

М. А. Варганов, Т. А. Дмитриева, В. И. Романченко

### ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИКАРБОНАТА ПРИ УДАРЕ ЦИЛИНДРА О ПРЕГРАДУ

Проблема динамической прочности материалов в настоящее время весьма актуальна, что обусловлено эксплуатацией конструкций при интенсивном динамическом нагружении (взрыв, удар), поисками путей снижения их массы и повышения функциональных характеристик. В распоряжении исследователя имеется ограниченный арсенал методов с контролируемыми параметрами для изучения свойств материалов при скоростях деформации свыше  $10^2$  с<sup>-1</sup>: это методы разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) в его модификациях [1], копровые [2, 3], Тейлора [4] и плоского соударения пластин [5].

В настоящей работе<sup>1</sup> рассматриваются динамические свойства поликарбоната — одного из наиболее распространенных полимерных материалов — с помощью схемы удара цилиндра о жесткую преграду (метод Тейлора). Численное решение двумерной задачи сравнивается с кинограммой процесса, реализованного на баллистической установке. Характеристики материала (параметры в численном эксперименте) устанавливаются на основе идентификации результатов расчета и опыта по соударению цилиндра с жесткой преградой на промежуточных и конечном этапах процесса деформирования цилиндра, расчета по формуле Тейлора и анализа диаграмм нагружения, полученных методом РСГ.

Для реализации соударения цилиндра с жесткой преградой использовалась баллистическая установка, подобная описанной в [6]. Схема эксперимента показана на рис. 1. Цилиндрический образец 5 диаметром 20 и длиной 48 мм, приклеенный к поршню 6, разгонялся под действием сжатого воздуха в стволе 7. Поршень тормозился отсекателем 4, после чего образец, двигаясь по инерции, ударялся о преграду 1 из прочной стали. Плоскостность соударения достигалась юстировкой преграды относительно ствола с точностью до 0,02 мм на диаметр поршня. Для сведения к минимуму влияния трения торца образца о поверхность преграды на радиальное течение материала образца обе поверхности полировались и смазывались тонким слоем смазки. Процесс соударения регистрировался скоростной камерой 8 ВСК-5. Для обеспечения невозмущенного движения образца использовался бесконтактный метод синхронизации импульсной подсветки 2 и запуска камеры ВСК-5 путем прерывания луча лазера 3, освещающего фотоприемник 9.

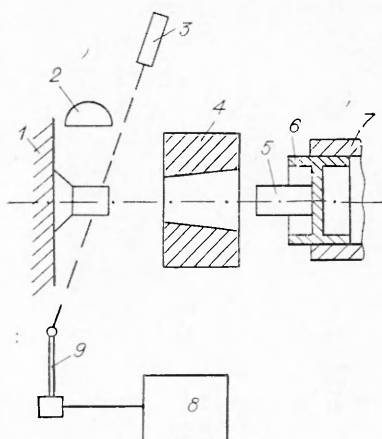


Рис. 1. Схема эксперимента.

Задача об определении напряженно-деформированного состояния цилиндра при его ударе о жесткую преграду решалась путем интегрирования уравнений механики сплошной среды явным конечно-разностным методом в переменных Лагранжа [7]. Систему исходных уравнений замыкают соотношения для шаровой и сдвиговой частей компонент тензора напряжений. Шаровая часть описывается полиномом в виде [8]

$$p = (4,72\mu - 13,3\mu^2 + 350\mu^3) \text{ ГПа},$$

$$\mu = \rho/\rho_0 - 1,$$

где  $\rho_0$  — начальная плотность материала.

<sup>1</sup> Статья написана по материалам выступления на 8-м Всесоюзном симпозиуме по горению и взрыву. Ташкент, 1986 г.

