

вие двойниковых границ при развитии отпечатка с дополнительной нагрузкой на индентор.

### Список литературы

1. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976. – 230 с.
2. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Эволюция геометрии двойниковых границ в висмуте при увеличении нагрузки // Кристаллография. – 2002. – Т. 47, № 3. – С. 537–542.
3. Бойко В.С., Гарбер Р.И., Косевич А.М. Обратимая пластичность кристаллов. М.: Наука, 1991, – 278 с.

## ПОЛЯРИЗАЦИИ МРАМОРА В ПОЛЕ УПРУГИХ СИЛ ПРИ ЗАДАННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Махмудов Х. Ф.

*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия*  
[h.machmoudov@mail.ioffe.ru](mailto:h.machmoudov@mail.ioffe.ru)

Исследовались механо-электрические эффекты при слабой электрической поляризации и при упругой деформации образцов мрамора. Показано, что релаксация поляризации в обоих случаях идентична по природе и имеет в основе термоактивационный процесс. Получена температурная зависимость времени релаксации электрических полей. Изучен процесс релаксации индуцированного потенциала и сделана оценка энергии активации этого процесса. Предложен механизм релаксации индуцированного потенциала. Регистрация релаксации индуцированного потенциала электрического поля в образце производилась бесконтактным способом при помощи специально изготовленного электрометра (ЭМ) с большим входным сопротивлением с последующими записями сбора и обработки входных токов в систему A-Line 32D.

### Введение

Зависимости релаксации в первом приближении могут быть описаны уравнением кинетики первого порядка:  $\varphi_t = \varphi_0 [1 - \exp(-t/\tau)]$ , где  $\varphi_t$  – текущее значение измеряемого потенциала (в различные моменты времени  $t$ ),  $\varphi_0$  – начальное значение  $\varphi$ . Величина  $\tau = K^{-1}$ , где  $K$  характеризуется как константа скорости протекания процесса релаксации. Поскольку  $K$  характеризует процесс протекания релаксации, можно записать термоактивационное уравнение для константы скорости:  $K = K_0 \exp[-E/RT]$  где  $E$  – энергия активации процесса релаксации,  $T$  – абсолютная температура,  $R$  – газовая постоянная. Энергия активации процесса релаксации является важнейшей энергетической характеристикой этого процесса на атомном уровне. Поэтому ее оценка представляет большой интерес. Ее величину можно получить, если измерить  $K = 1/\tau$  релаксационные зависимости при разных температурах, и можно оценить кинетические параметры процесса релаксации, в частности, энергию активации  $E$ . В связи с этим были проведены эксперименты по механической и электрической поляризации в интервале температур 20–200°С (см. таблицу).

### Методика измерений

Измерение релаксации ИЭП проводилось следующим образом. Образец помещался в термостат и выдерживался в нем при заданной температуре ~ 1 час, для надежного прогрева всего объема образца. Затем образец вынимался и сразу же проводились измерения, при механически упругом нагружении образца ( $P$ ), и при приложении разности потенциалов к специально закрепленным электродам на поверхность образца. При необходимости электроды могли заземляться.

Регистрация потенциалов электрического поля в образце производилась бесконтактным способом при помощи специально изготовленного электрометра (ЭМ) [7], с большим входным

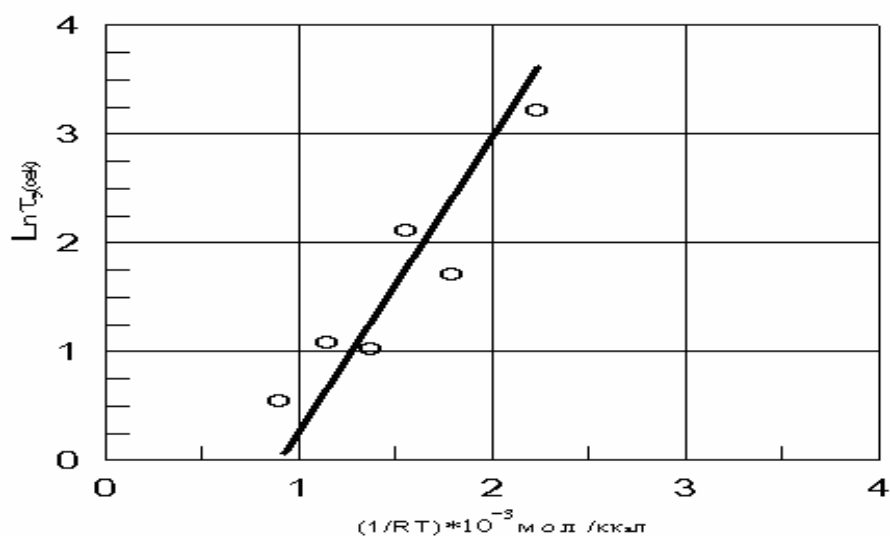
сопротивлением с последующей записью сбора и обработки входных токов  $\pm (0 \div 25)$  мА с входным сопротивлением 200 Ом и вход по напряжению:  $\pm 5$  В с входным сопротивлением 100 Ом., в систему A-Line 32D.

