

05.2

© 1991

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПОЛИМЕРОВА.И. С л у ц к е р, Т.М. В е л и е в,
И.К. А л и е в а, В.А. А л е к п е р о в,
С.А. А б а с о в

Электрическая прочность – это устойчивость диэлектриков к электрическому пробую. Для полимеров (как и для ряда других диэлектриков) установлено, что сам пробой является завершающим актом процесса подготовки полимера к наступлению пробоя. Об этом свидетельствуют результаты экспериментов по обнаружению и изучению „электрической долговечности” τ – времени ожидания пробоя при приложении к полимерным образцам электрической напряженности E (постоянной или переменной) [1–3]. Величина τ закономерно снижается с ростом E [1–3]. Таким образом, долговечность выступает характеристикой электрической прочности, включающей кинетику подготовительного процесса. Было показано, что при действии постоянного электрического поля этот процесс является накопительным и заключается в постепенном формировании в полимере объемного электрического заряда, достижение которым некоторого критического значения и вызывает пробой [3]. Таким образом, формирование заряда и является фактором, снижающим электрическую прочность. В то же время показано, что накопившиеся заряды можно ликвидировать (нагреванием объектов или включением электрического поля противоположной полярности), и тем самым осуществить регенерирование исходного прочностного состояния полимера [3]. Таким образом, имеются возможности манипулирования зарядово-прочностным состоянием полимера.

В настоящей работе исследуется возможность использовать манипулирование накапливающимся зарядом в качестве фактора повышения электрической прочности (долговечности) полимеров.

Объектами служили пленки полиэтилена (ПЭ) и полиэтилентерефталата (ПЭТФ) толщиной в несколько десятков мкм. Электрическое нагружение и пробой проводились в ячейках с прижимными электродами диаметром 18 мм при постоянном по знаку электрическом напряжении. Измерялось время между моментом приложения напряжения и наступления пробоя – долговечность τ .

Как известно [1, 3], значения долговечности для внешне идентичных образцов и условий электрического нагружения (напряженность поля E , температура T) отличаются широким разбросом (1–2 десятичных порядка по долговечности). Поэтому требуется

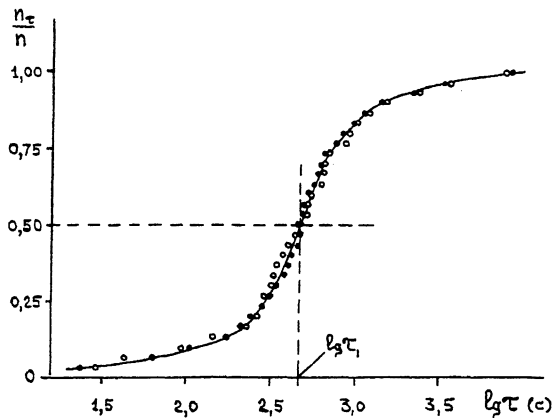


Рис. 1. Интегральное распределение образцов ПЭ по времени ожидания пробоя (долговечности) в постоянном электрическом поле, $E=5 \cdot 10^8$ В/м. Температура 200 К. Светлые и черные точки отвечают противоположным полярностям поля.

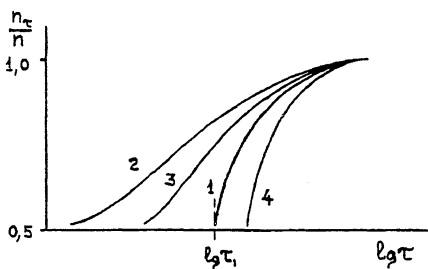


Рис. 2. Схема распределения по долговечности. 1 – бывшие непробитыми после выдержки в течение времени τ_1 , 2 – то же распределение по $lg(\tau - \tau_1)$ по вторичной долговечности (после перерыва) при отсутствии регенерации, 3 – распределение по вторичной долговечности тех же образцов при частичной регенерации, 4 – распределение по вторичной долговечности тех же образцов при их упрочнении.

соответствующий статистический учет этого обстоятельства для выявления закономерностей кинетики электрического разрушения. Пример распределения серий из 30 образцов полиэтилена по долговечности приведен на рис. 1. По оси ординат отложено отношение n_τ/n , где n_τ – число образцов, пробившихся на протяжении времени τ , n – полное число образцов.

