

МЕХАНИКА

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ ОБРАЗЦОВ КОЛПАЧКОВОГО ТИПА МЕТОДОМ ПРЯМОГО УДАРА

© 2014 г. *В.Г. Баженов¹, М.С. Баранова¹, Е.В. Нагорных¹, Д.В. Шошин²*

¹ НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского
² РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров

bar18@rambler.ru

Поступила в редакцию 25.09.2013

Рассматривается численное моделирование процессов упруговязкопластического деформирования при растяжении образцов колпачкового типа методом прямого удара в осесимметричной и одномерной постановках. Оцениваются точность восстановления усилий, перемещений и скоростей перемещений в образцах колпачкового типа, получаемых на основе одномерной модели.

Ключевые слова: газодинамическая копровая установка, метод прямого удара, образцы колпачкового типа, ударное растяжение, упруговязкопластические характеристики.

Введение

На сегодняшний день существует ряд экспериментальных методик исследования поведения материалов в условиях динамического нагружения. Среди них можно выделить наиболее распространенные: на основе разрезного стержня Гопкинсона и копровые испытания.

Схема испытаний на растяжение образцов в виде колпачков впервые предложена У. Линдхольмом [1], при этом вместо опорного стержня Гопкинсона применялась тонкостенная труба. Д. Мор и Г. Гари [2] предложили в испытаниях на растяжение использовать образец специальной формы колпачкового типа, который позволял производить исследования динамических свойств материалов с использованием стандартной установки разрезного стержня Гопкинсона. Другой вариант испытаний на растяжение на основе разрезного стержня Гопкинсона предложен Т. Николасом [3]. Нагружение образца происходит волной растяжения, которая формируется после отражения волны сжатия от свободного торца опорного стержня. Эта модификация разрезного стержня Гопкинсона была реализована А.М. Браговым и др. [4] при экспериментальных исследованиях высокоскоростного растяжения цилиндрических образцов с кольцевыми концентраторами при скорости деформации порядка 10^3 с^{-1} .

В работе [5] проведены исследования процесса растяжения образцов колпачкового типа в экспериментах на растяжение по схеме Гопкинсона (система «ударник–передающий мерный стержень–образец колпачкового типа–опорная мерная труба») с целью оценки скоростей и степеней деформаций в образцах. В данной работе рассматривается схема метода прямого удара, реализуемая в экспериментах на газодинамической копровой установке (система «ударник–передающее кольцо–образец колпачкового типа–опорный мерный стержень»). Эти две схемы анализируются с точки зрения степеней и скоростей деформации и точности восстановления параметров деформирования при экспериментальных исследованиях.

Схема установки и методика испытаний

Копровая установка на растяжение методом прямого удара (рис. 1) содержит элементы: опорный мерный стержень (отмечен цифрой 1), испытуемый образец колпачкового типа (2), передающее кольцо (3), ударник (4).

Геометрические параметры элементов копровой установки: радиус и длина мерного стержня $R_1 = 1.8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ и $L_1 = 1.2 \text{ м}$, толщина и длина рабочей части образца $H_2 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и $L_2 = 0.6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, внутренний радиус и длина

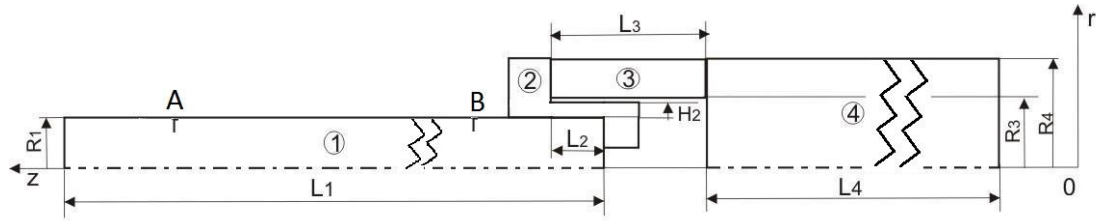


Рис. 1

кольца $R_3 = 2.17 \cdot 10^{-2}$ м и $L_3 = 5 \cdot 10^{-2}$ м, радиус и длина ударника $R_4 = 3.45 \cdot 10^{-2}$ м и $L_4 = 30.85 \cdot 10^{-2}$ м. Материал ударника, трубы и мерного стержня – сталь 20, механические характеристики: $K = 1.7917 \cdot 10^5$ МПа, $G = 8.269 \cdot 10^4$ МПа, $\rho = 7.8 \cdot 10^3$ кг/м³. Материал образца – сплав Д16Т, механические характеристики: $K = 6.25 \cdot 10^4$ МПа, $G = 2.885 \cdot 10^4$ МПа, $\rho = 2.8 \cdot 10^3$ кг/м³, предел текучести $\sigma_T = 190$ МПа.

