от  $\log \lambda$  и по наклону кривой находят размерность дендрита в соответствии с формулой  $N \sim 1/\lambda^D$ . Именно таким способом была измерена фрактальная размерность получающихся в описанных опытах карбонизированных дендритов. Она оказалась равной  $D = 1,4\text{--}1,8$  в зависимости от условий опытов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Электрический пробой. Пробой диэлектриков. Диэлектрики // Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1990.
2. Евтухин Н.В., Савельев А.В., Марголин А.Д., Шмелев В.М. Ползущий пробой по поверхности полимера // Докл. АН СССР. 1989. Т. 307, № 6. С. 1370.
3. Дворкович А.В., Евтухин Н.В., Марголин А.Д., Шмелев В.М. Фрактальные режимы электрогорения тон-

ких полимерных слоев // Хим. физика. 1994. Т. 13, № 6. С. 111.

4. Соколов И.М. Фракталы // Квант. 1989. № 5.

5. Жиков В.В. Фракталы // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 12. С. 109.

\* \* \*

Аркадий Давидович Марголин, доктор физико-математических наук, профессор Московского физико-технического института, главный научный сотрудник Института химической физики РАН им. Н.Н. Семенова. Область научных интересов – химическая физика, в том числе физика горения и взрыва. Автор более 150 научных публикаций.