Видно, что кривая интегрального распределения по $lg \tau$ имеет S-образную форму, что отвечает унимодальному распределению,

близкому к нормальному (интегралу вероятности). При постоянных значениях $E=5 \cdot 10^8$ В/м и $T=200$ К на рис. 1 приведены данные для двух направлений (полярностей) приложенного поля. Распределения практически совпадают, что устанавливает симметричность испытательной ячейки. Последнее будет существенным при дальнейших манипуляциях. Из рис. 1 можно найти среднее значение логарифма долговечности, отвечающее времени τ_1 , в течение которого происходит пробой половины числа электрически нагруженных образцов. Таким образом, взяв новую серию таких же образцов и выдержав их при данных E и T в течение времени τ_1 , получим половину числа образцов в серии, подвергнутых действию поля, но еще „не дождавшихся“ пробоя. С ними и производятся следующие операции.

Дальнейший анализ поясняет схема на рис. 2. Кривая 1 — это опорная кривая, отвечающая распределению по долговечности второй половины числа образцов на рис. 1, т.е. имеющих долговечность большую, чем τ_1 . Если после выдержки τ_1 и снятия напряжения накопившиеся изменения полностью сохраняются, то после повторного включения поля той же величины и знака распределение оставшихся образцов по вторичной долговечности τ_2 должно пройти левее кривой 1, т.е. в виде кривой 2. Полному отсутствию регенерации должно отвечать такое положение кривой 2, которое соответствует перестроению кривой 1 в координатах $lg(\tau - \tau_1)$. Если за время перерыва действия поля одного и того же знака в оставшихся образцах произошли или были вызваны температурой или действием противоположно уменьшения накопившихся изменений, то тогда распределение по вторичной долговечности должно пройти между кривыми 2 и 1 (кривая 3). Может произойти и наложение кривой 3 на кривую 1 — полная регенерация. И, наконец, если в результате, например, переключений поля в образцах произойдут упрочняющие изменения, то распределение по вторичной долговечности должно пройти правее кривой 1 — кривая 4.

Данные, отвечающие экспериментальному наблюдению кривых 2 и 3 для ряда полимеров, приведены в [3]. Они показывают, что изменения, накопившиеся в образцах за время τ_1 , сохраняются, если в перерыве образец не нагревать или же не подвергать действию противоположно. Путем же нагревания или же приложения противоположно (в перерыве) достигалось перемещение распределения по вторичной долговечности от кривой 2 до кривой 1, что отвечало той или иной степени регенерации накопившихся за время τ_1 изменений [3]. Именно это (особенно данные по регенерирующему действию противоположно) и привело к заключению, что процесс подготовки образцов к пробую связан, прежде всего, с формированием объемных электрических зарядов (скорее всего, с накоплением электронов в ловушках). И тогда возникает вопрос — может ли этот процесс приводить не только к приближению потери электрической устойчивости (т.е. к приближению пробоя), но и к повышению электрической устойчивости?

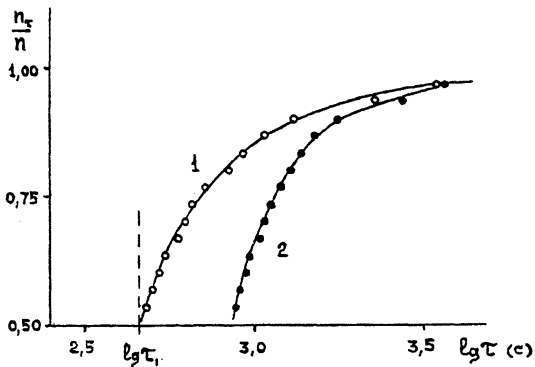


Рис. 3. Интегральное распределение образцов ПЭ по долговечности, $E=5 \cdot 10^8$ В/м. Температура 200 К. 1 – пробитые после выдержки в течение времени $\tau_1=470$ с без смены полярности поля, 2 – пробитые после выдержки в течение времени $\tau_1=470$ с со сменой после этого полярности поля.

Выяснение этого вопроса производилось следующим простым способом. Серию образцов (30 шт.) выдерживали под действием постоянного поля ($E=5 \cdot 10^8$ В/м) данной полярности в течение времени τ_1 ($\tau_1=470$ с). Затем оставшуюся половину числа образцов при той же температуре ($T=200$ К) выдерживали под действием поля той же напряженности ($E=5 \cdot 10^8$ В/м), но противоположной полярности, до наступления пробоя образцов. Распределение этой части образцов по их вторичной долговечности показано на рис. 3 (кривая 2). Видно, что произошло смещение кривой распределения вправо от опорной кривой 1, т.е. в сторону возрастания долговечности. Это означает, что образцы, предварительно выдержанные в поле одной полярности, оказались более электрически прочными по отношению к полю противоположной полярности.

