

## О НЕКОТОРЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТНЫХ ЯВЛЕНИЯХ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВДАВЛИВАНИИ КОНИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА В ПЛОСКУЮ НАКОВАЛЬНЮ ЧЕРЕЗ ТОНКИЙ СЛОЙ ДИЭЛЕКТРИКА

*С.М. Стишов, В.Н. Качинский*

Показано, что совокупность электрических явлений, наблюдаемых при сжатии тонкого слоя диэлектрика в системе конический индентор — плоская наковальня, может быть описана, как результат обратимого короткого замыкания без привлечения гипотезы о переходе металл — диэлектрик.

В работах [1 — 9] сообщалось о наблюдении резкого падения электросопротивления при сжатии тонких диэлектрических слоев между коническим индентором и плоской наковальней, изготовленными из синтетического алмазного материала — карбонадо. Возврат в диэлектрическое состояние при снижении нагрузки происходит с заметным гистерезисом, а нагревание системы, находящейся вблизи точки возврата, при неизменном усилии приводит к спонтанному переходу в диэлектрическое состояние. Заметим, что синтетический карбонадо является проводящим материалом, поэтому индентор и наковальня используются в качестве электрических зондов.

Описанные явления интерпретируются авторами, как доказательство перехода исследуемых веществ в металлическое состояние при высоких давлениях. Круг веществ, подвергнутых металлизации, весьма широк и включает водород, воду, алмаз, нитрид бора, окись алюминия, фториды щелочных металлов и пр. Аналогичные результаты сообщались

также в работах [10 – 13] для кремнезема, водорода, воды и окиси магния. Обе группы исследователей указывают, что наблюдаемые явления происходят при давлениях порядка 1 Мбар и выше.

Несмотря на то, что описанные явления действительно очень напоминают то, что можно ожидать при фазовых переходах первого рода, интерпретация полученных результатов, как тотальной металлизации в этой области давлений, вызывает возражение. Даже если давление в упомянутых экспериментах достигает такой большой величины, как 5 Мбар, трудно предположить, что такие малосжимаемые вещества, как окись магния, окись алюминия и кремнезем, становятся металлами в этом диапазоне давлений (см., например, [14]).

Возникает вопрос об альтернативном толковании явлений, описанных в работах [1 – 13]. С этой целью нами проведены эксперименты с устройством типа конический индентор – плоская наковальня, причем индентор и наковальня были изготовлены из твердого сплава ВК-6. Предел текучести при сжатии этого сплава равен примерно  $600 \text{ кг/мм}^2$  (60 кбар); с помощью специальных конструктивных приемов при использовании ВК-6 удается получать давления существенно выше указанной величины, но по-видимому, не более 200 кбар [15]. Таким образом, при использовании этого материала давления заведомо не могли достигать мегабарного диапазона.

Эксперименты проводились с инденторами, имеющими угол при вершине конуса 120 и 168°. Вершины инденторов скруглялись с радиусом  $\sim 0,2 - 0,5 \text{ мм}$ . Инденторы нагружались с помощью рычажно-винтового механизма, позволяющего создавать усилия до 500 кг. В качестве объектов исследования использовались тонкие слои кремнезема, окиси алюминия и окиси магния. Электрическое сопротивление между индентором и наковальней измерялось вольтметром ВК7-9. Как оказалось, при надлежащем выборе толщины слоя диэлектрика удается воспроизводимо получить зависимость электросопротивления от нагрузки, практически неотличимую от соответствующих зависимостей, приведенных в работах [1 – 9] (см. рис. 1 и рис. 2).

Опишем подробнее эксперименты с окисью магния. Материал напылялся на наковальню при сжигании металлического магния в воздухе. Оптимальная толщина слоя для получения искомого эффекта составила  $\sim 0,01 \text{ мм}$ . При толщине слоя, существенно меньшей этой величины, происходило короткое замыкание сразу же при опускании индентора на плоскость. При толщине слоя  $\gtrsim 0,03 \text{ мм}$  искомый эффект не возникал даже при максимальных нагрузках. Типичная кривая зависимости сопротивления  $R$  от нагрузки  $F$  для окиси магния приведена на рис. 2. Также, как и в опытах [1 – 9], нагревание системы в точках, близких к точке перехода, приводит к спонтанному переходу в непроводящее состояние. Аналогичным образом действует и легкое постукивание. В точках, близких к переходу в проводящее состояние, легкое постукивание также часто приводит к резкому падению электросопротивления.

В ряде случаев кривые  $R(F)$  в области резкого изменения проводимости имеют многоступенчатую форму. Иногда резкое изменение сопротивления в точке перехода инициируется изменением измерительного тока и напряжения, что указывает на явления типа электрического пробоя.

