

УДК 620.164.1, 620.174.21, 620.174.25

ВРЕМЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА МОНОЛИТНОГО ПРОЗРАЧНОГО ПОЛИКАРБОНАТА НА ИЗГИБНУЮ ДЕФОРМАЦИЮ

Е. А. БОБИНА, М. П. ДАНИЛАЕВ, М. А. КЛАБУКОВ, В. А. КУКЛИН

Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А. Н. Туполева
Казань, Россия

UDC 620.164.1, 620.174.21, 620.174.25

PIEZOELECTRIC RESPONSE TIME SETTING OF MONOLITHIC TRANSPARENT POLYCARBONATE TO BENDING DEFORMATION

E. A. BOBINA, M. P. DANILAEV, M. A. KLABUKOV, V. A. KUKLIN

Аннотация. Расширение областей применения прозрачных монокристаллических органических стекол (поликарбонат, полиметилметакрилат) требует контроля изменения предела прочности этих материалов и изделий из них в процессе эксплуатации. Перспективный метод бесконтактного контроля изменения предела прочности прозрачных монокристаллических материалов основан на пьезоэффекте. В работе определялось временное ограничение установления пьезоотклика на приложенную нагрузку, что является важным при циклических нагрузках, происходящих с разными скоростями.

Ключевые слова: пьезоэффект в полимерах, предел прочности поликарбоната.

Abstract. Expanding the scope of application of transparent monolithic organic glasses (polycarbonate, polymethylmethacrylate) requires monitoring during operation of changes in the tensile strength of these materials and their products. A promising method of contactless control of changes in the tensile strength of transparent monolithic materials is based on the piezoelectric effect. In this work we determined the time limitation of establishing the piezoelectric response to the applied load which is important for cyclic loads occurring at different speeds.

Key words: piezoelectric effect in polymers, polycarbonate tensile strength diagnostics.

Для неинвазивного контроля изменения предела прочности прозрачных монокристаллических органических стекол в процессе эксплуатации применяют различные методы, рассмотренные, например, в [1–4]. Один из перспективных методов неинвазивного контроля изменения предела прочности монокристаллических органических стекол основан на использовании пьезоэлектрического эффекта в полимерах [5].

Механизмом пьезоэффекта в полимерах является поляризация молекул полимера вследствие изменений в структуре материала под действием механических напряжений деформаций [6]. Поэтому использование пьезоэлектрического эффекта позволяет осуществлять контроль изменений в структуре материала, накопление которых приводит к изменению (как правило, уменьшению) предела прочности. Таким образом, по результатам измерений пьезонапряжения возможно прогнозировать изменение предела

прочности полимерного материала, проявляющего пьезоэлектрические свойства.

Однако применение такого метода требует выявления ограничений его использования. Основные ограничения могут быть связаны: с ограниченным динамическим диапазоном пьезонапряжения, в котором наблюдается воспроизводимое соответствие этого напряжения и силы отклика образца на приложенную внешнюю нагрузку; ограничением снизу на время τ_0 установления пьезоотклика на приложенную внешнюю нагрузку; отношением сигнал/шум при измерении пьезоотклика и рядом других. Временное ограничение τ_0 является особенно важным при циклических нагрузках на материал, происходящих с разными скоростями. Следует отметить, что величина τ_0 может изменяться при различной интенсивности внешних нагрузок. Это обусловлено структурой (как молекулярной, так и надмолекулярной) полимерного материала и ее откликом на внешнее механическое воздействие [7].

Целью настоящей работы является определение изменения величины τ_0 при различных деформациях на образец монолитного прозрачного поликарбоната.

Метод и ограничения метода. Определение изменения значений τ_0 осуществлялось экспериментально на образцах монолитного прозрачного поликарбоната марки Novattro $100 \times 100 \times 3$ мм. Образцы монолитного прозрачного поликарбоната деформировали на трехточечный изгиб на машине для механических испытаний Shimadzu с одновременным измерением пьезонапряжения и динамики его изменения по схеме, приведенной в [5]. Нагружение образцов осуществлялось до заданной деформации со скоростью 5 мм/мин, с последующим выдерживанием образцов под постоянной нагрузкой [8]. Пьезонапряжение U измерялось вольтметром В7-78/1 (входное сопротивление ~ 10 ГОм) с погрешностью измерений не более 10 %. Electroды для определения пьезонапряжения представляли собой напыляемое электропроводящее медное покрытие с подклеенными к нему проводами. Electroды наносили на противоположные стороны образцов. Схема нанесения electroдов и их размеры представлены в [5].

Результаты измерений силы P отклика образца на механическое воздействие при деформации на изгиб определялись с использованием программного обеспечения TRAPEZIUM X, погрешности измерений не превышали ± 5 %. Были выбраны значения деформации, соответствующие трем областям.

