

УДК 541.64:537.8

ЭЛЕКТРОМАГНИТОПЛАСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В АМОРФНОМ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТЕ¹

© 2002 г. Р. Б. Моргунов*, Ю. И. Головин**, Д. В. Якунин**, И. Н. Трофимова**

*Институт физики твердого тела Российской академии наук
142432 Московская обл., п/о Черноголовка

**Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина
392622 Тамбов, ул. Интернациональная, 33

Поступила в редакцию 21.03.2001 г.

Принята в печать 02.07.2001 г.

Обнаружено совместное влияние постоянного магнитного и переменного электрического полей на пластичность ПММА. Полученные экспериментальные данные позволяют предполагать, что ранее обнаруженные эффекты влияния импульсного магнитного поля на пластичность линейных аморфных полимеров вызваны совместным действием вихревого электрического и магнитного полей.

В работе [1] сообщалось об обнаружении влияния импульсного магнитного поля (МП) на пластичность линейных аморфных полимеров. Было показано, что роль импульсного МП, действующего в течение сравнительно короткого времени ($\tau \sim 100$ мкс), не может заключаться в инициации длительной ($\sim 10^6$ – 10^7 с при 293 К) переориентации макромолекул, характеризующихся анизотропией магнитных свойств. Это заставляет отказаться от интерпретации упомянутого эффекта в духе работ [2–5], в которых изменение пластичности стимулировали не импульсным, а постоянным МП в течение многих суток. В работе [6] было показано, что величина разупрочнения полимеров, вызванного импульсным МП, сильно зависит от подвижности боковых групп макромолекул. Наличие электрического дипольного момента p у этих групп [7], а также неизбежное присутствие вихревого электрического поля с напряженностью $E \sim Vr/\tau \sim 10^3$ – 10^4 В/м (амплитуда импульсов МП $V = 10$ – 20 Тл, размер образца $r \sim 1$ см) при экспозиции образцов в импульсном МП позволяют предполагать, что наряду с магнитным полем существенную роль в исследуемом эффекте может играть переменное электрическое поле.

Цель работы – создание экспериментальных условий для установления роли электрической и магнитной составляющей импульсного магнитного поля, вызывающего изменение пластичности ПММА.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 01-03-42501 и 01-02-06307 (МАС)), а также Министерства образования Российской Федерации (код проекта Е 00-3.4-552).

E-mail: morgunov@issp.ac.ru (Моргунов Роман Борисович).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Основная идея экспериментов заключалась в сравнении изменения пластичности полимеров под влиянием комбинации вихревого электрического и магнитного полей, одновременно действующих при экспозиции образцов в импульсном МП, с величиной эффекта, который вызывается одновременным действием постоянного магнитного и переменного электрического полей известной амплитуды и частоты.

Импульсное МП, имеющее форму, близкую к полупериоду синусоиды длительностью $\tau = 10^{-5}$ – 10^{-2} с с амплитудой $V = 20$ Тл, создавали при разряде батареи конденсаторов через маловитковый соленоид. Регулировка его индуктивности позволяла варьировать длительность импульсов МП. Постоянное МП получали с помощью электромагнита. Переменное электрическое поле создавалось генератором в пространстве между обкладками плоского конденсатора, в который помещали исследуемые образцы. Использовали ПММА марки СО-95, пластифицированный дибутилфталатом. Электрический контакт между образцом и обкладками конденсатора отсутствовал.

Характеристикой пластичности ПММА служила микротвердость H . Об изменении H после экспозиции образцов в различных электрических и магнитных полях судили по величине диагонали отпечатка, создаваемого с помощью алмазной пирамиды Виккерса на микротвердомере ПМТ-3 (нагрузка на индентор 0.2 Н, длительность нагружения 10 с). Каждую точку на графиках получали усреднением 10–15 отдельных измерений микротвердости.

Во всех опытах образцы сначала индентировали для определения исходного значения микро-

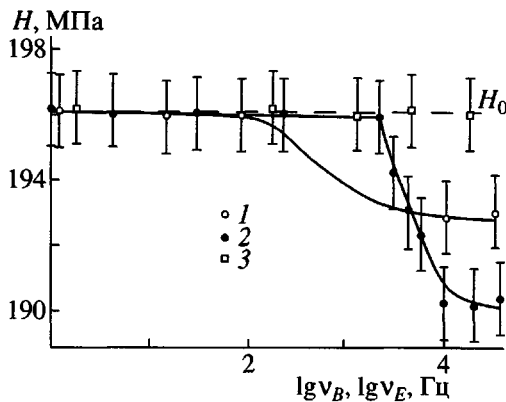


Рис. 1. Зависимости микротвердости ПММА от частоты основной гармоники ν_B в спектре фурье импульса магнитного поля при $B = 20$ Тл (1); от частоты ν_E переменного электрического поля ($E = 20$ кВ/м) при его совместном действии с постоянным МП при $B \sim 2$ Тл (2) и от частоты переменного электрического поля, приложенного в отсутствие МП (3). Штриховой линией показано значение микротвердости H_0 образцов, не подвергавшихся действию магнитных и электрических полей.

