

# МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 678.744.335:539.537

## ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЕ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ\*

А. В. ДОРОЖКО<sup>1</sup>, А. И. СВИРИДЕНКО<sup>2</sup>, В. П. СТАВРОВ<sup>1+</sup>, А. И. СТОЛЯРОВ<sup>3</sup>, В. М. ТКАЧЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова 13а, 220050 г. Минск, Беларусь.

<sup>2</sup> Научно-исследовательский центр проблем ресурсосбережения НАНБ, пл. Тизенгауза 7, 230023 г. Гродно, Беларусь.

<sup>3</sup> Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, пр. Октября 48, 246746 г. Гомель, Беларусь.

*Образцы полиметилметакрилата испытаны на растяжение и изгиб при ударе стального шарика, летящего со скоростью 120–160 м/с. Наибольшая скорость деформации при этом составляла  $\approx 10^3 \text{ с}^{-1}$ . На основании результатов эксперимента и решения динамической задачи теории упругости для системы шарик–образец–тензобалка по методу конечных элементов вычислены динамический модуль упругости, разрушающие напряжения и относительное удлинение при разрыве.*

### Введение

Полиметилметакрилат (ПММА) часто используют в качестве модельного материала при исследовании поведения упругих тел в особых условиях нагружения, в частности, при изучении воздействия водно-капельной струи [1, 2]. Для оценки напряженного и деформированного состояния и моделирования процессов разрушения необходимо знание упругих и прочностных характеристик материала при ударном нагружении. Ввиду многообразия марок материала, существенной зависимости механических свойств от технологии изготовления образцов и условий нагружения каждый результат динамических испытаний является уникальным [3, 4]. Точность оценки показателей упругих и прочностных свойств при динамических испытаниях, как правило, невелика из-за сложности регистрации основных параметров опыта и упрощений, принимаемых при оценке напряженного и деформированного состояния образца. По этим причинам значения, приводимые в литературных источниках, существенно различаются и не всегда соответствуют характеристикам конкретной марки материала.

Цель данной работы – определение динамических характеристик упругих и прочностных

свойств ПММА, используемого в качестве модельного материала при исследовании процессов повреждения полимерных покрытий под воздействием водно-капельной струи высокого давления.

### Методика эксперимента

На ударное растяжение и изгиб испытывали ПММА в виде листового органического стекла марки СЭ (ГОСТ 9784–75) толщиной 5 мм. Схема испытаний показана на рис. 1. Ударную нагрузку создавали шариком массой 0,35 г, выстреливаемым из пневматического пистолета А-101 калибра 4,5 мм. Скорость шарика в момент удара в зависимости от давления в баллоне составляла от 120 до 160 м/с. Ее значение в каждом опыте определяли с помощью оптоэлектронных преобразователей, работающих в инфракрасном диапазоне излучения, и частотомера ЧЗ-54. Для исключения срабатывания преобразователей при прохождении воздушного фронта вход измерителя скорости перекрывали бумажной мембраной.

На растяжение испытывали образцы с диаметром рабочей части 2,5 мм и длиной 10 мм, выточенные из листа. Их закрепляли попарно одним концом в захвате, расположенном на консольной тензобалке, другим – в траверсе, по которой ударяли шариком (рис. 1, б).

\* Работа выполнена в рамках проекта INTAS00-0268.

+ Автор, с которым следует вести переписку.