1. Упругие деформации – $P \sim (275,7 \pm 13,7)$ Н.
2. Упругие деформации, предшествующие трещинообразованию, – $P \sim (614,7 \pm 30,7)$ Н.
3. Начало трещинообразования – $P \sim (776,7 \pm 38,8)$ Н.

Эти значения были установлены экспериментально по результатам предварительных испытаний. После достижения соответствующей деформации нагрузка останавливалась и образец находился под нагрузкой до установления постоянной величины пьезонапряжения $U = \text{const}$.

Результаты экспериментов. Результаты измерений приведены на рис. 1 (измерения с образцов, нагруженных в областях деформации 1, 2 и 3 соответственно).

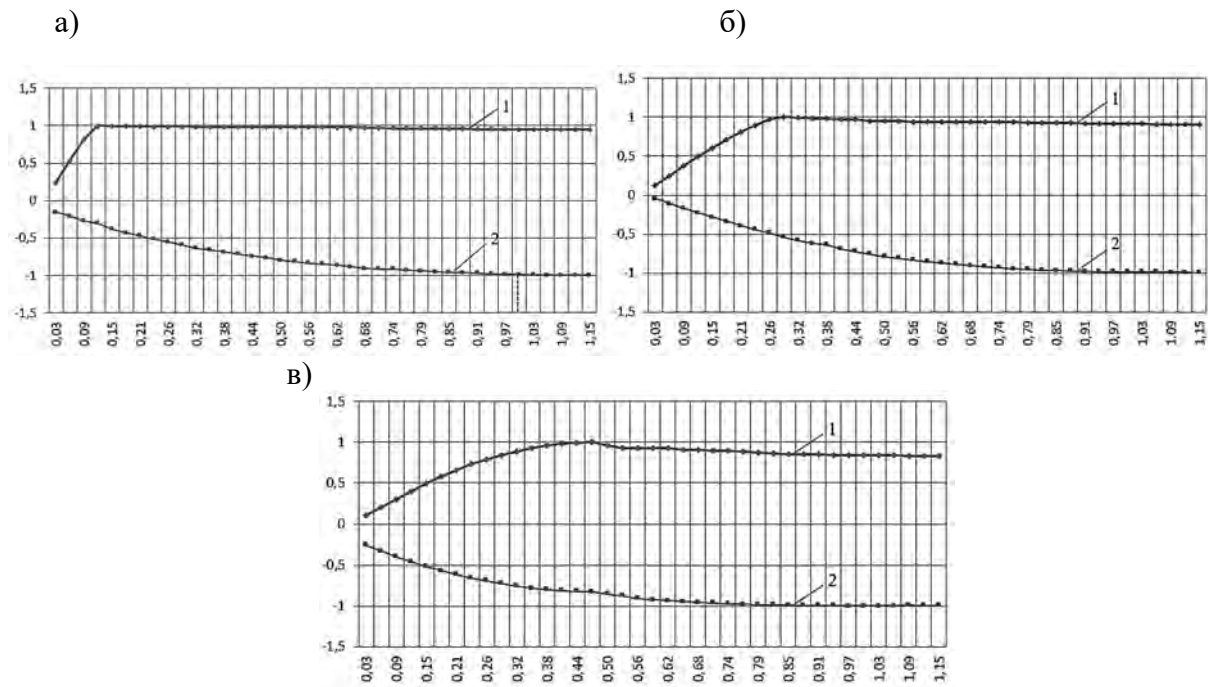


Рис. 1. Типовые временные зависимости нормированных силы нагружения P (1) и пьезонапряжения U (2)

Нормировка пьезонапряжения U проводилась на усредненное (среднее арифметическое по нескольким измерениям одного из образцов) максимальное значение, которое в эксперименте составило: для образцов 1 области деформации (см. рис.1, а) – $U_{1\text{max}} = (4,3 \pm 0,4)$ В; для образцов 2 области деформации (см. рис. 1, б) – $U_{2\text{max}} = (4,07 \pm 0,4)$ В; для образцов 3 области деформации (см. рис. 1, в) – $U_{3\text{max}} = (3,98 \pm 0,3)$ В. Вдоль оси абсцисс отложено нормированное время измерений. Нормировка проводилась по времени выхода на квазистационарный уровень пьезонапряжения, абсолютное значение которого составило $\tau_{\text{норм}} = 340$ с, на рис. 1, а оно показано пунктирной линией.

Эксперименты показали, что времена установления пьезонапряжения τ_{0j} – для трех ($j = 1, 2, 3$) вариантов нагружения (см. рис. 1, а–в соответственно) – уменьшаются с ростом деформации, а времена τ_{Mj} установления силы P отклика образцов на деформацию возрастают. График

зависимости отношения соответствующих времен установления $\alpha(P) = \tau_{0j}/\tau_{Mj}$ от силы P отклика образца представлен на рис. 2.

