

МЕХАНИКА

УДК 539.3

МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВОЛНОВОГО ПРОЦЕССА В МЕРНОМ СТЕРЖНЕ ПО ПОКАЗАНИЯМ ДВУХ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИЙ

© 2011 г.

В.Г. Баженов¹, М.С. Баранова², Е.В. Павленкова¹¹ НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского² Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

bazhenov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 21.06.2011

При построении динамических диаграмм деформирования необходимо знать импульс нагружения ударяемого конца мерного стержня в эксперименте. Для его определения при многократном прохождении волны по стержню на основе показаний двух датчиков деформаций, расположенных вблизи ударяемого и опертого концов мерного стержня, разработан алгоритм вычисления скоростей и напряжений методом характеристик.

Ключевые слова: идентификация упруговязкопластических характеристик, метод прямого удара, экспериментально-расчетные методики, регистрация импульсов деформации, метод характеристик.

Введение

Метод прямого удара для исследования упруговязкопластических свойств материалов при сжатии предложен Ф.Е. Хаузером [1], развит в работах Я.Р. Клепачко [2] и других исследователей. Экспериментальная установка, реализующая метод прямого удара, содержит элементы (рис. 1): ударник (отмечен цифрой 1), испытуемый образец (2), мерный стержень (3). Напряжения в образце определяются на основании импульса деформации, регистрируемого тензодатчиком, расположенным вблизи ударяемого торца мерного стержня.

Известные методики исследования динамических свойств материалов на основе метода прямого удара [1–6] применимы до того момента времени, пока на ударяемый торец мерного стержня не поступит отраженный от противоположного торца импульс. В частности, в работе [6] разработана и теоретически обоснована методика построения динамических диаграмм деформирования методом прямого удара на газодинамической копровой установке, свободная

от ряда ограничений традиционной схемы. Сближение контактных поверхностей ударника и мерного стержня определяется из уравнения движения ударника как абсолютно жесткого тела под действием импульса напряжений (деформаций), возникающего в мерном стержне. Верификация методики проведена путем восстановления заданной диаграммы деформирования при замене физического эксперимента компьютерным моделированием осесимметричной задачи с учетом волновых процессов в системе ударник–образец–мерный стержень. Показано, что основные ошибки при нахождении (восстановлении) вязкопластических характеристик материалов определяются точностью экспериментальных измерений.

Для того чтобы расширить возможности методик при многократном прохождении волны деформаций вдоль мерного стержня, на базе метода характеристик разработан алгоритм вычисления скоростей и напряжений ударяемого конца стержня по результатам замеров деформаций двумя датчиками вблизи ударяемого и опертого концов стержня (рис. 2).

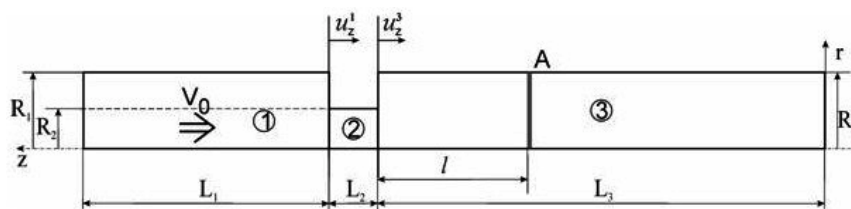


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по методу прямого удара

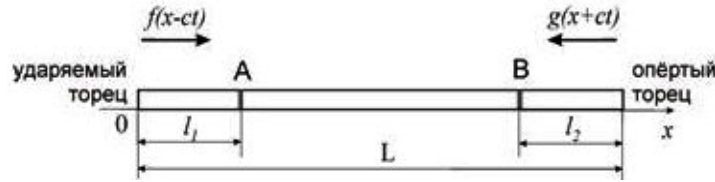


Рис. 2. Распространение волн деформаций в мерном стержне

1. Алгоритм восстановления волновой картины в стержне

Согласно общему решению волнового уравнения напряжения (деформации) в каждой точке стержня в любой момент времени представляются в виде суммы двух волн напряжений (деформаций): прямой $f(x - ct)$ и обратной $g(x + ct)$, распространяющихся навстречу друг другу от ударного и опертого торцов соответственно:

$$\begin{aligned} \dot{u}(x,t) &= 1/2[f(x - ct) + g(x + ct)], \\ \sigma(x,t) &= \rho c/2[f(x - ct) - g(x + ct)], \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ – плотность, c – скорость звука, \dot{u} – скорость материальных частиц, σ – напряжение.