Электромтр (ЭМ) крепился на стойке с микрометрической подачей для сканирования вдоль поверхности исследуемого образца при зазоре 2 мм. Поскольку для испытаний при механическом упругом нагружении требуется больше время, чем при электрическом, основные количественные измерения были проведены для электрической поляризации. При механическом нагружении были проведены контрольные измерения.

В таблице 1., приведены температуры, при которых выдерживались образцы и время релаксации. Надо отметить, что разброс был достаточно велик. Поэтому для каждой температуры релаксационные зависимости измерялись для образцов. Оценка  $\tau$  производилась расчетным способом  $\tau_{1 \text{ расч.}}$ , в компьютер заносились значения  $\phi / \phi_{\text{max}}$  и считая, что экспериментальная зависимость подчиняется уравнению (1), оценивали характерное время релаксации. В таблице 1 приведены оба значения  $\tau$  и их среднее значение. После этого вычислялось  $1/RT$ , и строилась зависимость  $\ln \tau (1/RT)$ . Она показана на рис.1.

**Таблица 1.**

$T^{\circ}\text{C}$	$\tau_{1, \text{ расч}}$	$\tau_{2, \text{ граф}}$	$\tau_{\text{ср}} = \tau_1 + \tau_2 / 2$
20	35	18	26
60	18.8	12	15.1
100	17.8	11	14.4
140	13.6	7.7	10.3
180	13	8	10.8
200	10.9	7	8.95



**Рис.1.** Энергия активации, вычисленная из наклона зависимости.

Точки ложатся вдоль прямой линии, что свидетельствует о том, что релаксация действительно может быть описана термоактивационным уравнением аррениусовского типа (2). Самое важное, что энергия активации, вычисленная из наклона зависимости (рис.3), оказалась низкой  $E = 1,6-1,7$  ккал/моль, или 0,1 eV. Данные результаты согласуются с литературными данными. Действительно, электропроводность многих горных пород определяется примесными ионами с энергией активации – 0,1 eV.

На рис.2., а изображена диаграмма нагружения образца при упругой деформации.

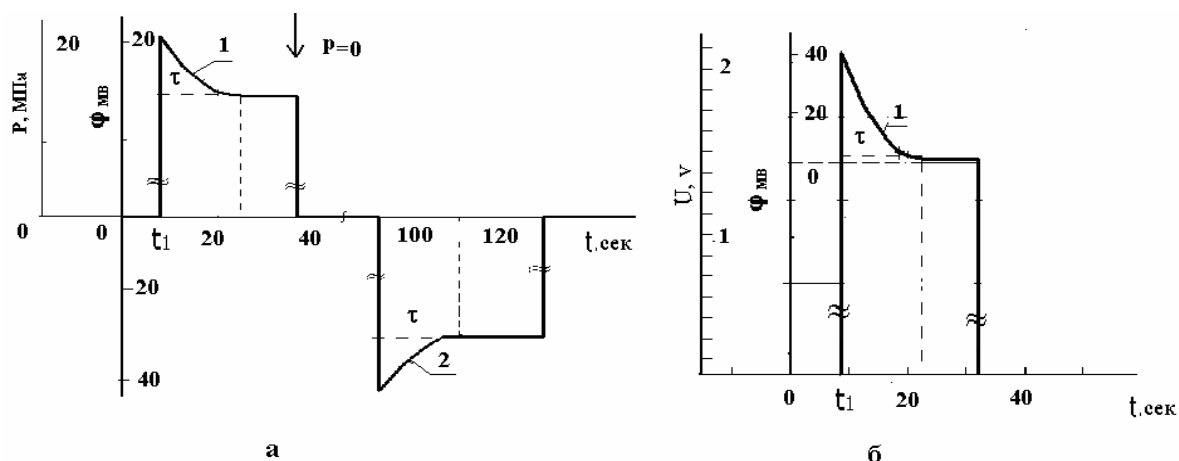


Рис.2

Как видно, при применении цифровой акустико-эмиссионной системы нового поколения A-Line 32D и специально изготовленного электрометра (ЭМ) с большим входным сопротивлением, измерения релаксации поляризации бесконтактным способом на образце при механическом нагружении при сжимающей нагрузке  $P$  и при приложении к электродам разности потенциалов, равной  $2V$ , при электрической поляризации образца из мрамора (рис 2.б), при зазоре 2 мм возникает аналогичное индуцированное электрическое поле (ИЭП), весь объем образца приобретает электрический момент, причем боковые поверхности образца имеют положительный аналогичной потенциал. Это может быть основанием для высказывания гипотезы, что по своей природе механическая поляризация близка электрической поляризации.