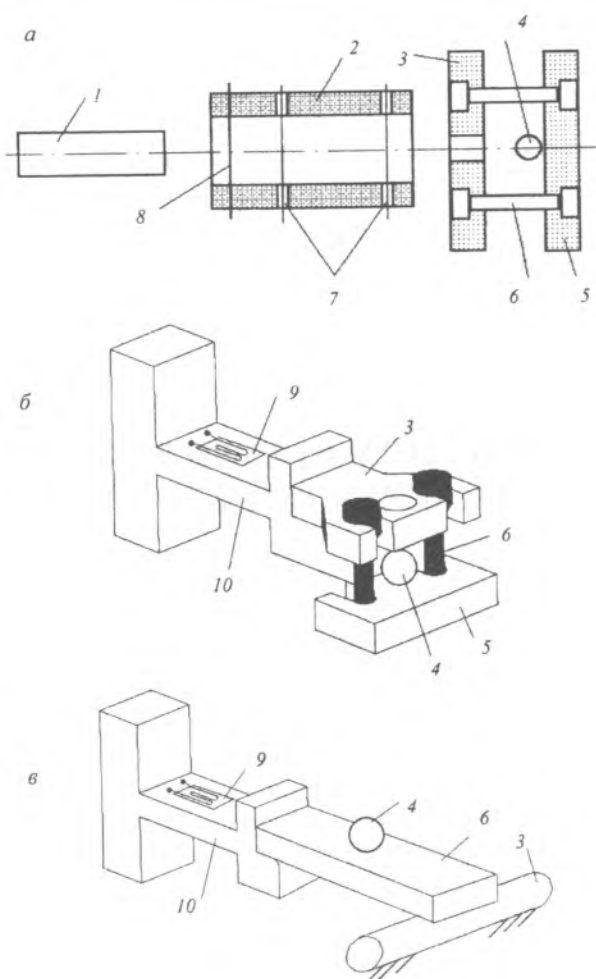


Рис. 1. Схема ударного нагружения (а) и закрепления образцов при растяжении (б) и изгибе (в): 1 – пневматический пистолет; 2 – обойма; 3 – неподвижный захват (опора); 4 – стальной шарик; 5 – траверса; 6 – образец; 7 – оптоэлектронные преобразователи; 8 – бумажная мембрана; 9 – тензобалка; 10 – тензорезистор

При испытаниях на изгиб (рис. 1, в) образцы с размерами сечения  $5 \times 10$  мм устанавливали на опорах, одна из которых связана с тензобалкой, и нагружали в центре широкой стороны сечения.

С помощью осциллографа С8-13, подключенного к измерительной диагонали тензомоста, регистрировали деформации тензорезисторов как функции времени нагружения.

Методом конечных элементов (МКЭ) моделировали динамические процессы в системе шарик–траверса–образец–тензобалка после удара шарика по траверсе (при растяжении) или по образцу (при изгибе) и рассчитывали напряженное и деформированное состояние образца. Плотность ПММА принималась равной  $1,18 \text{ г/см}^3$ .

Динамический модуль упругости находили как отношение средних значений напряжений и деформаций в фиксированный момент времени. По значениям деформации тензорезистора в момент разрушения определяли разрушающее напряжение и предельную деформацию материала.

Используя стандартную методику, определяли модули упругости и разрушающие напряжения

при статическом изгибе. Скорость деформации составляла при этом  $\approx 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Установлено, что как при статическом, так и при ударном нагружении материалу присущ хрупкий характер разрушения. При ударном растяжении образцы разрушаются преимущественно вблизи мест перехода от рабочей части к галтели. При ударном изгибе, в отличие от статического изгиба, трещины возникают в области контакта с шариком, т. е. на стороне образца, где при статическом нагружении действуют сжимающие напряжения. Модуль упругости при статическом изгибе составил  $2,86 \text{ ГПа}$ , разрушающее напряжение –  $104 \text{ МПа}$ , соответствующая ему максимальная деформация –  $0,042$ .

В результате моделирования по МКЭ испытаний на растяжение установлено, что напряженное и деформированное состояние существенно неоднородно как по длине, так и по сечению образца и зависит от способа приложения нагрузки (рис. 2). В частности, обнаружены эффекты прогиба траверсы, в которой закреплены образцы, и наличие в ней прорезей.

Время до разрушения образца при ударном растяжении как зарегистрированное осциллографом, так и рассчитанное по МКЭ (рис. 3), с увеличением скорости нагружения уменьшается. Уменьшается и фиксируемая тензорезистором деформация, а соответственно, усилие, реакция тензобалки. Расчетный промежуток времени от момента касания шарика до разрушения образца (достижения предельной деформации тензорезистора)  $\approx$  в 4 раза меньше зарегистрированного осциллографом. Это связано с характером распространения упругих волн в системе шарик–образец–тензобалка.

Расчет напряженного и деформированного состояния образца при ударном изгибе показал,

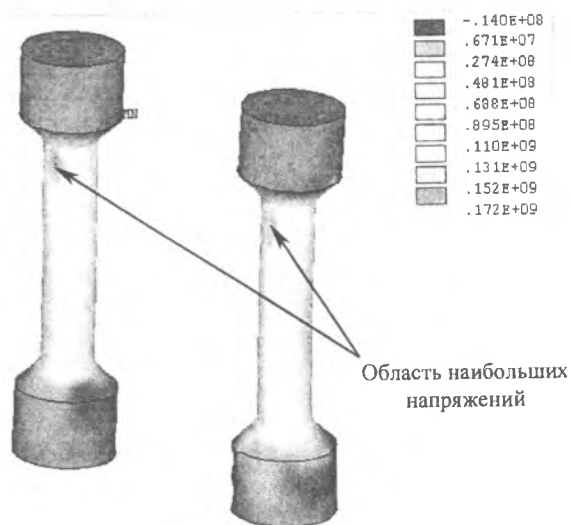


Рис. 2. Поле наибольших главных напряжений в образце через 52 мкс после удара шариком со скоростью  $120 \text{ м/с}$

Показатели механических свойств ПММА при ударном растяжении

| Скорость шарика, м/с | Динамический модуль упругости, ГПа | Разрушающее напряжение, МПа | Предельная деформация |
|----------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 120                  | 9,18                               | 147                         | 0,016                 |
| 140                  | 9,24                               | 220                         | 0,024                 |
| 160                  | 9,28                               | 340                         | 0,036                 |