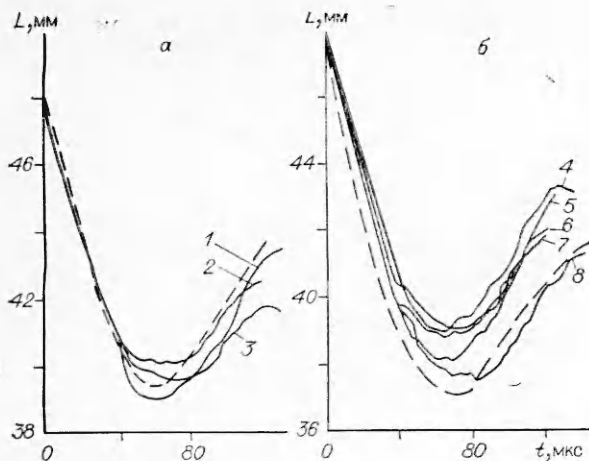


Рис. 2. Изменение длины стержня во времени для  $v = 217$  (а) и  $195$  м/с (б). Штриховые линии — эксперимент, сплошные — расчет.  
 $\sigma_T$ , ГПа: 3, 8 — 0,11, 1, 2, 4 — 0,12, 5—7 — 0,13; G, ГПа: 1, 4, 5 — 0,4, 8 — 0,5, 2, 3, 6 — 0,6, 7 — 0,85.

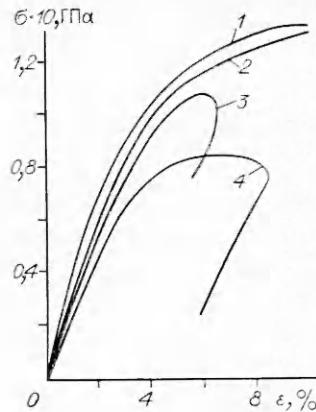


Рис. 3. Диаграммы деформирования поликарбоната  $\sigma - \epsilon$ , полученные методом РСГ.  
 $\dot{\epsilon}$ , 1/с: 1 —  $4 \cdot 10^{-3}$ , 2 —  $2 \cdot 10^{-3}$ , 3 —  $10^3$ , 4 —  $10^{-4}$ .

Пластическое поведение среды описывается условием Мизеса, которое реализуется процедурой приведения компонент девиатора напряжений к кругу текучести [7]

$$S_x^2 + S_y^2 + S_\theta^2 + 2\tau_{xy}^2 \leq \frac{2}{3} \sigma_T^2.$$

Здесь  $\sigma_T$  — динамический предел текучести;  $S_x$ ,  $S_y$ ,  $S_\theta$ ,  $\tau_{xy}$  — компоненты девиатора тензора напряжений.

На рис. 2 штриховые кривые соответствуют экспериментальным зависимостям длины образца от времени деформирования, полученным обработкой кинограмм соударения (скорости удара  $v = 217$  и  $195$  м/с). Для расчетного описания экспериментальных кривых изложенного численного метода необходимо знание предела текучести, который зависит от скорости деформации  $\dot{\epsilon}$ . Из экспериментальных кривых рис. 2 можно оценить диапазон значений  $\dot{\epsilon}$ , при которых происходит деформирование цилиндра. Уровень  $\dot{\epsilon}_{\max}$  равен тангенсу угла наклона начального участка кривой  $L(t)$ , отнесенной к начальной длине цилиндра, уровень средней скорости деформации  $\dot{\epsilon}_{\text{ср}}$  — разности начальной и конечной длин стержня, отнесенной к времени деформирования и начальной длине. При  $v = 217$  м/с  $\dot{\epsilon}_{\max} = 5,2 \cdot 10^3$  1/с,  $\dot{\epsilon}_{\text{ср}} = 1,04 \cdot 10^3$  1/с, при  $v = 195$  м/с  $\dot{\epsilon}_{\max} = 4,17 \cdot 10^3$  1/с,  $\dot{\epsilon}_{\text{ср}} = 0,87 \cdot 10^3$  1/с.

На рис. 3 приведены диаграммы  $\sigma - \epsilon$  поликарбоната при различных скоростях деформирования [9]. Образцы в работе [9] были изготовлены из той же партии цилиндров, что испытывались нами по схеме Тейлора. Из анализа приведенных диаграмм деформирования следует, что среднее значение предела текучести составляет 0,11 ГПа.

