

05

## Повреждение полиметилметакрилата при локализованном ударе до и после перехода через температуру стеклования

© И.П. Щербаков, А.Е. Чмель

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: chmel@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 6 июня 2024 г.

В окончательной редакции 15 августа 2024 г.

Принято к публикации 17 сентября 2024 г.

Ударная волна в полиметилметакрилате возбуждалась заостренным маятниковым копром. Выделение энергии при деформации материала и образовании микротрещин регистрировалось методом акустической эмиссии в двух диапазонах частот: 80–200 и 600–800 kHz. Низкочастотные серии акустической эмиссии отнесены к деформации материала, тогда как высокочастотная эмиссия связана с образованием микротрещин. Измерения проведены при температурах образцов от комнатной до 110°C, что немного превышает температуру стеклования полимера (104°C). Относительный вклад энергии деформации превалировал при всех температурах. Выше температуры стеклования полимера в активности акустической эмиссии появились признаки деформационного упрочнения.

**Ключевые слова:** полиметилметакрилат, ударное повреждение, акустическая эмиссия.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.02.59559.20014

Термопластичный полимер полиметилметакрилат (ПММА) благодаря своим свойствам (прочности, плотности, прозрачности), а также относительно низкой стоимости имеет широкий круг технических приложений: от экранов смартфонов и дисплеев до авто- и авиационных окон/иллюминаторов [1]. При установке изделий из ПММА на лицевых проемах скоростных мобильных устройств особое внимание уделяется ударной прочности [2–4] в связи с воздействием твердых частиц и осадков [5,6]. Для мониторинга поведения различных материалов, испытывающих механическую нагрузку, широко применяется метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на чувствительности к упругим волнам, возникающим в микромеханических актах, индуцированных в твердом теле. В настоящей работе проведен анализ временных серий импульсов АЭ, возникающих при механическом ударе пластин ПММА и отражающих процессы микродеформации и накопления микротрещин в материале.

При температуре ниже точки стеклования  $T_g = 104^\circ\text{C}$  ПММА является хрупким, ударопрочным пластиком. В этой области имеется несколько интервалов, специфических для механических свойств полимера: традиционная эксплуатация ПММА осуществляется в широком температурном диапазоне от  $-45$  до  $70^\circ\text{C}$ ; выше  $70^\circ\text{C}$  и до температуры стеклования происходит размягчение полимера; в узком диапазоне  $104$ – $115^\circ\text{C}$  при механическом воздействии на материал возникает деформационное упрочнение [7]; при  $120^\circ\text{C}$  полимер начинает проявлять черты текучей среды. В настоящей работе измерения проведены при температурах образцов  $20^\circ\text{C}$  (наиболее используемая),  $80^\circ\text{C}$  (выше характерного эксплуатационного диапазона);  $110^\circ\text{C}$  (деформационное упрочнение).

При повышении температуры образца и переходе выше температуры стеклования можно было ожидать различный вклад во временные, частотные и энергетические характеристики возбужденных ударом серий импульсов АЭ, генерированных при деформации и образовании микротрещин. Поэтому при выборе акустического датчика было необходимо предусмотреть охват достаточно широкого диапазона частот, который при разрушении полимеров составляет 50–1000 kHz [8].

Применение резонансных датчиков позволяет улавливать более слабые сигналы, но лишь в узком диапазоне частот. Широкополосные датчики охватывают фактически весь набор образующихся дефектов в полимере, но их чувствительность ниже. Кроме того, анализ АЭ в широкой области дает усредненную картину выделенной энергии в импульсах АЭ без дифференциации высоко- и низкоэнергетических сигналов, которые могут иметь различное происхождение. Соответственно вклад в эмиссию звука лежит в различных частотных диапазонах. Задачу удается решить одновременным использованием двух или более узкополосных датчиков [9], но возникает проблема несовпадения технических характеристик нескольких резонансных приемников.

