

УДК 539.372

© 1990

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

*В. С. Куксенко, Р. Ш. Килькеев, А. И. Ляшков,
К. М. Мирджамолов, А. В. Савицкий*

Представлены результаты экспериментального изучения электризации кварцевых стекол при механическом нагружении. Исследовались образцы в виде стержней круглого сечения из кварцевого стекла, используемого в световодной технике. Установлено, что в упругой области деформации образца возникающая под действием нагрузки поляризация имеет обратимый характер и при этом линейно зависит от величины нагрузки. Для сопоставления результатов при действии растягивающей и сжимающей нагрузок в одной и той же точке эффект поляризации исследовался при изгибе образца. При этом заряды на растянутых и сжатых участках всегда имеют одинаковую величину и противоположны по знаку. Для объяснения этого явления предложена модель, суть которой состоит в том, что при деформации сетчатой структуры стекла (сближение или удаление атомов друг от друга) возникают условия для направленного перемещения примесных ионов по аналогии с эффектом поляризации диэлектриков во внешнем электрическом поле.

Электризация неметаллических материалов при их деформировании остается до сих пор недостаточно изученным явлением. Это объясняется большим разнообразием появления индуцированного заряда при деформировании твердых тел. Из литературных данных известно, что этот эффект очень чувствителен к таким факторам, как неоднородность структуры материалов, наличие на них остаточных напряжений и различных примесей и т. д. Наиболее детально в настоящее время изучено явление электризации при деформировании щелочно-галлоидных кристаллов (ЩГК), где эффект поляризации объясняется переносом заряда движущимися дислокациями, а также некоторых природных материалов (горные породы) [1], для которых физическая природа наблюдаемых эффектов связывается с поляризационными явлениями на граничных поверхностях зерен. Детальную картину появления поля зарядов деформируемых ЩГК удалось получить авторам [2, 3] в условиях реализации скольжения вдоль одной системы плоскостей. Зарождение и развитие микротрещин в образцах ЩГК при деформациях, близких к разрушению, приводит к новым эффектам в электризации образца, связанным с ориентацией своеобразной доменной структуры материала и со спонтанной поляризацией доменов [4].

В настоящей работе электризация исследовалась на кварцевом стекле в области упругих деформаций, что исключило влияние движущихся дислокаций и дефектов типа микротрещин.

1. Методика эксперимента

Образцы готовились в виде стержней круглого сечения из кварцевого стекла, используемого в световодной технике. Нагружение производилось двумя способами. В первом один конец стержня длиной 130 и диаметром 13 мм жестко закреплялся, к другому концу прикладывалась нагрузка P (рис. 1, а, б). Это позволяло измерять электризацию в условиях действия

растягивающей и сжимающей нагрузок. Возникающий при деформировании образца заряд измерялся электрометром собственной конструкции бесконтактным способом, описанным в [4]. С помощью плоского круглого зонда Z диаметром 3.0 мм сканировали вдоль и вокруг образца O на рас-

