

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Л. Г. ГИНДИН, Л. М. МОРОЗ, И. Н. ПУТИЛОВА
и член-корреспондент АН СССР Я. И. ФРЕНКЕЛЬ

**О МЕХАНИЗМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ СУСПЕНЗИИ
МЕТАЛЛОВ В ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКАХ**

Как нами было показано ранее ⁽¹⁾, при наложении на суспензии металлов в бензине и других непроводящих жидкостях постоянного электрического поля $E \geq E_{кр}$ происходит пробой этих суспензий, превращающихся из диэлектриков в металлические проводники электрического тока. Пробой обусловлен образованием моста между электродами проводящего моста из частиц металла. Мост этот, в форме тонкой провисающей нити, обычно бывает видим невооруженным глазом. В настоящей статье мы попытаемся дать объяснение этого явления в той мере, в какой это позволяют сделать имеющиеся у нас опытные данные.

При наблюдении за поведением суспензий, даже в относительно слабом электрическом поле, обращает на себя внимание асимметрия в движении частиц, большинство которых устремляется к катоду. Такая асимметрия, очевидно, обусловлена наличием на поверхности частиц небольшого положительного заряда, возникающего в результате контакта их с дисперсионной средой.

Известная доля частиц, устремившихся к катоду, связывается с ним; при этом, между частицами и катодом (и вообще электродами) отсутствует непосредственный электрический контакт, так как частицы покрыты тонкой пленкой плохо проводящего окисла (имеются в виду частицы алюминия, меди и тому подобных металлов). Связь частиц с электродом обусловлена их поляризацией.

К этим частицам, связанным с катодом, присоединяются новые частицы, которые под влиянием электростатической индукции становятся диполями и в силу этого притягиваются друг к другу своими противоположными полюсами. В результате возникают своеобразные «елочные» структуры, растущие вдоль силовых линий поля по направлению к аноду, со стороны которого им навстречу растут такие же структуры, формирующиеся в основном за счет частиц, перелетевших к нему с катода.

Иногда связанные с электродом агрегаты частиц внезапно от него отрываются и рассыпаются на отдельные частицы, что производит впечатление маленьких «взрывов». Такие «взрывы» можно объяснить следующим образом. Первоначальный заряд частиц, обуславливающий асимметрию в их движении к электродам, современем заменяется зарядом противоположного знака; этот заряд, стекающий с электрода на изолирующую поверхность частиц, вызывает их отталкивание друг от друга. До поры до времени силы отталкивания между частицами уравновешиваются поляризационными силами между электродом и индуцированными диполями, пока не будет перейден предел устойчивости и не произойдет «взрыв».

Таким образом, механизм этих «взрывов» в известном смысле аналогичен механизму деления тяжелых атомных ядер, с той лишь разницей, что роль ядерных сил притяжения в описываемом явлении играют силы электрической поляризации между индуцированными диполями.

Через некоторое время после наложения поля $E < E_{кр}$ все межэлектродное пространство оказывается заполненным похожими на цепочки структурами из металлических частиц и их агрегатов. Тем не менее, в силу наличия на поверхности частиц непроводящей окисной пленки система продолжает оставаться диэлектриком. Однако в тот момент, когда E достигает значения $E_{кр}$, изолирующие пленки в одной из цепочек пробиваются и эта цепочка становится проводящим металлическим мостом. Напряженность поля резко падает (от нескольких киловольт на сантиметр до 1 в/см), заполнявшие межэлектродное пространство агрегаты частиц осыпаются, и образовавшийся мост в виде тонкой, провисающей между электродами нити делается видимым невооруженным глазом.

Наши опытные данные указывают на то, что $E_{кр}$ имеет величину порядка нескольких тысяч вольт на сантиметр. Например для суспензий алюминия, частицы которого имели размеры $3 \div 5 \mu$, $E_{кр}$ составляло около 4000 в/см. Эта величина по своему порядку соответствует величине пробивного напряжения для твердых изоляторов.

$E_{кр}$ следует, очевидно, рассматривать как меру пробивного напряжения изолирующих окисных пленок, рассчитанного для всех звеньев моста. Оно может быть определено как сумма скачков потенциала на контактах всех звеньев в момент пробоя, вернее, как частное от деления этой величины на общую длину моста.

При такой трактовке $E_{кр}$ становится понятным тот факт, что критическая напряженность поля, необходимая для пробоя, возрастает с увеличением степени дисперсности суспензии, т. е. с уменьшением размеров ее частиц. Если окисный слой имеет определенную толщину, не зависящую от размеров металлических зерен, то относительная толщина его тем больше, чем меньше абсолютные размеры металлических частиц. Отсюда следует, что уменьшение последних сопровождается относительным возрастанием окисленной части их объема, а тем самым и общей величины той разности потенциалов, которая приходится на объем окисленной части. Исходя из этих соображений, становится в принципе возможным вычислить толщину окисных пленок, покрывающих металлические зерна.