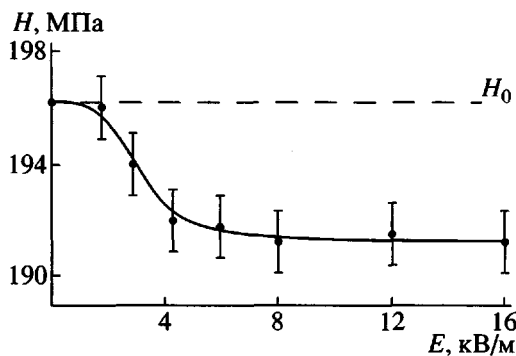


Рис. 2. Зависимость микротвердости ПММА H от напряженности переменного электрического поля E с частотой $\nu_E = 1.5 \times 10^4$ Гц при фиксированной индукции постоянного МП $B = 0.6$ Тл.

твердости H_0 , затем подвергали экспозиции в импульсном или постоянном МП, действующем совместно с переменным электрическим полем или в его отсутствие. Через фиксированное время (5 мин) после экспозиции в электрических и(или) МП производили еще одно измерение микротвердости H . Так как экспозиция образцов в МП и определение H были во всех опытах разделены во времени, МП не могло подействовать на подвижные части ПМТ-3 и привести к артефактам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения роли вихревого электрического поля в магнитоэлектрическом эффекте сравнивали результаты двух серий экспериментов. В первой

серии опытов, в которой экспозицию образцов ПММА производили в импульсном МП с различной частотой основной гармоники $\nu_B = 1/2\tau$ и одинаковой амплитудой импульсов, было обнаружено пороговое значение $\nu_B^* \sim 10^3$ Гц. При $\nu_B^* < \nu_B$ изменение пластичности образцов не наблюдали (рис. 1, кривая 1). Во второй серии опытов импульсное МП заменяли одновременным действием постоянного МП ($B \sim 0.8$ Тл) и переменного электрического поля с частотой $\nu_E = 10^2-10^4$ Гц и амплитудой $E = 2 \times 10^4$ В/м. Такая обработка образцов в течение 30 мин также приводит к их разупрочнению, причем при $\nu_E < 3 \times 10^3$ Гц разупрочнения ПММА не наблюдали (кривая 2). Отметим, что само по себе переменное электрическое поле, приложенное в отсутствие постоянного МП в течение 30 мин, не вызывает изменений микротвердости ни при каком значении ν_E из исследованного диапазона (кривая 3). Примечательно, что ν_E^* и ν_B^* близки друг к другу по порядку величины, а взаимная ориентация векторов B и E при совместном действии МП и электрического поля не влияет на величину эффекта разупрочнения полимеров.

Увеличение напряженности переменного электрического поля ($\nu_E = 1.5 \times 10^4$ Гц) при постоянной индукции постоянного МП $B = 0.6$ Тл приводит к снижению микротвердости ПММА при $E < 8 \times 10^3$ В/м. При дальнейшем повышении E изменение пластичности остается постоянным, т.е. наблюдается насыщение эффекта разупрочнения (рис. 2). Если постоянной остается амплитуда электрического поля $E = 10^4$ В/м с частотой $\nu_E = 1.5 \times 10^4$ Гц, а индукция постоянного МП изменяется, то насыщение эффекта разупрочнения образцов наблюдали при $B = 0.6-0.8$ Тл (рис. 3).

Хорошее согласие между найденной в наших опытах критической частотой переменного электрического поля при его совместном действии с постоянным МП и пороговой частотой основной гармоники импульса МП (рис. 1) указывает на существенную роль вихревого электрического поля в магнитоэлектрическом эффекте. Учитывая, что боковые группы макромолекул в изучаемых полимерах обладают дипольным моментом, можно предполагать, что роль электрического поля заключается в иницировании их вращения. Поскольку одно только переменное электрическое поле в отсутствие постоянного МП не влияет на пластичность полимеров, исследуемый эффект может быть назван электромагнитоэлектрическим. Необходимость присутствия электрической компоненты наряду с магнитной свидетельствует о возможной существенной роли электрического дипольного момента боковых групп макромолекул.