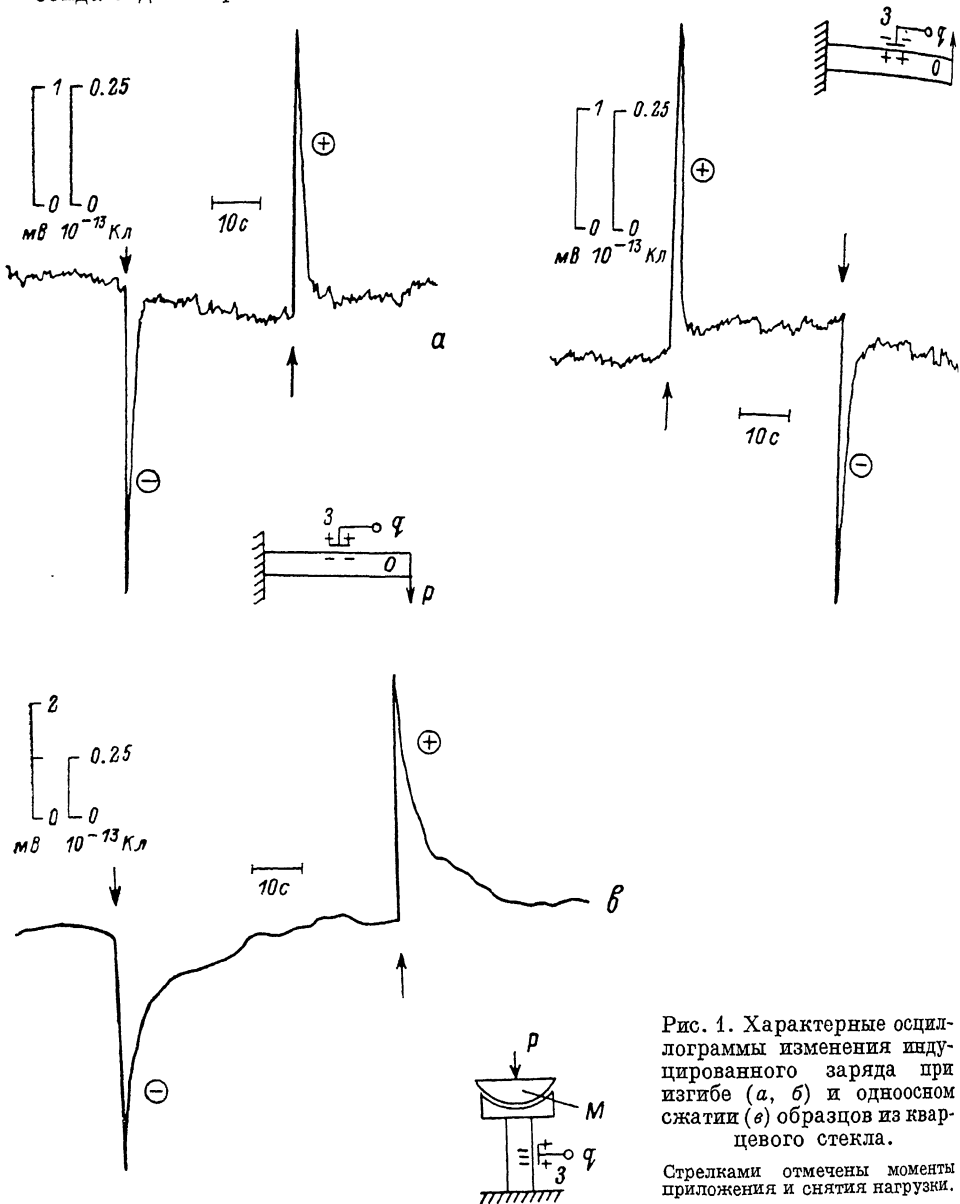


Рис. 1. Характерные осциллограммы изменения индуцированного заряда при изгибе (а, б) и одноосном сжатии (в) образцов из кварцевого стекла.

Стрелками отмечены моменты приложения и снятия нагрузки.

стоянии 1.0 мм от его поверхности. Возникающее электрическое поле образца индуцировало на зонде электрометра заряд q , который регистрировали с помощью самописца с точностью $\pm 20\%$.

Во втором случае нагружение проводили в условиях одноосного сжатия ($l=40$ мм, $d=13$ мм), причем для исключения перекоса нагружение осуществляли через менисковое устройство M (рис. 1, в).

2. Экспериментальные результаты

На рис. 1 приведены осциллограммы электрических сигналов (ЭС), возникающих на зонде электрометра при изгибе и одноосном сжатии образца. В момент времени t_1 образец резко нагружали с помощью ручного

гидравлического пресса, величина нагрузки составляла примерно 0.3—0.4 от разрушающей. При этом наблюдали импульсный сигнал, амплитуда которого пропорциональна величине индуцированного заряда q . При снятии нагрузки в момент времени t_2 регистрировали аналогичный сигнал противоположного знака.