В эксперименте регистрируется начальная скорость ударника V_0 . Тензометрические датчики, установленные на мерном стержне в сечениях А и В на расстояниях $l_A = l_B = 0.3$ м (рис. 1), регистрируют импульс деформации $e_z^A(t)$, $e_z^B(t)$ на концах стержня в зависимости от времени.

По методике восстановления волнового процесса по показаниям двух датчиков деформаций [6] восстанавливаются напряжения $\sigma_z^1(t)$ и скорость $\dot{u}_z^1(t)$ на ударяемом торце мерного стержня. Осевая сила F_z^1 на ударяемом торце мерного стержня определяется соотношением

$$F_z^1 = \pi R_1^2 \sigma_z^1. \quad (1)$$

Интегрируя скорость $\dot{u}_z^1(t)$, находим перемещения $u_z^1(t)$ ударяемого торца мерного стержня

$$u_z^1 = \int_0^t \dot{u}_z^1(t) dt. \quad (2)$$

Осевые силы F_z^1 и F_z^3 на поверхностях контакта колпачка и мерного стержня, колпачка и передающего кольца полагаем равными, пренебрегая волновым процессом в испытуемом образце.

Перемещение поверхности контакта образца и кольца u_z^3 определяется интегрированием

уравнения движения ударника с заданными начальными условиями

$$m \ddot{u}_z^3 = F_z^3, \quad \dot{u}_z^3|_{t=0} = V_0, \quad u_z^3|_{t=0} = 0, \quad (3)$$

где m – суммарная масса ударника.

Таким образом, регистрируя двумя тензодатчиками деформации в мерном стержне, можно определить усилия, скорости перемещений и перемещения на ударяемом торце мерного стержня и контактной поверхности передающего кольца.

В дальнейшем заменим регистрацию деформаций тензодатчиками в физическом эксперименте регистрацией деформаций в математическом эксперименте. Осуществим численное моделирование волнового процесса в системе «ударник–передающее кольцо–образец–опорный мерный стержень» в осесимметричной постановке с использованием ППП «Динамика–2» [7]. Рассмотрим 2 схемы нагружения: 1) передающее кольцо движется совместно с ударником с начальной скоростью V_0 ; 2) передающее кольцо покоится, ударник движется с начальной скоростью V_0 . Соответствующие результаты расчетов скоростей деформаций помечены цифрами 1 и 2 на рис. 2 при начальной скорости удара $V_0 = 3$ м/с. В случае, когда передающее кольцо движется совместно с ударником, в рабочей части колпачка (длиной $0.6 \cdot 10^{-2}$ м и толщиной $0.1 \cdot 10^{-2}$ м) скорость деформации составляет $1 \cdot 10^2$ – $4 \cdot 10^2$ 1/с при степени деформации 6–7%. При удвоении массы ударника степень деформации увеличивается до 20% при незначительном влиянии на скорость деформации. На рис. 3 представлены деформации, регистрируемые в тензодатчиках А и В мерного стержня. Фиолетовым и зеленым цветами отмечены деформации на датчиках А и В в случае, когда передающее кольцо движется вместе с ударником, а красным и синим – когда покоится.

Измеряемые деформации в случае, когда передающее кольцо покоится, содержат большие осцилляции, чем в том, когда передающее кольцо движется совместно с ударником. Это связано с тем, что при ударе в кольце возникает