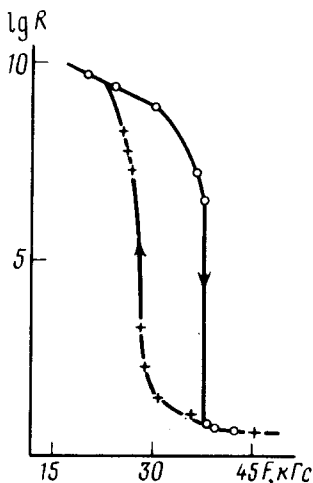


Рис. 1

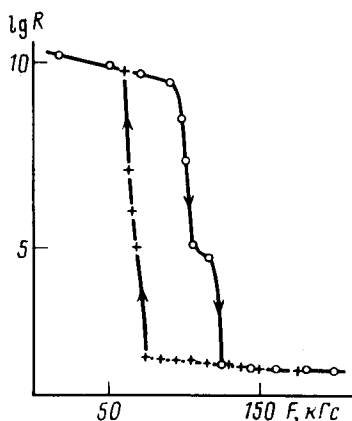


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость электросопротивления от нагрузки для окиси алюминия. Угол при вершине индентора  $120^\circ$ . Среднее давление в точке резкого падения электросопротивления  $\sim 50$  кбар

Рис. 2. Зависимость электросопротивления от нагрузки для окиси магния. Угол при вершине индентора  $168^\circ$ . Первоначальная толщина слоя  $\sim 0,01$  мм, средняя толщина слоя под индентором после нескольких циклов сжатия  $\sim 1$  мкм. Среднее давление в точке резкого падения электросопротивления  $\sim 30$  кбар

Измерения площади отпечатка индентора на слое окиси магния и усилия, создаваемого прессом, приводят к среднему давлению  $\sim 30$  кбар в точке резкого падения электросопротивления. Даже если принять, что давление в центре могло быть в несколько раз выше среднего значения, нужно быть очень большим оптимистом, чтобы считать, что оно достигает значения в 1 Мбар и выше. Сдругой стороны известно, что окись магния не обнаруживает каких-либо признаков металлизации вплоть до давлений 1 Мбар [16].

Все вышесказанное можно повторить и по поводу наших экспериментов с окисью алюминия (см. рис. 1). Среднее давление в этом случае достигало  $\sim 50$  кбар, в то время, как экспериментально показано, что окись алюминия остается диэлектриком до давлений  $\sim 1,7$  Мбар [17].

Естественное объяснение наблюдаемых эффектов – обратимое замыкание индентора и наковальни через тонкий слой диэлектрика. Микроскопическое исследование вещества, подвергнутого сжатию, показывает, что первоначально рыхлый материал сильно спрессован и стал прозрачным. Толщина слоя вещества под центральной частью индентора составляет в среднем  $\sim 1$  мкм, что уже сравнимо с размером отдельных неровностей индентора и наковальни.

Возможный механизм замыкания представляется нам, как проникновение выступов индентора и наковальни за счет неоднородной упругой деформации через межзерновые промежутки и трещины в тонком слое

диэлектрика, при этом в зависимости от напряжения, прикладываемого к образцу, общая картина механического замыкания может усложняться явлениями электрического пробоя или квантовомеханического туннелирования.

Наблюдение электрического пробоя в ряде наших экспериментов позволяет оценить толщину слоя исследуемого материала в точке пробоя. При измерении электросопротивления прибором ВК7-9 напряжение на образце может достигать 6В. Напряжение электрического пробоя для материалов типа  $Al_2O_3$ ,  $MgO$  и  $SiO_2$  в тонких слоях  $\sim 5 \cdot 10^6$  В/см. Следовательно, толщина слоя вещества в точке пробоя  $\sim 100 \text{ \AA}$  при средней толщине слоя  $\sim 1$  мкм. Поскольку неровности поверхностей наковальни и индентора существенно больше  $100 \text{ \AA}$ , мы не видим причин, препятствующих прямому механическому контакту индентора и наковальни при дальнейшем повышении нагрузки.

Наблюдаемый гистерезис представляется совершенно естественным благодаря большим потерям на трение и пластическую деформацию материала. Возврат в непроводящее состояние при нагревании и вибрации или обратный переход под воздействием этих факторов может быть обусловлен рядом причин, в числе которых следует упомянуть уменьшение трения в механизме передачи усилия, эффективное уменьшение трения на контакте вещества с наковальней, разницу коэффициентов термического расширения вещества и наковален и т. д.