Изгиб стержня как способ нагружения использовали для сопоставления результатов при действии растягивающей и сжимающей нагрузок в одной и той же точке. Для этого произвольно выбранный участок поверхности маркировали, к нему подводили зонд на расстоянии примерно 1.0 мм от поверхности образца, затем к свободному концу стержня прикладывали нагрузку. Зарегистрированный при этом ЭС показан на рис. 1, а. После продолжительной выдержки образца в разгруженном состоянии его вновь нагружали, но в противоположном направлении. Регистрируемый в этом случае сигнал приведен на рис. 1, б. Видно, что под воздействием растяжения и сжатия возникающие заряды имеют одинаковую величину, но противоположны по знаку. Измеряемая величина индуцированного заряда q зависит от величины приложенной нагрузки P . Можно видеть (рис. 2), что зависимости $q(P)$ близки к линейным и противоположны по знаку. Следует отметить, что в упругой области деформации образца возникающая под воздействием нагрузки поляризация имеет обратимый характер. После разгрузки и отдыха вторичное нагружение до той же величины дает воспроизводимое значение q .

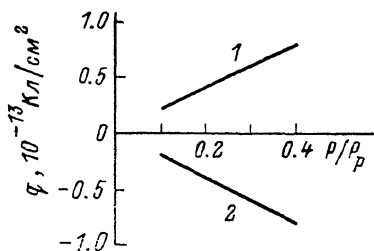


Рис. 2. Зависимость индуцированного заряда q от величины механической нагрузки P для растяжения (1) и сжатия (2).

P_p — разрушающая нагрузка.

3. Обсуждение результатов

Представляет интерес обсуждение вопроса о полярности возникающих электрических сигналов и их связи с условиями деформации. Наиболее явно такая связь прослеживается при изгибе образцов. Как уже отмечалось, над зоной растяжения регистрировали ЭС положительной полярности, а над зоной сжатия — отрицательной. При полной разгрузке образца наблюдали изменение полярности сигналов на противоположную (рис. 1). Такая картина является типичной для образцов из кварцевых стекол и хорошо воспроизводится. Аналогичное явление наблюдается при деформировании других материалов (горных пород), описанное в работах [1, 5]. Можно предположить, что существует некий общий механизм поляризационных явлений в изотропных диэлектриках, находящихся в поле механических напряжений. Описанное явление имеет аналогию в поведении диэлектрика при воздействии внешних электрических полей.

Процессы поляризации диэлектриков подробно изучены, и экспериментально показано, что существует характерное время установления поляризации τ , связанное со строением различных диэлектриков [6]. Из наших данных следует, что установление поляризованного состояния при механическом нагружении составляет величину порядка нескольких секунд. В стекле такие медленные поляризационные процессы, происходящие под воздействием внешних электрических полей, наиболее характерны для тепловой миграции ионов щелочных металлов [7].

Можно предположить, что при деформации сетчатой структуры стекла (сближение или удаление атомов друг от друга) возникают условия для направленного перемещения примесных ионов, что наблюдается при поляризации диэлектриков во внешнем электрическом поле. Известно, что при этом в диэлектрике возникает неравномерное распределение ионов по

объему, обусловленное изменением высоты потенциального барьера. Механические напряжения неспособны непосредственно влиять на характер движения ионов. Однако потенциальный рельеф узлов сетки стекла при этом претерпевает изменения.

Если деформация образца пространственно однородна, высоты потенциальных барьеров в соседних узлах сетки изменяются на одинаковую величину (рис. 3, б). При неоднородной деформации изменение потенциальной энергии в соседних узлах окажется различным (рис. 3, в). Тогда