Можно было ожидать, что электрическому контакту частиц между собой и с электродом препятствуют прослойки изолирующей жидкости. Однако еще ранее мы убедились в том, что очень тонкие слои жидкого диэлектрика, порядка нескольких десятков ангстрем, обладают, видимо, благодаря туннельному эффекту, весьма малым сопротивлением ⁽²⁾. Так как толщина прослоек жидкости между соприкасающимися частицами в изученных суспензиях была того же порядка, то придется признать, что основным препятствием для тока являются не эти прослойки, а пленки окислов. Что касается обнаруженного влияния на $E_{кр}$ дисперсионной среды, то оно, по всей вероятности, зависит от воздействия этой среды на окисную пленку. Во всяком случае, нам сейчас представляется, что это влияние среды не стоит в связи с ее диэлектрической проницаемостью, поскольку при постоянной разности потенциалов напряженность поля остается неизменной.

Как уже было сказано выше, проводящий мост возникает в момент пробоя. Ясно, что основную роль в образовании проводящего моста играют силы электростатической индукции. Однако завершающим этапом в их действии, закрепляющим звенья моста, является электрический пробой изолирующих окисных пленок, покрывающих эти звенья и препятствующих их непосредственному металлическому контакту. Что

происходит с пленкой в момент пробоя и каким образом осуществляется металлический контакт, это еще не совсем ясно. Повидимому, все же контакт осуществляется путем «спекания», связанного с диффузией металла от частицы к частице. При этом электрический пробой является процессом, открывающим ворота для непосредственного действия сил сцепления между атомами металла*.

Следует заметить, что в поведении суспензий в момент пробоя имеется большое сходство с поведением сухих металлических порошков.

Как известно, изменение проводимости последних в электрических полях явилось объектом многих исследований. Открытое Бранли ⁽⁴⁾ уменьшение сопротивления металлических порошков под влиянием электрических колебаний привело к изобретению когерера — первого детектора электромагнитных волн. Усовершенствованный А. С. Поповым ⁽⁵⁾ когерер сыграл большую роль в его гениальных работах, приведших к открытию им беспроволочной телеграфии. Несмотря на то, что вопрос о механизме действия когереров, т. е. о том, каким образом под влиянием поля осуществляется электрический контакт между отдельными частицами порошка, оживленно в свое время дискутировался ^(6, 7), этот вопрос при всем его принципиальном значении остается и по сей день в значительной мере нерешенным.

Наблюдение за процессом образования моста и анализ его поведения дают основание предположить наличие трех типов связи между звеньями моста. Первый тип связи — чисто электростатический, имеет место на тех стадиях образования моста, которые предшествуют пробоя. Второй тип связи — смешанный, обусловленный, с одной стороны, силами электростатическими, а с другой, силами межуатомного сцепления, возникает в момент образования собственно моста, в момент пробоя и продолжает действовать все время, пока мост находится под током. И, наконец, третий тип — чисто металлической связи, обязанный исключительно силам межуатомного сцепления, благодаря которым мост существует и после того, как по нему перестает течь ток.

Не останавливаясь на первом и третьем типе связи, о которых говорилось выше, отметим лишь, что в пользу смешанного типа связи между звеньями проводящего моста, когда он находится под током, говорит его сравнительно большая в это время прочность, его гибкость, эластичность, которые он утрачивает тотчас же после того, как по нему перестает течь ток. Очевидно, что в то время, когда ток течет по проводящему мосту, помимо сил межуатомного сцепления, существенную роль продолжают играть электростатические силы, обусловленные незначительными скачками потенциала на тех больших сопротивлениях, которыми обладают возникающие между звеньями моста тонкие «спайки». Если даже допустить, что общее падение потенциала вдоль всего моста имеет порядок одного вольта и, таким образом, на каждую подобную «спайку» придется разность потенциалов порядка 10^{-4} в, что при длине «спайки» около 100 Å будет соответствовать напряженности поля в 100 в/см, то и тогда такое поле еще способно обеспечить значительные силы электростатического притяжения между соседними звеньями, достаточные для восстановления связи между ними, когда эта связь ослабляется или нарушается под влиянием тех или иных механических воздействий на мост.

В заключение следует отметить, что проводящие мосты, существование которых до сих пор только предполагалось, сейчас стали объектом визуального наблюдения. Это открывает новые возможности для реше-

* В работе ⁽³⁾ показано, что чистые металлические поверхности при соприкосновении друг с другом прочно слипаются; при покрытии же их тончайшими окисными пленками они обнаруживают обычное трение согласно закону Амонгона — Кулона.

ния ряда интересных вопросов, связанных с поведением суспензий металлов и сухих металлических порошков в электрических полях.

Поступило
28 VI 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Л. Г. Гиндий, Л. М. Мороз, И. Н. Путилова, Я. И. Френкель и О. А. Шпанская, ДАН, 72, № 4 (1950). ² К. Д. Золтоев, ЖТФ, 19, № 10, 1146 (1949). ³ E. D. Tingle, Trans. Farad. Soc., 46, 2, 93 (1950). ⁴ E. Branly, C. R., 111, 786 (1890); 112, 90 (1891). ⁵ А. С. Попов, ЖРФХО, часть физ., 28, 1 (1896). ⁶ O. J. Lodge, Philos. Mag., 37, 94 (1894). ⁷ E. Aschkinass, Ann. d. Phys. u. Chem., 66, 284 (1898).