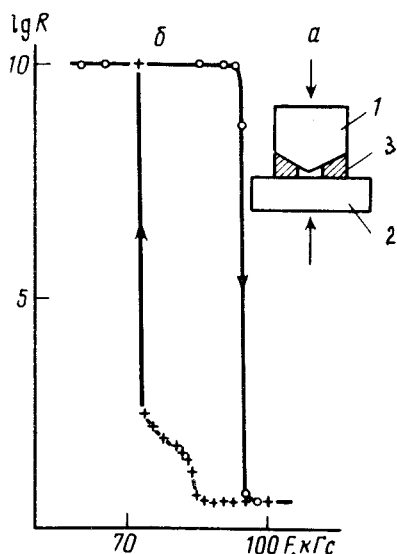


Рис. 3. *a* – Механическая модель, иллюстрирующая эффект обратимого короткого замыкания через вязко-упругую среду: 1 – металлический конус, 2 – металлическая наковальня, 3 – капроновая втулка; *б* – зависимость электросопротивления от нагрузки для модели, изображенной на рис. *a*

Эти представления можно проиллюстрировать на механической модели, изображенной на рис. 3, *a*. С помощью этой модели получена зависимость сопротивление – нагрузка, представленная на рис. 3, *б*. Эта модель демонстрирует практически все эффекты, описанные в [1 – 9] и приписываемые авторами явлению металлизации под давлением.

Касаясь вопроса о поведении двухкомпонентных смесей [8], заметим, что два скачка на кривой  $R(F)$  часто наблюдаются даже на однокомпонентном веществе (см. [6]). Учитывая, что исследуемые эффекты возникают при определенной, но заранее неизвестной толщине слоя

[7], неясно, каким образом авторы работы [8] отделяют нужные эффекты от ненужных.

Таким образом, результаты проведенных нами экспериментов показывают, что факты, приводимые в работах [1 — 9], равно как и в [10 — 13], не могут быть интерпретированы однозначно.

Институт кристаллографии  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
31 октября 1980 г.  
После переработки  
8 января 1981 г.

## Литература

- [1] Л.Ф.Верещагин, Е.Н.Яковлев, Г.Н.Степанов, Б.В.Виноградов. Письма в ЖЭТФ, **16**, 382, 1972.
- [2] Л.Ф.Верещагин, Е.Н.Яковлев, Б.В.Виноградов, В.П.Сакун, Г.Н.Степанов. Письма в ЖЭТФ, **17**, 422, 1973.
- [3] Л.Ф.Верещагин, Е.Н.Яковлев, Б.В.Виноградов, В.П.Сакун, Г.Н.Степанов. Письма в ЖЭТФ, **20**, 172, 1974.
- [4] Л.Ф.Верещагин, Е.Н.Яковлев, Б.В.Виноградов, В.П.Сакун. Письма в ЖЭТФ, **20**, 540, 1974.
- [5] Л.Ф.Верещагин, Е.Н.Яковлев, Б.В.Виноградов, Ю.А.Тимофеев. ФТТ, **18**, 113, 1976.
- [6] Л.Ф.Верещагин, Е.Н.Яковлев, Ю.А.Тимофеев. Письма в ЖЭТФ, **21**, 190, 1975.
- [7] Л.Ф.Верещагин, Е.Н.Яковлев, Ю.А.Тимофеев. Письма в ЖЭТФ, **21**, 643, 1975.
- [8] Е.Н.Яковлев, Л.Ф.Верещагин, Б.В.Виноградов, Ю.А.Тимофеев. Письма в ЖТФ, **2**, 570, 1976.
- [9] Б.В.Виноградов, Л.Ф.Верещагин, Е.Н.Яковлев, Ю.А.Тимофеев. Письма в ЖТФ, **2**, 964, 1976.
- [10] N.Kawai, A.Nishiyama. Proc. Japan Acad., **50**, 72, 1974.
- [11] N.Kawai, A.Nishiyama. Proc. Japan Acad., **50**, 634, 1974.
- [12] N.Kawai, M.Togaya, O.Mishima, B.L.Neindre. Proc. Japan Acad., **51**, 627, 1975.
- [13] N.Kawai, M.Togaya, O.Mishima. Proc. Japan Acad., **51**, 630, 1975.
- [14] D.A.Liberman. Phys. and Chem. of Solids, **39**, 255, 1978.
- [15] A.L.Ruoff. High Pressure Science and Technology, v. 1, p. 753, Ed. K.D.Timmerhaus and M.S.Barber, 1977.
- [16] H.K.Mao, P.M.Bell. Carnegie Inst. Yearbook, **75**, 509, 1976.
- [17] H.K.Mao, P.M.Bell. Science, **200**, 1145, 1978.