Сплошные кривые, приведенные на рис. 2, соответствуют расчетным зависимостям  $L(t)$ , полученным варьированием значения  $\sigma_T$  и модуля сдвига  $G$ . Из полученных результатов следует, что наилучшее согласие с экспериментом достигнуто для  $v = 217$  м/с при  $\sigma_T = 0,12$  ГПа,  $G = 0,4$  ГПа, а для  $v = 195$  м/с при  $\sigma_T = 0,11$  ГПа,  $G = 0,5$  ГПа.

Расчет напряжения текучести по классической формуле Тейлора

$$\sigma_T = \rho v^2 \frac{L_0 - H}{2(L_0 - L_1)} \frac{1}{\ln(L_0/H)},$$

где  $L_1$  — длина цилиндра после деформации;  $H$  — длина недеформированного участка цилиндра, дает для  $v = 217$  и  $195$  м/с соответственно 0,23 и 0,20 ГПа.

Таким образом, на основании результатов выполненной работы можно сделать вывод о возможности использования получаемых с помощью метода РСГ характеристик поликарбоната в качестве параметров для расчета динамических задач типа соударения тел с преградами. Результаты, получаемые по формуле Тейлора, выведенной на основе одномерной теории распространения волн в жесткопластическом материале, дают завышенные значения динамического предела текучести.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Динамика удара.— М.: Мир, 1985.
2. Писаренко Г. С. и др. Проблемы прочности, 1970, 7, 3.
3. Пльюшин А. А. Инженерный сборник, 1941, 1, 1, 13.
4. Taylor G. I. Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A, 1948, 194, 289.
5. Альтшулер Л. В. УФН, 1965, 1, 2, 197.
6. Минеев В. Н. и др. ФГВ, 1978, 14, 3, 129.
7. Уилкинс М. Л. // Вычислительные методы в гидродинамике.— М.: Мир, 1967.
8. Curran D. R. et al. J. Appl. Phys., 1973, 44, 9, 4025.
9. Ломунов А. К. Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Горький, 1987.

г. Москва

Поступила в редакцию 21/II 1989,  
после доработки — 7/VIII 1989

УДК 621.787.044

В. А. Симонов

#### О ФОРМЕ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАСТИ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

Согласно существующим представлениям, нижняя граница области сварки взрывом определяется минимальным значением угла соударения  $\gamma$  [1, 2], которое связывается с микротвердостью  $H_v$  и скоростью точки контакта  $v_k$  выражением

$$\gamma = 1,14 \sqrt{H_v / \rho v_k^2}, \quad (1)$$

или минимальным значением скорости метаемой пластины  $v_{0min}$ , связанным с прочностью  $\sigma_b$  [3, 4]:

$$v_{0min} = \sqrt{\sigma_b / \rho}, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность металлов. Оба определения могут быть приведены к виду

$$v_{0min} = v_k \gamma = \text{const} = f(\sigma, \rho),$$

где константа зависит от выбора прочностной характеристики. Поскольку  $H_v$  в 2—5 раз превосходит  $\sigma_b$  для обычных конструкционных металлов и сплавов, величины  $v_{0min}$ , рассчитанные по (1) и (2), априорно различны. Экспериментальные данные [5—9] в простейших случаях сварки однородных металлов (например, медь—медь) дают заметно отличающиеся между собой значения  $v_{0min}$ , не совпадающие с расчетом по (1), (2). С другой стороны, в [10—12] приведены результаты опытов, согласно которым условия образования равнопрочных соединений реализуются существенно ниже (1) и независимо от  $v_0$  в широком диапазоне изменения  $v_k$ .

В связи с этим возникают обоснованные вопросы о причинах принципиального различия формы и положения нижней границы на плоскости ( $v_k, \gamma$ ), существования двух критериев (1), (2) и их несоответствия