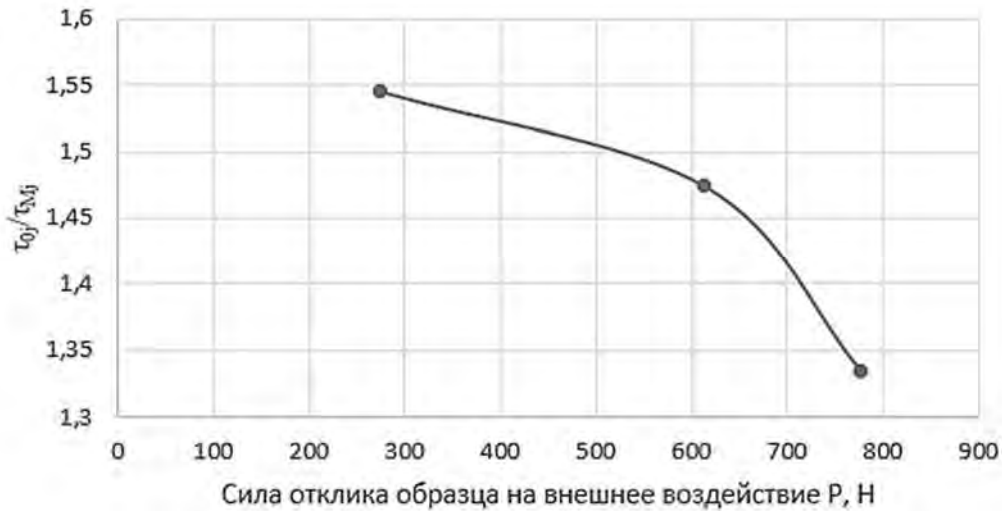


Рис. 2. График зависимости отношения времен релаксации τ_0/τ_{Mj} от силы отклика образца на механическое воздействие P

Таким образом, при большей деформации установление пьезонапряжения происходит быстрее, а время установления пьезонапряжения становится сопоставимо с временем установления силы отклика образца на механическое воздействие. Это объясняется тем, что при большем значении силы нагружения P ориентация молекул происходит быстрее, а значит быстрее происходит и поляризация и, как следствие, пьезоотклик [9].

Выводы. Проведенные исследования показали, что задержка $\alpha(P)$ пьезоэлектрического отклика относительно механического отклика с ростом деформации уменьшается. Это обуславливает увеличение числа высокочастотных составляющих в спектре сигнала пьезонапряжения. Следует отметить, что при малых деформациях изменения в структуре материала маловероятны. Поэтому рост числа высокочастотных составляющих только выше частоты $f_0 = 1/\tau_{02}$, что свидетельствует о начале структурных изменений в материале. Это может быть использовано для контроля изменения предела прочности монолитного прозрачного поликарбоната. Однако абсолютные значения f_0 находятся в области низкочастотных шумов радиоаппаратуры. Это следует учитывать при выборе метода измерения пьезонапряжения и проектировании соответствующих принципиальных схем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамов, А. Ю.** Исследование процессов растворимости и диффузии полимера методом лазерной интерферометрии / А. Ю. Абрамов, В. П. Рябухо, А. Б. Шиповская // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77, вып. 12. – С. 45–50.
2. **Хомченко, А. В.** Поляризационная интерферометрия закаленного стекла / А. В. Хомченко, И. У. Примак, А. Н. Василенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 14–15 апр. 2016 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – С. 286–287.
3. Диагностика технических устройств / Г. А. Бигус [и др.]. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 615 с.: ил.
4. **Жданов, Г. С.** Основы рентгеноструктурного анализа / Г. С. Жданов. – Москва; Ленинград, 1940.
5. **Бобина, Е. А.** Определение механических напряжений, возникающих в полимерных стеклах в процессе эксплуатации / Е. А. Бобина, Л. А. Гимадеева, М. П. Данилаев // ИВД. – 2018. – № 2 (49).
6. **Nalwa, H.** Ferroelectric Polymers / H. Nalwa // Marcel Dekker. – Inc. – New York, 1995. – 895 p.
7. Энциклопедия полимеров: в 3 т. / В. А. Каргин [и др.]. – Москва: Сов. энциклопедия, 1972.
8. **ГОСТ 4648–2014 (ISO 178:2010).** Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб (с поправками).
9. Применение методики сканирующей силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика для исследования плёнок полидифениленфталата / Д. Д. Карамов [и др.] // Вестн. ЧелГУ. – 2015. – № 22 (377). – С. 9–14.