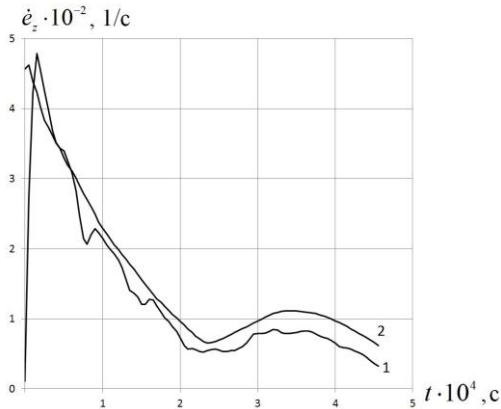


Рис. 2

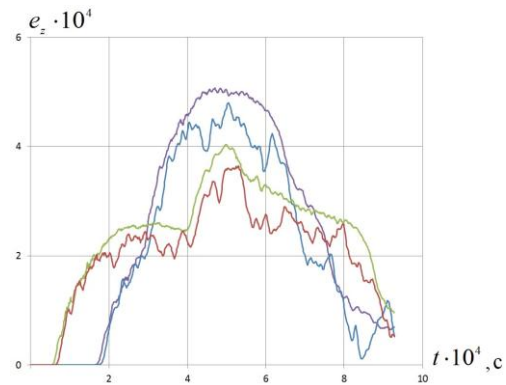


Рис. 3

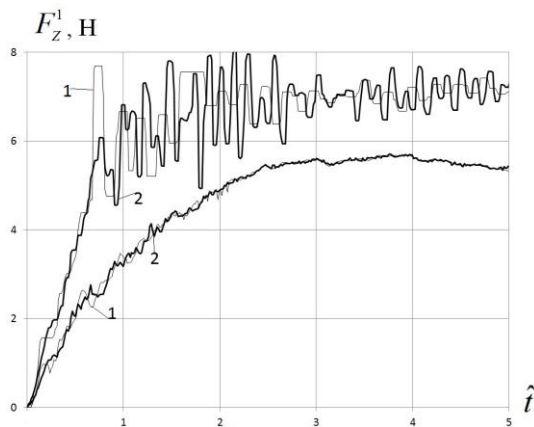


Рис. 4

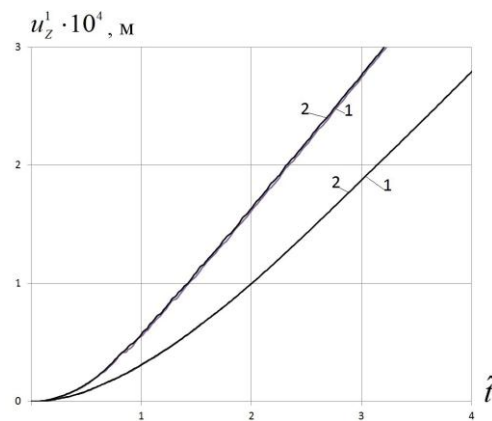


Рис. 5

волновой процесс, который со временем затухает. Если ударник и передающее кольцо двигаются совместно, волновой процесс проявляется в меньшей степени, т.к. плотность материала и масса колпачка значительно ниже, чем у передающего кольца. Поэтому схема эксперимента, когда передающее кольцо и ударник двигаются совместно до момента удара, более предпочтительна.

В дальнейшем будем рассматривать совместное движение ударника и передающего кольца, поэтому массу в уравнении движения ударника (3) будем принимать суммарной.

Верификация методики

Для верификации методики и оценки погрешности восстановления усилий, перемещений и скоростей перемещений на контактных поверхностях мерного стержня и передающего кольца на рис. 4–7 представлены результаты расчетов при скоростях удара $V_0 = 3, 5$ м/с в осесимметричной постановке (кривые 1) и в одномерной модели (кривые 2). Схема и геометрические параметры элементов копровой

установки представлены на рис. 1. Показания двух датчиков брались из расчетов в осесимметричной постановке.

На рис. 4 приведены зависимости осевой силы на ударяемом торце мерного стержня от безразмерного времени $F_z^1(\hat{t})$, полученные из одномерного и осесимметричного расчета. Безразмерное время $\hat{t} = t/T$, где $T = 68$ мкс – время пробега упругой волны по суммарной длине ударника $L_4 = 0.3$ м и кольца $L_3 = 0.05$ м.

На рис. 5 приведены зависимости перемещений на ударяемом торце мерного стержня от безразмерного времени $u_z^1(\hat{t})$, полученные интегрированием по формуле (2) и из осесимметричного расчета. На рис. 6 приведены зависимости скоростей перемещений на контактной поверхности передающего кольца с колпачком от безразмерного времени $\dot{u}_z^3(\hat{t})$, полученные интегрированием уравнения движения ударника и передающего кольца (3) и осесимметричного расчета. На рис. 7 приведена зависимость $\Delta l/L_2(\hat{t})$ от безразмерного времени, где $\Delta l = u_z^3 - u_z^1$.