Результаты поляризационного упрочнения полимерных образцов были получены и в опытах несколько иного типа на пленках ПЭТФ. Измерялась зависимость электрической долговечности от напряженности поля данной полярности. Результаты подобных измерений для $T=293$ К приведены на рис. 4 (зависимость 1). Каждая точка на графике является результатом усреднения по 10 измерениям τ при каждом значении E .

Большую серию таких же образцов подвергали предварительному воздействию постоянного поля напряженностью $4,3 \cdot 10^7$ В/м в течение 1 часа при 393 К. Затем измерялась электрическая долговечность таких образцов при 293 К как при той же полярности поля, так и при противоположной. Если полярность поля совпадала с полярностью поля предварительной выдержки, то наблюдалось уменьшение долговечности образцов (рис. 4, зависимость 2). Если же полярность была противоположной, то долговечность образцов

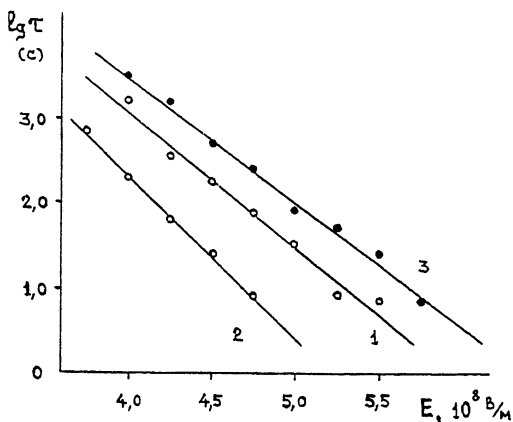


Рис. 4. Зависимость долговечности ПЭТФ от напряженности постоянного (по знаку) электрического поля. Температура 293 К. 1 – образцы без предварительной электризации; 2, 3 – образцы после выдержки в постоянном поле $E=4.3 \cdot 10^7$ В/м в течение 1 часа при 393 К. 2 – пробитые в поле той же полярности, 3 – пробитые в поле противоположной полярности.

возрастала (рис. 4, зависимость 3) и превышала долговечность исходных (не подвергавшихся предварительной электризации) образцов.

Таким образом, предварительная выдержка полимерных образцов в постоянном электрическом поле снижает их долговечность при действии поля той же полярности и повышает долговечность для поля противоположной полярности. Созвучные этому результаты описаны в [4]. Это подтверждает соображение о том, что процесс подготовки диэлектрика (в данном случае – полимерного) к пробое заключается в формировании бинарных объемных зарядов (двойных электрических слоев), т.е. поляризованных гетерозарядов [5].

В такой картине требуют выяснения вопросы происхождения этих зарядов: за счет инжекции из электродов, или же за счет внутренней ионизации полимерных молекул, возможность которой рассмотрена в [6].

При буквальном перенесении описанных поляризационных явлений на электрическое разрушение полимеров в переменном поле там следовало бы ожидать чуть ли не бесконечной долговечности. Однако, как хорошо известно [1], в переменном поле пробой наступает даже быстрее, чем в постоянном (при равенстве значений амплитуд переменного и напряженности постоянного). Таким образом, выяснение общих и специфических моментов в механизме электрического разрушения для постоянных и переменных полей приобретает еще большую актуальность.

И, наконец, возможности технического использования „электретного“ упрочнения полимерных диэлектриков также могут служить предметом дальнейших разработок.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Электрические свойства полимеров. / Под ред. Б.И. Сажина. Л.: Химия, 1970. 376 с.
- [2] Бережанский В.Б., Быков В.М., Городов В.В., Закревский В.А., Слуцкер А.И. // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 8. С. 1663-1666.
- [3] Слуцкер А.И., Велиев Т.М., Алиева И.К., Алекперов В.А., Абасов С.А. // ФТТ. 1990. Т. 32. В. 8. С. 2339-2344.
- [4] Branwell A., Cooper R., Varlov B. // Proc. Inst. Eng. 1971. V. 118. P. 247-254.
- [5] Дахия М.С., Закревский В.А., Слуцкер А.И. // ФТТ. 1987. Т. 29. В. 12. С. 3614-3619.
- [6] Закревский В.А., Слуцкер А.И. // Высокомолекулярные соединения. 1984. Т. 26 (А). В. 6. С. 1201-1206.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
14 мая 1991 г.