В случае механического воздействия на ПММА проявляются два энергетически различных процесса: деформация и накопление микротрещин, что ведет к генерации АЭ в различных частотных диапазонах. Поэтому в данном исследовании для идентификации источников упругих волн различного происхождения информация с высокочувствительного пьезодатчика из керамики  $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$  была проанализирована в двух диапазонах: 80–200 и 600–800 kHz. Таким образом, регистрация выделенной энергии при индуцируемых локальным ударом деформации и микротрещинах осуществлялась

одним приемником АЭ, что снижало приборные искажения результата. Низкоэнергетическая (низкочастотная, НЧ) генерация отнесена к деформации структуры, а высокоэнергетическая (высокочастотная, ВЧ) — к разрушению.

Сигналы АЭ через аналого-цифровой преобразователь АСК-3106 поступали в память компьютера с временным разрешением 40 ns. Продолжительность регистрации эмиссионной активности составляла 2 ms. Нагревание образца до температур 80 и 110°C осуществлялось воздушным феном.

В экспериментах использован технический листовый ПММА (органическое стекло), полученный методом блочной полимеризации. Локальное повреждение образцов производилось маятниковым копром с заостренным наконечником. Выбранный способ нанесения повреждения позволял получить локализованное разрушение поверхности в пятне диаметром  $\sim 1$  mm с хорошо воспроизводимой морфологией.

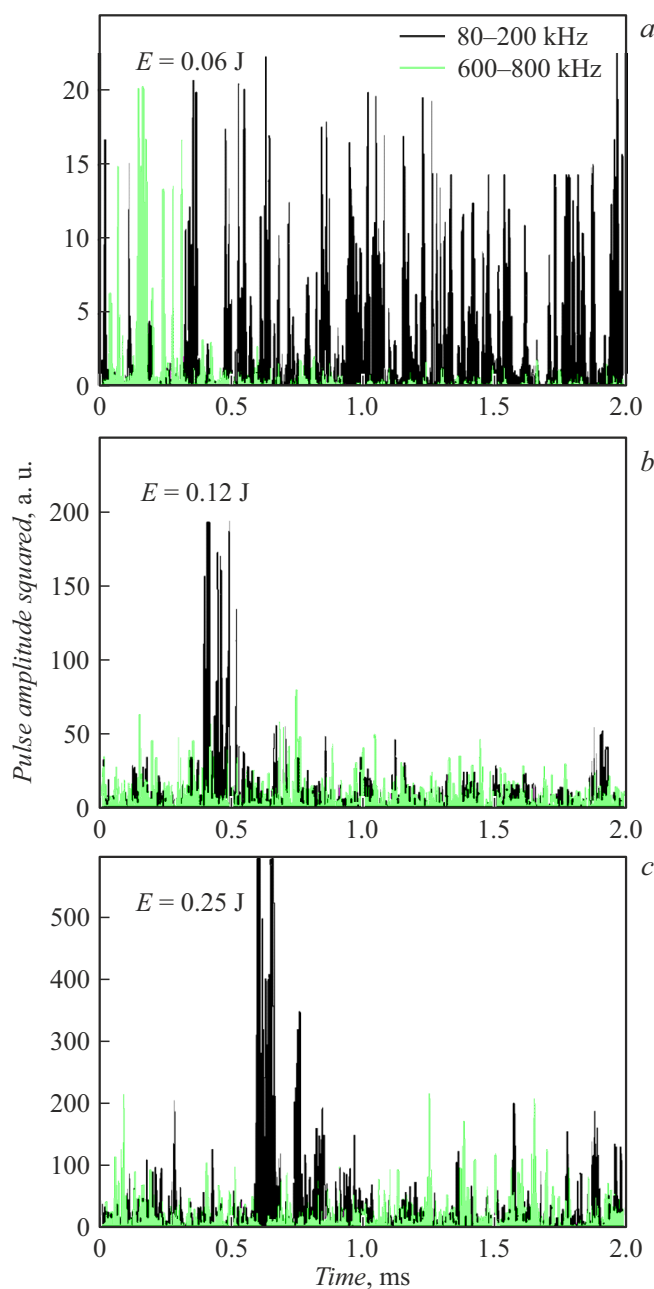
На рис. 1 показаны развертки акустического отклика на точечное повреждение поверхности при комнатной температуре. Поскольку сигнал АЭ включает отрицательные и положительные импульсы, приведены величины квадратов амплитуд, пропорциональные выделенной энергии.