Функции $f(x - ct)$ и $g(x + ct)$ находятся из начальных и граничных условий. В рассматриваемом случае граничные условия на мерном стержне неизвестны и подлежат определению.

Подставляя значения координат датчиков в (1) и учитывая закон Гука, получим:

$$\begin{aligned} Ee^A(t) &\equiv \sigma(l_1, t) = \frac{\rho c}{2}[f(l_1 - ct) - g(l_1 + ct)], \\ Ee^B(t) &\equiv \sigma(L - l_2, t) = \\ &= \frac{\rho c}{2E}[f(L - l_2 - ct) - g(L - l_2 + ct)], \end{aligned}$$

где E – модуль Юнга, e^A, e^B – деформации в сечениях А и В, l_1 и l_2 – расстояния от концов стержня до датчиков, L – длина стержня.

Зная из эксперимента импульсы деформаций $e^A(t)$ и $e^B(t)$ в двух точках стержня и полагая, что функция $g(x + ct) \equiv 0$ при $ct \leq L$ (пока волна деформаций ещё не отразилась от опертого торца стержня), можно поэтапно восстановить функции $f(x - ct)$ при $t \geq 0$ и $g(x + ct)$ при $ct > L$ по формулам:

$$\begin{aligned} f(l_1 - ct) &= \frac{2E}{\rho c} e^A(t) + g(l_1 + ct), \\ g(L - l_2 + ct) &= -\frac{2E}{\rho c} e^B(t) + f(L - l_2 - ct). \end{aligned}$$

После того как из импульсов напряжений (деформаций) выделены прямая $f(x - ct)$ и обратная $g(x + ct)$ волны, по формулам (1) можно восстановить волновую картину во всем стержне, в том числе и на ударяемом торце.

2. Тестирование алгоритма

Для тестирования алгоритма вычисления скоростей и напряжений в качестве экспериментальных данных брались результаты численного моделирования в одномерной постановке волнового процесса в стержне, выполненного в пакете прикладных программ «Динамика-2» [7]. Один из торцов стержня жестко закреплен, другой имеет осевую скорость $V(t)$ с законом (2а) или (2б):

$$V(t) = V_0, \quad (2a)$$

$$V(t) = \begin{cases} V_0 \sin^2(\frac{\pi t}{2T}), & t < 2T, \\ 0, & t \geq 2T, \end{cases} \quad (2б)$$

где $T = L/c$ – время пробега волны по стержню.

На рис. 3 приведены зависимости напряжений от времени в сечениях стержня А и В (а – осевая скорость на торце задавалась по закону (2а), б – по закону (2б)). Полагалось, что $l_1 = l_2 = L/4$.

В дальнейшем граничные условия на стержне полагались неизвестными и восстанавливались по изложенному алгоритму.

На рис. 4а, б приведены зависимости напряжений на ударяемом торце $\sigma(0, t)$ для граничных условий (2а) и (2б) соответственно. Точками отмечены восстановленные напряжения, сплошной линией – из расчёта в одномерной постановке.

Таким образом, данная методика позволяет восстанавливать граничные условия в мерном стержне при многократном отражении волн деформаций с точностью, которая фактически определяется погрешностями экспериментальных измерений деформаций.