Отметим, что пороговая длительность $\sim 10^{-3}$ с импульса МП, влияющего на чувствительность полимеров к МП, совпадает по порядку величины с временем ожидания попытки преодоления барьера τ_0 , полученным из уравнения Аррениуса $\tau = \tau_0 \exp(U_i/kT)$, если в качестве энергии активации принята величина, найденная для ПММА из термоактивационного анализа процесса восстановления пластичности после экспозиции в МП, а в качестве характерного времени τ выбрана длительность этого восстановления: $\tau \sim 10^5$ с при 293 К [6]. Другими словами, если длительность воздействия МП и вихревого электрического поля меньше характерной длительности ожидания термоактивированных попыток релаксации, то импульс МП эффективно влияет на пластичность полимеров. В противном случае, когда длительность воздействия велика по сравнению с τ_0 , магнитоэластический эффект отсутствует. Такая ситуация реализуется при исследовании влияния импульсного МП на электрофизические и оптические свойства монокристаллов Si [8]. Это указывает на возможную общность механизмов влияния импульсного МП на пластичность и другие свойства твердых тел с ковалентным и молекулярным типами связи.

Энергия, сообщаемая магнитной компонентой импульсного МП ($B \sim 20$ Тл, $\tau \sim 10^{-4}$ с) звеньям и боковым группам макромолекул, составляет $U_m = \mu_B B \sim 10^{-4} - 10^{-3}$ эВ, а электрической компонентой (от вихревого электрического поля) $U_e \approx \rho E \sim 10^{-7}$ эВ. Это значительно меньше энергии активации вращения боковых групп $U \sim 0.3$ эВ. Однако с учетом экспериментально найденного числа импульсов магнитного поля N , необходимых для насыщения магнитоэластического эффекта (например, при $B = 20$ Тл величина $N \sim 3$, а при $B = 2$ Тл величина $N \sim 50$), суммарная сообщаемая энергия в расчете на одну боковую группу сопоставима с U . В случае замены импульсного МП статическим, а вихревого электрического поля внешним переменным электрическим полем рав-

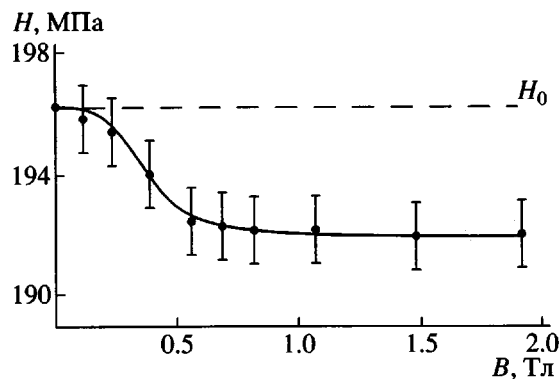


Рис. 3. Зависимость микротвердости ПММА H от индукции B постоянного МП при постоянной амплитуде переменного электрического поля $E = 1.2 \times 10^3$ В/м с частотой $\nu_E = 1.5 \times 10^4$ Гц.

ной напряженности насыщение наступает после $\sim 10^7$ импульсов электрического поля. Эта величина обеспечивает накопление энергии, которая сопоставима или даже превышает U . Установление путей перераспределения такой энергии и физических механизмов электромагнитоэластического эффекта требует дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Ликсутин С.Ю. // Высокомолек. соед. Б. 1998. Т. 40. № 2. С. 373.
2. Песчанская Н.Н., Якушев П.Н., Синани А.Б. // Физика твердого тела. 1998. Т. 40. № 4. С. 681.
3. Жорин В.А., Мухина Л.Л., Разумовская И.В. // Высокомолек. соед. Б. 1998. Т. 40. № 7. С. 1213.
4. Песчанская Н.Н., Суrowова В.Ю., Якушев П.Н. // Физика твердого тела. 1992. Т. 34. № 7. С. 2111.
5. Deshpande G.K., Khare M.L. // Indian J. Pure and Appl. Phys. 1979. V. 17. № 3. P. 143.
6. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Ликсутин С.Ю. // Высокомолек. соед. А. 2000. Т. 42. № 2. С. 277.
7. Бартенеv Г.М., Бартенева А.Г. Релаксационные свойства полимеров. М.: Химия, 1992.
8. Левин М.Н., Зон Б.А. Журн. эксперим. и теорет. физики. 1997. Т. 111. № 4. С. 1373.

Electromagnetoplastic Effect in Amorphous Poly(methyl methacrylate)

R. B. Morgunov*, Yu. I. Golovin**, D. V. Yakunin**, and I. N. Trofimova**

*Institute of Solid-State Physics, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow oblast, 142432 Russia

**Tambov State University, ul. Internatsional' naya 33, Tambov, 392622 Russia

Abstract—A joint effect of a static magnetic field and an alternating field on the plasticity of PMMA was revealed. The experimental data obtained suggest that the previously discovered effects of a pulse magnetic field on the plasticity of linear amorphous polymers are due to the combined action of a vortex electric field and the magnetic field.