Можно видеть, что при минимальной примененной энергии копра ( $E = 0.06$  J) (рис. 1, *a*) интенсивности НЧ- и ВЧ-эмиссий в первые 0.5 ms после удара приблизительно одинаковы, но ВЧ-сигнал, связанный с микротрещинами, быстро затухал. НЧ-сигнал, возбужденный деформацией структуры, продолжался в пределах временной развертки 2 ms.

При увеличении энергии копра до  $E = 0.12$  J (рис. 1, *b*) и 0.25 J (рис. 1, *c*) имели место кратковременные выбросы НЧ-эмиссии, а ВЧ-сигнал был на уровне шумовой дорожки. В то же время интенсивность НЧ-пика АЭ превысила таковую при минимальной энергии удара ( $E = 0.06$  J, рис. 1, *a*) на порядок величины. Таким образом, при комнатной температуре повреждение материала происходило преимущественно за счет деформации структуры.

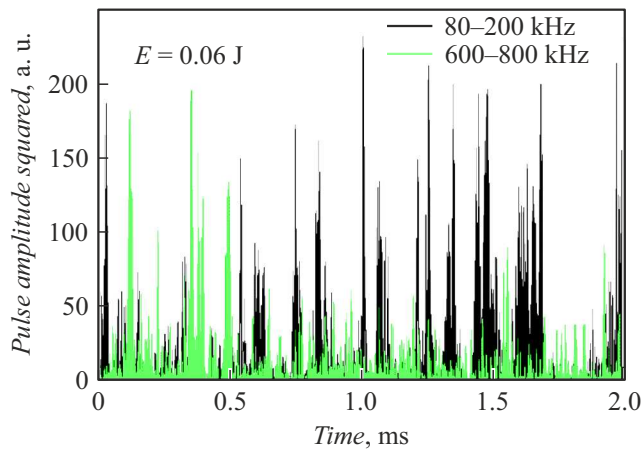
При температуре образца 80°C (т.е. за верхним пределом эксплуатационного интервала ПММА) при ударе копра с энергией  $E = 0.06$  J (рис. 2) развертки АЭ качественно повторили картину, наблюдавшуюся с затуханием ВЧ-сигнала и продолжением НЧ-сигнала до конца временной развертки. Однако в последнем случае (80°C) интенсивность АЭ в обеих областях частот возросла примерно на порядок величины. В отличие от разверток АЭ, полученных при комнатной температуре, изолированных высокоэнергетических выбросов не наблюдалось.

При температуре образца 110°C, т.е. выше температуры стеклования, но в температурной области деформационного упрочнения (104–115°C [7]), при ударе с энергией  $E = 0.06$  J (рис. 3, *a*) картина АЭ была