Заключение

Разработанный алгоритм на основе методики [6] позволяет построить диаграмму деформирования исследуемого материала на основе всего временного интервала процесса нагружения до момента остановки ударника. Это дает возможность расширить диапазон скоростей деформаций и сократить число экспериментов, особенно при низких скоростях деформирования, что важно при изучении свойств малопрочных

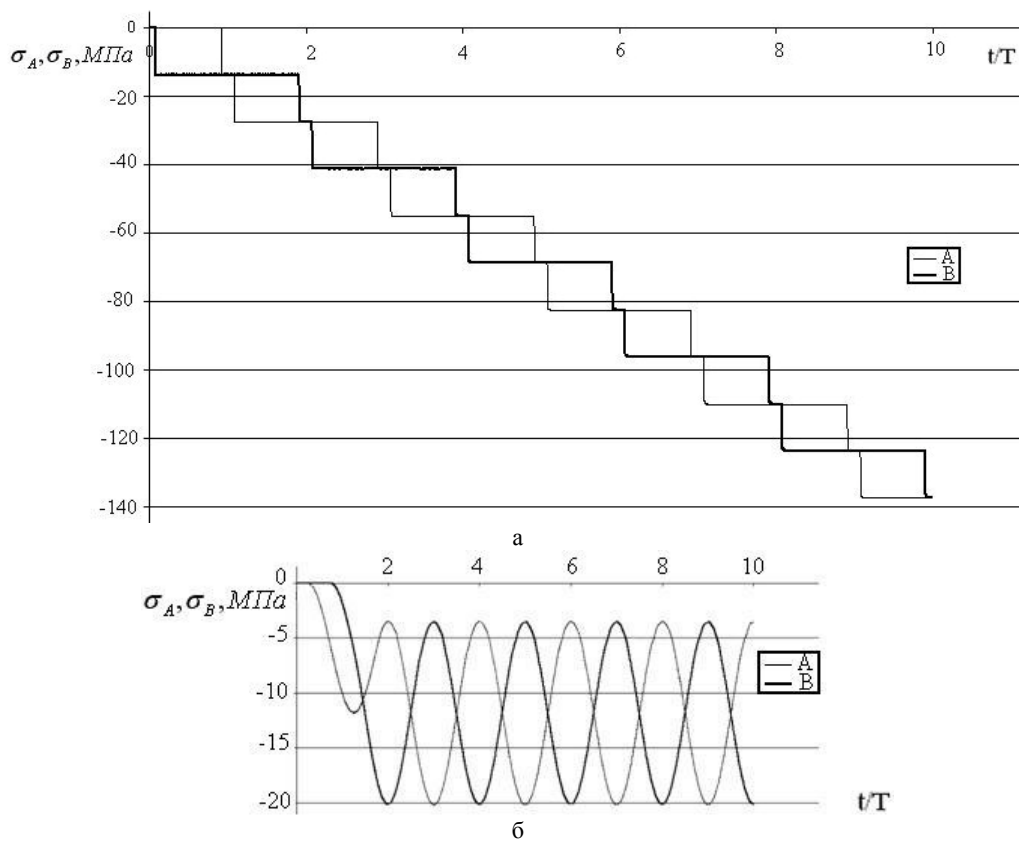


Рис. 3. Напряжения в сечениях А и В стержня

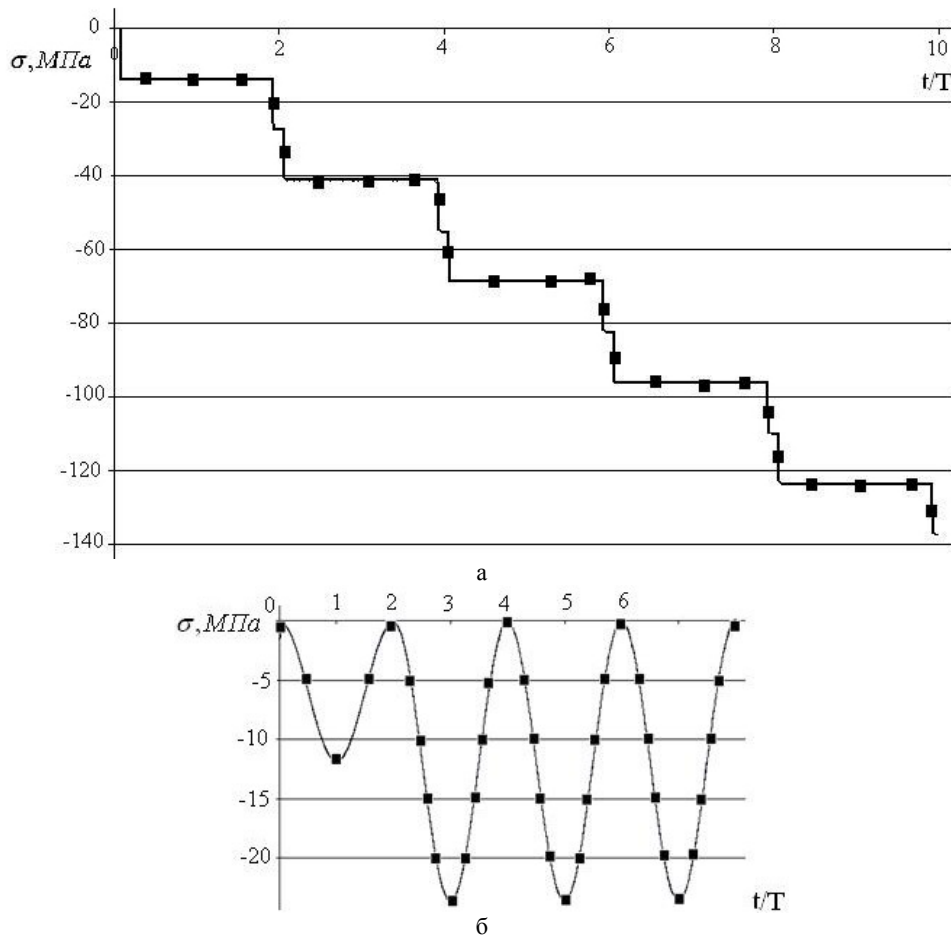


Рис. 4. Напряжения на ударяемом торце

(свинец, медь) и пористых (пенометаллы) материалов. Также становится возможным сопоставление результатов расчёта и экспериментов по остаточным размерам испытуемого образца.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (10-08-00376а, 11-08-00565-а), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы и Программы поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-4807.2010.8).

Список литературы

1. Hauser F.E. Strain rate effects in plastic wave propagation // In: Hauser F.E., Simmons J.A., Dorn J.E. Response of Metals to High Velocity Deformation / ed. by P.G. Shewmon and V.F. Zackay. New York: Interscience, 1961. P. 93–101.

2. Klepaczko J.R. Advanced experimental techniques in materials testing // In: Klepaczko J.R. New Experimental Methods in Material Dynamics and Im-

pact, Trends in Mechanics in Materials / eds. W.K. Nowacki, J.R. Klepaczko. Warsaw, 2001. P. 223–266.

3. Lindholm U.S., Yeakley L.M. High strain-rate testing: tension and compression // Exp. Mech. 1968. Vol. 8. № 1. P. 1–9.

4. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. М.: Изд. Иностр. лит-ры, 1955. 192 с.

5. Bragov A., Konstantinov A., Lomunov A., Sergeichev I., Fedulov B. Experimental and numerical analysis of high strain rate response of Ti-6Al-4V titanium alloy // Journal de Physique IV. 2009. P. 1465–1470.

6. Баженов В.Г., Баранова М.С., Павленкова Е.В. Развитие и верификация метода прямого удара для идентификации вязкопластических характеристик материалов в экспериментах на газодинамической копровой установке // Проблемы прочности и пластичности: Межвузовский сборник. Вып. 71. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2009. С 184–192.

7. Баженов, В.Г., Зефилов С.В., Кочетков А.В. и др. Пакет прикладных программ «Динамика-2» // Прикл. пробл. прочности и пластичности. Исследование и оптимизация конструкций. Всесоюз. межвуз. сб. Горьк. ун-т. 1987. С. 4–13.

A TECHNIQUE OF WAVE PROCESS RESTORATION IN A MEASURING ROD BY THE READINGS OF TWO STRAIN GAUGES

V.G. Bazhenov, M.S. Baranova, E.V. Pavlenkova

To build a dynamic stress-strain diagram, it is necessary to know the loading pulse of the measuring rod impacted end in the experiment. To determine the pulse using the readings of two strain gauges placed near the impacted and supported ends of the measuring rod during the multiple passage of a strain wave along the rod, we have developed an algorithm to calculate velocities and stresses based on the method of characteristics.

Keywords: identification of elastoviscoplastic characteristics, direct impact method, experimental-computational methods, registration of strain pulses, method of characteristics.