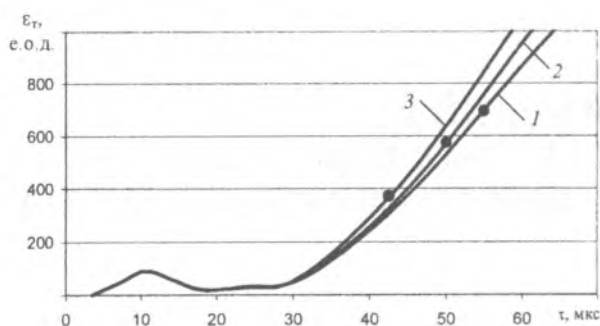


Рис. 3. Деформации тензорезистора  $\epsilon_t$  (1 е. о. д. =  $10^{-6}$ ) от времени взаимодействия  $\tau$  после удара шариком со скоростью: 1 – 120; 2 – 140; 3 – 160 м/с. Точками показаны моменты разрушения образцов

что растягивающие напряжения на площадке контакта шарика с образцом раньше достигают предельных значений, чем напряжения на обратной стороне образца. Это и служит причиной упомянутого выше аномального характера разрушения. Как следует из расчетов, типичный для изгиба характер разрушения может быть получен при толщине образцов  $< 2,5$  мм.

Разрушающие напряжения и деформации в образце при ударном растяжении определяли по значениям деформаций тензорезистора, соответствующим моменту разрушения (рис. 3). Расчетная скорость деформации (ее среднее значение в рабочей части образца) в момент разрушения составляла  $\approx 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

Установлено, что динамический модуль упругости и разрушающие напряжения и деформации в 2–3,5 раза больше найденных из опытов на изгиб (таблица). Наблюдается увеличение этих показателей с увеличением скорости нагружения, причем, как видно из таблицы, в большей мере возрастают разрушающие напряжения и деформации.

Значения динамического модуля упругости незначительно отличаются от приводимых в литературных источниках [1]. Приведенные в таблице характеристики прочности несколько выше приведенных в работах [3, 4] для соответствующих

скоростей деформации. Не вполне согласуется с вытекающим из временной зависимости прочности и увеличение разрушающего напряжения в исследованном диапазоне скоростей деформации. Наиболее вероятная причина несоответствия – неизбежные неточности воспроизведения реальной динамической системы в модели, используемой для оценки напряжений и деформаций.

Моделирование условий разрушения при ударе шарика по образцу (рис. 1, в) с использованием приведенных в таблице характеристик ПММА показало, что в зоне контакта шарика с образцом в момент, предшествующий разрушению, наибольшие деформации имеют значения, близкие к значениям, полученным при ударном растяжении. Это свидетельствует о пригодности полученных характеристик для расчетов напряженного и деформированного состояния и повреждения материала при ударном нагружении силой, сосредоточенной на относительно малой площадке.

## Выводы

Таким образом, найдены значения динамического модуля упругости и показателей прочности ПММА при ударном нагружении, которые могут быть использованы при моделировании поведения материала в условиях высокоскоростного удара капель воды.

## Литература

1. Milchers W. Abtragen von Polymeren mit dem reinen Wasserstrahl: Diss. Dr.-Ing.: Universitaet Hannover (2001)
2. Свириденко А. И., Игнатовский М. И., Свекло И. Ф. и др. Исследование микро- и наногеографии поверхности полиметилметакрилата, обработанной водно-капельной струей // Трение и износ, 24 (2003), № 2, 186–191
3. Тарасов Б. А. О временной зависимости прочности оргстекла при ударной нагрузке // Проблемы прочности (1972), № 12, 63–64
4. Златин Н. А., Пугачев Г. С., Беллендир Э. Н., Зильбербранд Е. Л. Определение прочности ПММА при одноосном растяжении длительностью  $10^{-5} \text{ с}$  // Журнал технической физики, 54 (1984), вып. 4, 797–802

Dorozhko A. V., Sviridenok A. I., Stavrov V. P., Stolyarov A. I., Tkachov V. M.

Deformations and fracture of polymethylmethacrylate at high-speed shock.

Samples from polymethylmethacrylate are tested at a tension and bending under shock of a steel ball with speed 120–160 m/s. The greatest speed of deformation  $\approx 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . On the basis of experiment data and the modelling with a MFE of a dynamic task of the elasticity theory for system a steel ball-sample-tensiometer are calculated the dynamic elasticity module, ultimate tension and tensile deformation at break.

Поступила в редакцию 22.06.2003.

© А. В. Дорошко, А. И. Свириденко, В. П. Ставров, А. И. Столяров, В. М. Ткачев, 2003.