

УДК 539.3

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ КОПРОВОЙ УСТАНОВКЕ

© 2011 г.

*М.С. Баранова¹, Д.А. Казаков², В.Б. Коробов²*¹Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского²НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского

bar18@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Разработана и теоретически обоснована методика построения динамических диаграмм деформирования методом прямого удара на газодинамической копровой установке. Реализована и апробирована методика определения зависимости динамического предела текучести от скорости деформации из каждого эксперимента в реализованном диапазоне изменения скоростей деформаций. Верификация методики проведена путем поэтапного восстановления заданной статической диаграммы деформирования и зависимости динамического предела текучести от скорости деформации при замене физического эксперимента компьютерным моделированием осесимметричной задачи с учетом волновых процессов в системе ударник–образец–мерный стержень. Показано, что основные ошибки при определении (восстановлении) вязкопластических характеристик материалов связаны с точностью экспериментальных измерений. На основе метода характеристик разработан алгоритм вычисления смещений ударяемого конца стержня по результатам замеров деформаций двумя датчиками вблизи ударяемого и опертого концов стержня при многократном прохождении волны деформаций. Это позволяет рассмотреть весь процесс деформирования до момента остановки ударника и провести сопоставление результатов расчета и экспериментов по остаточным размерам испытуемого образца.

Ключевые слова: идентификация упруговязкопластических характеристик, копровая установка, экспериментально-расчетные методики, регистрация импульсов деформации, метод характеристик, нелинейные процессы деформирования материалов, статические и динамические процессы сжатия, численные методы.

Одномерная модель волнового процесса в системе ударник–образец–мерный стержень

Копровая установка содержит элементы: ударник, испытуемый образец, мерный стержень. В эксперименте регистрируется начальная скорость ударника V_0 . Тензометрический датчик, установленный на мерном стержне в сечении A на расстоянии $l \geq 2R$ (R – радиус мерного стержня), регистрирует импульс деформации e_z^A на конце стержня в зависимости от времени с задержкой по времени на t^* – суммарное время пробега волны сжатия вдоль образца и мерного стержня от места удара до тензометрического датчика. В одномерной модели волнового процесса принимаются следующие предположения: 1) пренебрегаются поперечными колебаниями стержней; 2) ударник полагается абсолютно жестким; 3) вследствие малости размеров образца напряженно-деформированное состояние в нем полагается однородным.

Осевая сила F_z^A в упругом мерном стержне в сечении A определяется законом Гука.

Изменение длины образца L во времени можно оценить, зная перемещения контактных поверхностей ударяющего u'_z и мерного u''_z стержней $L = L_0 - (u''_z - u'_z)$, где L_0 – начальная длина образца. Перемещение контактной поверхности мерного стержня u''_z определяется через упругую деформацию, регистрируемую в мерном стержне e_z^A . Перемещение контактной поверхности ударника u'_z определяется интегрированием уравнения движения $m\ddot{u}'_z = F_z^A$ с заданными начальными условиями. По известной длине образца определяются условная \bar{e}_z и истинная e_z осевые деформации и скорость деформации в образце

$$\bar{e}_z = \frac{L - L_0}{L_0}, \quad e_z = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(1 + \bar{e}_z), \quad \dot{e}_z = \frac{de_z}{dt}. \quad (1)$$

Осевые напряжения в образце вычисляются исходя из условия несжимаемости с учетом изменения поперечного сечения

$$\sigma_z = F_z^A(1 - \bar{e}_z) / S_0,$$

где $S_0 = \pi R_0^2$ и R_0 – площадь и радиус недеформированного образца соответственно.

Таким образом, проведя обработку экспериментальных данных – зависимости осевых усилий от времени $F_z^A \sim t$ в мерном стержне, и зная начальную скорость ударника V_0 , можно построить зависимость осевое напряжение-осевая деформация ($\sigma_z \sim e_z$) в образце в экспериментально реализованном диапазоне скоростей деформаций.

Апробирована методика определения зависимости динамического предела текучести от скорости деформации из каждого эксперимента в реализованном диапазоне изменения скоростей деформаций (10^2 – 10^3 с⁻¹). Разность динамического и статического пределов текучести при текущем значении скорости деформации определяется как разность напряжения и величины упрочнения при достигнутой степени деформации. Верификация методик проведена путем поэтапного восстановления заданной статической диаграммы деформирования и зависимости динамического предела текучести от скорости деформации при замене физического эксперимента компьютерным моделированием осесимметричной задачи с учетом волновых процессов в системе ударник–образец–мерный стержень. Различия между исходной и полученной по вышеизложенному алгоритму диаграммами деформирования не превышает 3%. Большую часть этой ошибки составляет разностная аппроксимация осесимметричной задачи [1].