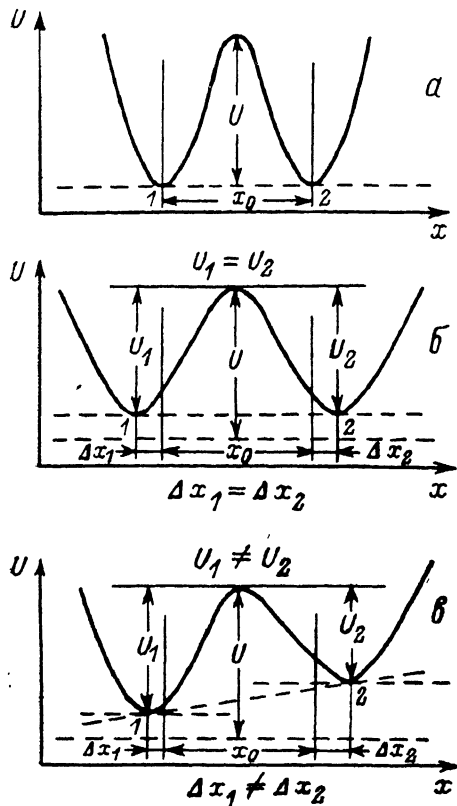


Рис. 3. Схематическое изображение потенциального энергетического барьера U в соседних узлах сетки стекла при отсутствии деформации (а), при однородной (б) и неоднородной деформации (в).

в тех участках образца, которые испытывают деформацию растяжения, происходит уменьшение высоты потенциального барьера. Напротив, сжатие приводит к сближению атомов и увеличению высоты потенциального барьера. Очевидно, что направление тепловой миграции ионов при наличии несимметричного распределения потенциальных барьеров будет зависеть от градиента деформации. В явном виде неоднородно-деформированное состояние возникает при изгибе, когда грани образца испытывают деформацию противоположного знака. В области сжатия, где высота потен-

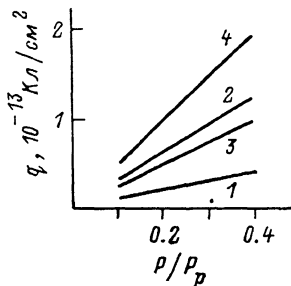


Рис. 4. Изменение зависимости величины индуцированного заряда q от приложенной нагрузки P при смещении зонда вдоль образующей поверхности образца на 90° (1), 180° (2), 270° (3) и 360° (4).

циальных барьеров больше, должно наблюдаться воз астание концентрации примесных ионов, а в области растяжения, н. отив, происходит уменьшение концентрации. Как известно, наибольшей подвижностью в стеклах обладают положительные ионы щелочных металлов, имеющие минимальный эффективный радиус [7].

Рассмотренная модель позволяет объяснить появление положительного избыточного заряда в области сжатия по отношению к противоположной области растяжения (рис. 1). Для численной оценки рассматриваемого эффекта необходимо знать распределение потенциал этого рельефа на микроскопическом уровне при воздействии внешних макроскопических нагрузок, что представляет собой сложную задачу.

Следует отметить, что при одноосном сжатии полученные зависимости имеют аналогичный характер. Однако для каждого участка поверхности одного образца (или для разных образцов) наклон зависимости $q(P)$ может отличаться (рис. 4). Видно, что как и в зависимости подобны. При этом знак заряда один и тот же, а величина его возрастает с нагрузкой. Эти данные позволяют сделать вывод, что электризация кварце-

вого стекла существенным образом зависит от структуры материала и примесей.

В заключение авторы выражают благодарность Л. Э. Рикенглазу за плодотворное обсуждение результатов.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Куксенко В. С., Килькеев Р. Ш., Мирошниченко М. И. // ДАН СССР. 1981. Т. 260. № 4. С. 841—843.
- [2] Смирнов Б. И., Куличенко А. И. // ФТТ. 1980. Т. 22. № 3. С. 948—950.
- [3] Куличенко А. И., Смирнов Б. И. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 11. С. 3294—99.
- [4] Килькеев Р. Ш., Куксенко В. С. // ФТТ. 1980. Т. 22. № 10. С. 1929—32.
- [5] Lockner D. A., Byerlee J. D., Kuksenko V. S., Ponomarev A. V. // PAGEOPH. 1986. V. 124. N 3. P. 601—608.
- [6] Сканави Г. И. Физика диэлектриков (область слабых полей). М.; Л., 1949. 500 с.
- [7] Стевелс Дж. Электрические свойства стекла. М., 1961. 89 с.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе
Ленинград

Поступило в Редакцию
1 февраля 1990 г.