Что касается электрической поляризации то больших вопросов нет. Диполи ориентируются внешним электрическим полем и создают свое внутреннее электрическое поле. А для понимания механическую поляризацию и этого явления недостаточно только феноменологических исследований, проведенных в данной работе. Необходимо теоретическое развитие микроскопической модели, возможно ключом к модели может служить факт, что механическая поляризация пропорциональна градиенту механического поля (упругой силе), в таком случае можно градиент механического поля сопоставить с напряженностью электрического поля. Действительно, при изгибе образца [2] мы регистрируем индуцированное электрическое поле на порядок интенсивнее, чем при сжатии. В таком случае можно предположить, что градиент механического поля (упругой силы) определенным образом ориентирует полярные группы или диполи.

#### Заключение

а) Поляризация в механическом поле пропорциональна градиенту механического поля (упругой силе) и является упругой по своему характеру, т.е., следует за нагрузкой (упругой деформацией), под влиянием электрических полей между берегами растущих трещин.

б) Релаксация механической и электрической поляризации происходит за счет электронного возбуждения в свободных радикалах, образующихся при разрывах химических связей, (слабосвязанных примесных ионов) и является термоактивационным процессом.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-05-00639) и ФЦП, госконтракт № 02.740.11.0315.*

## Список литературы

1. Журков С.Н., Куксенко В.С., Махмудов Х.Ф., Панамарев А.В. // ДАН. 1997. т.35. в.4. С. 470-472.
2. Махмудов Х.Ф., Куксенко В.С. // ФТТ. 2005. т.47. в.5. С. 856-859.
3. Николаев В.И., Перцев Н.А., Смирнов Б.И. // Электропластический эффект в поляризованных сегнетоэлектрических кристаллах. ФТТ. 1991. т.33. в.1. С. 93-95.
4. Балакишиев Ш.А., Пархомко Э.И. и др. // Электропроводность горных пород при высоких температурах и давлениях, и факторы определяющие ее вариации. Наука, 1999. С. 167-174.
5. Дортман Н.Б. // Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. М.: Недра, 1984.
6. Пархоменко Э.И., Бондаренко А.Т. // Электропроводность горных пород при высоких давлениях и температурах. М.: Наука, 1972. 272с.
7. Махмудов Х.Ф. Автореферат. Санкт-Петербург, 1997. 22 с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Низина Т. А., Кисляков П. А.

*Мордовский государственный университет, Россия,*  
[nizinata@yandex.ru](mailto:nizinata@yandex.ru)

Техника и технологии не стоят на месте, и развивающаяся быстрыми темпами промышленность требует от науки всё новых разработок и передовых идей. Наибольшую активность в последние годы приобрели исследования, связанные с внедрением наносистем. Активное внедрение «наноидей» не обошло своим вниманием и строительную отрасль, особенно в области модификации традиционных строительных материалов (бетонов, цементных растворов, полимерных композиционных материалов, лакокрасочной продукции и т.д.) наночастицами различного вида.

Фуллерены, углеродные нанотрубки, алмазоподобные и фуллереноподобные структуры обладают уникальными и существенно различными физико-химическими свойствами, что позволяет получать композиционные материалы с широкими диапазонами значений различных свойств. На сегодняшний день экспериментально доказано, что введение наночастиц даже в гомеопатических дозах позволяет получать промышленно значимые макроэффекты [1 – 3].

Данная работа посвящена исследованию наномодифицированных эпоксидных композиционных материалов, широко используемых в строительной отрасли в качестве защитных пропиток и покрытий, повышающих несущую способность, химическую стойкость и долговечность бетонных элементов строительных конструкций. Их эффективное использование обусловлено положительными свойствами эпоксидного полимера, отличительными качествами которого являются высокая ударная прочность и стойкость к истиранию, повышенная прочность при изгибе, низкая деформативность, хорошая химическая и водостойкость. Высокие характеристики данных композитов нашли своё применение в разработке наливных полов, различных пропиток, клеевых составов и разнообразных декоративных штукатурок.

Однако эпоксидные композиции обладают низкой вязкостью, что приводит к необходимости их модификации путем введения пластификаторов и растворителей, как правило, снижающих прочностные параметры. Как показали результаты проведенных исследований [1, 3], дополнительные эффекты пластификации без потери упругопрочностных характеристик могут быть достигнуты за счет введения наночастиц. Однако в подобных случаях возникает необходимость в разбивании агрегатов наночастиц