Решение задачи о восстановлении волнового процесса в мерном стержне по показаниям двух датчиков деформаций

На основе метода характеристик разработан алгоритм вычисления смещений ударяемого конца стержня по результатам замеров деформаций двумя датчиками, расположенными в сечениях А и В, т.е. соответственно вблизи ударяемого и опертого концов стержня (рис. 1), при многократном прохождении волны деформаций.

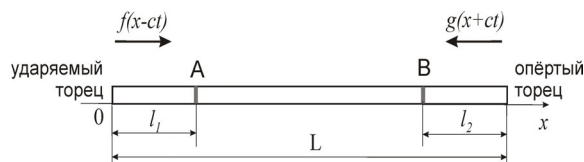


Рис. 1

Это позволяет рассмотреть весь процесс де-

формирования до момента остановки ударника и провести сопоставление результатов расчета и экспериментов по остаточным размерам испытуемого образца.

Общее решение волнового уравнения (уравнений одномерной акустики):

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

Функции f и g должны определяться из начальных и граничных условий. В данном случае граничные условия на правом торце мерного стержня неизвестны и подлежат определению, на левом торце – жесткая заделка. Используя из эксперимента импульсы деформаций $e^A(t)$ и $e^B(t)$, можно поэтапно восстановить функции f при $t \geq 0$ и g при $ct > L$ по формулам:

$$f(l_1 - ct) = 2E / (\rho c) e^A(t) + g(l_1 + ct), \quad (3)$$

$$g(L - l_2 + ct) = -2E / (\rho c) e^B(t) + f(L - l_2 - ct).$$

Далее по формулам (2) восстанавливаются импульсы скорости перемещений и напряжения на ударяемом торце стержня [2].

Тестирование изложенной методики осуществлялось на следующей модели: один из торцов стержня жестко закреплен, другой обладает скоростью, изменяющейся во времени по закону

$$V(t) = V_0 \sin^2(\pi t / (2T_{pr})), \quad t < 2T_{pr};$$

$$V(t) = 0, \quad t \geq 2T_{pr}.$$

Для апробации этой методики также проводилось численное моделирование волнового процесса в системе ударник–образец–мерный стержень в осесимметричной постановке с заданной начальной скоростью ударника. Вместо экспериментальных данных брались значения напряжений из расчета осесимметричной задачи в сечениях А и В. Восстановленные значения скорости и напряжения на ударяемом торце хорошо согласуются с соответствующими значениями, взятыми из расчета осесимметричной задачи.

Список литературы

Баженов В.Г., Баранова М.С., Павленкова Е.В. // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2009. Вып. 71. С. 184–192.

2. Баженов В.Г., Баранова М.С., Павленкова Е.В. // Сеточные методы для краевых задач и приложения: Матер. Восьмой Всерос. конф., посвященной 80-летию со дня рождения А.Д. Ляшко. Казань 1–5 октября, 2010. С. 133–136.

**A METHOD FOR IDENTIFYING VISCOPLASTIC CHARACTERISTICS
OF MATERIALS USING A VERTICAL GAS-GUN STAND***M.S. Baranova, D.A. Kazakov, V.B. Korobov*

A methodology of constructing dynamic deformation diagrams based on the method of direct impact on a vertical gas-gun stand has been developed and theoretically verified. A methodology of determining dynamic yield strength as a function of strain rate in every experiment in the implemented strain rate range has been realized and tested. The methodology has been verified by a step-by-step reconstruction of a given static deformation diagram and a strain-rate/ultimate dynamic yielding relation when substituting the physical experiment by computer modeling of an axisymmetric problem, accounting for the wave processes in the striker-specimen-measuring rod system. The main inaccuracies in determining (reconstructing) viscoplastic characteristics of materials are shown to be determined by the degree of accuracy of experimental measurements. Based on the method of characteristics, an algorithm has been developed for calculating the displacements of the impacted end of the rod based on the results of the measurements of strains by two gauges in the vicinity of the impacted and supported ends of the rod for a multiply passing strain wave. This makes it possible to analyze the deformation process up to the moment the striker stops and to compare the computational and experimental results based on the residual size of the tested specimen.

Keywords: identification of elasto-viscoplastic characteristics, vertical gas-gun stand, experimental-computational methodologies, registering strain pulses, method of characteristics, nonlinear deformation processes in materials, static and dynamic compression processes, numerical methods.