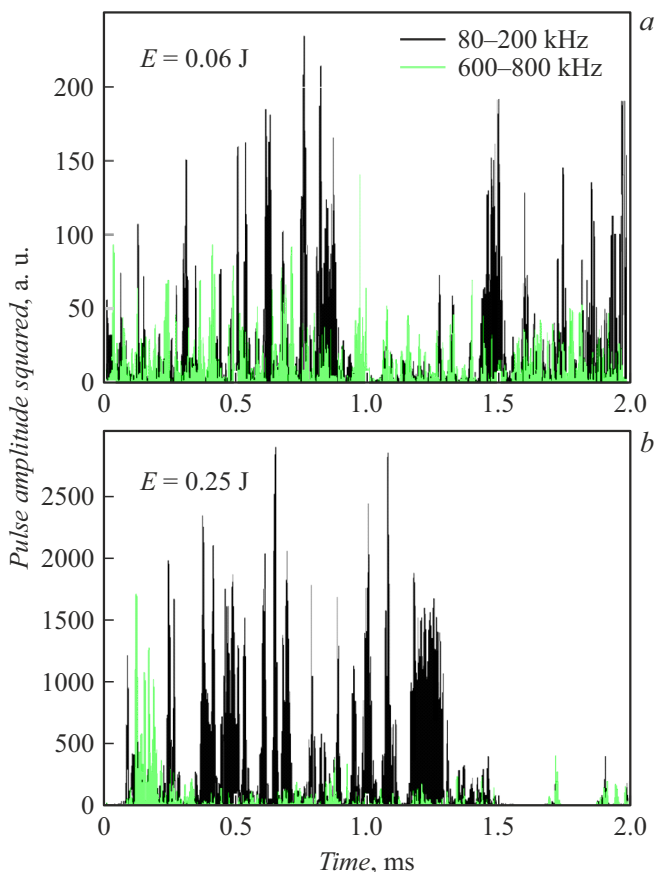


**Рис. 1.** Временные развертки амплитуд АЭ в диапазоне 80–200 и 600–800 kHz, записанные при повреждении ударом с энергиями копра 0.06 (*a*), 0.12 (*b*) и 0.25 J (*c*), произведенным при температуре образца 20°C. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

приблизительно такой же, как при 80°C. Но при увеличении энергии копра до 0.25 J (рис. 3, *b*) интенсивность АЭ увеличилась на порядок величины и на начальном участке развертки возник выброс ВЧ-эмиссии. Объяснением кратковременного увеличения эмиссии, вызванной трещинообразованием, при температуре выше  $T_g$  может служить факт некоторого увеличения хрупкости материала в температурном диапазоне деформационного упрочнения. Таким образом, частотная дифференци-



**Рис. 2.** Временные развертки амплитуд АЭ в диапазонах 80–200 и 600–800 kHz, записанные при повреждении ударом с энергией копра 0.06 J при температуре 80°C. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.



**Рис. 3.** Временные развертки амплитуд АЭ в диапазонах 80–200 и 600–800 kHz, записанные при повреждении ударами с энергией копра 0.06 (a) и 0.25 J (b) при температуре 110°C. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

ция сигналов АЭ при точечном ударном повреждении ПММА позволила выявить генерацию звука раздельно

при его деформации и трещинообразовании. При температурах образца ниже температуры стеклования генерация АЭ из микротрещин продолжалась не более 0.5 ms и в дальнейшем быстро затухала, тогда как эмиссионная активность, возбужденная деформацией материала, продолжалась в течение всего времени сканирования (2 ms). В температурном диапазоне деформационного упрочнения (104–115°C) наблюдался кратковременный сигнал АЭ, связанный с разрушением нестабильной упорядоченной структуры ориентированных полимерных цепей. В целом измерения показали, что в условиях точечного ударного воздействия повреждение аморфного ПММА при температурах от комнатной до 110°C происходит преимущественно за счет деформации материала с незначительным вкладом трещинообразования.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Y. Koh, S. Jang, J. Kim, S. Kim, Y.C. Ko, S. Cho, H. Sohn, *Coll. Surf. A*, **313-314**, 328 (2008). DOI: 10.1016/j.colsurfa.2007.04.103
- [2] S.S. Esfahlani, *Heliyon*, **7** (4), e06856 (2021). DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06856
- [3] D. Garcia-Gonzalez, A. Rusinek, A. Bendarma, R. Bernier, M. Klosak, S. Bahi, *Polym. Test.*, **81**, 106263 (2020). DOI: 10.1016/j.polymertesting.2019.106263
- [4] Ł. Mazurkiewicz, J. Małachowski, P. Baranowski, *Compos. Struct.*, **134**, 493 (2015). DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.08.069
- [5] G.H. Jilbert, J.E. Field, *Wear*, **243** (1-2), 6 (2020). DOI: 10.1016/S0043-1648(00)00367-7
- [6] Б.И. Кунижев, В.В. Костин, А.И. Темроков, А.С. Сучков, *ЖТФ*, **65** (7), 176 (1995).
- [7] A. Ghatak, R.B. Dupaix, *Int. J. Struct. Chang. Solids*, **2** (1), 53 (2010).
- [8] J. Bohse, *J. Acoust. Emission*, **22**, 208 (2004). <https://www.ndt.net/article/jac/papers/22-208.pdf>
- [9] С.В. Панин, А.В. Бяков, П.С. Любутин, О.В. Башков, *Дефектоскопия*, № 12, 43 (2011). [S.V. Panin, A.V. Byakov, P.S. Lyubutin, O.V. Bashkov, *Russ. J. Nondestruct. Test.*, **47** (12), 815 (2011). DOI: 10.1134/S1061830911120096].