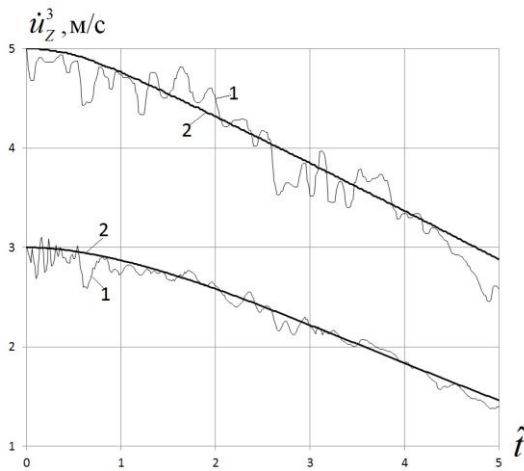


Рис. 6

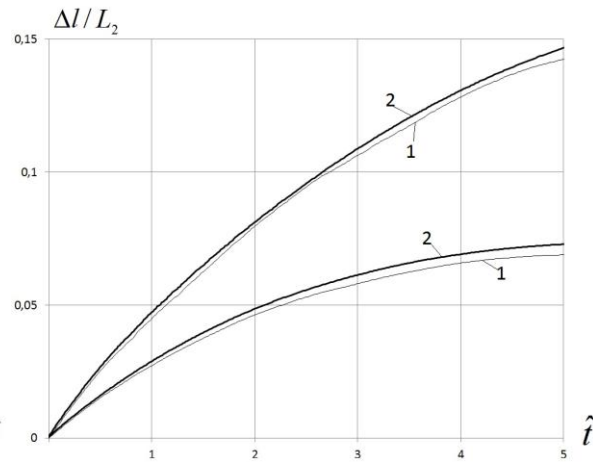


Рис. 7

Различия расчета осевых сил и скоростей перемещений в осесимметричной и в одномерной постановках не превышают 5%, а по деформациям и перемещениям – не более 2%. Следовательно, при обработке результатов физического эксперимента основные погрешности будут зависеть от точности регистрации начальной скорости удара и деформаций датчиками в мерном стержне.

При сопоставлении схем динамического испытания материалов методом разрезного стержня Гопкинсона и методом прямого удара необходимо отметить, что каждая из этих схем имеет свои достоинства и недостатки. В экспериментах по схеме Гопкинсона формируется импульс нагружения, близкий к прямоугольному, и, следовательно, скорость деформации в испытуемом образце близка к постоянной. Эту схему трудно реализовать в газодинамической установке копрового типа из-за большой протяженности стержней. Метод прямого удара, из-за наличия только одного мерного стержня, обладает меньшей точностью определения величин сил и скоростей перемещений на контактных поверхностях образца, но позволяет достичь большей энергии удара, а следовательно, и степени деформации при малых и больших скоростях удара. Поэтому он предпочтителен при использовании двух датчиков деформации для испытаний на растяжение-сжатие при небольших деформациях и больших временах процесса деформирования вплоть до разрушения. При этом точность оценки параметров процессов деформирования достаточно высока, поскольку время установления волнового процесса в испытуемом образце пренебрежимо мало.

Заключение

Проведено численное моделирование процесса деформирования образцов колпачкового типа при растяжении на вертикальной газодинамической установке. Установлено, что схема испытаний в случае, когда промежуточное кольцо, передающее усилие на испытуемый образец, движется вместе с ударником, является более предпочтительной по сравнению со схемой, когда кольцо покоится, так как волновая стадия процесса сокращается по времени.

Посредством сопоставления результатов расчета процесса удара в осесимметричной и одномерной постановках показано, что погрешность восстановления усилий, скоростей перемещений и перемещений в испытуемых образцах на основе одномерной модели не превышает 5%.

Сделан вывод, что применение метода прямого удара предпочтительно при низких скоростях удара и(или) при больших деформациях до разрушения.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, Совета по грантам Президента РФ для Ведущих научных школ (грант НШ-2843.2012.8), а также при финансовой поддержке РФФИ (проекты 11-08-00565а, 12-08-31190-мол_а, 12-08-33106-мол_а_вед, 12-08-12044-офи_м), при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашения 14.В37.21.1902, 14.В37.21.1495).

Список литературы

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

2. Mohr D., Gary G. High strain rate tensile testing using a split Hopkinson pressure bar apparatus // J. Phys. IV. 2006. Vol. 134. P. 617–622.

3. Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain // Exp. Mech. 1981. Vol. 21. № 5. P. 177–195.

4. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К. и др. Высокоскоростная деформация алюминиевого сплава АК4-1 и титана ВТ6 // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Сборник тезисов докладов международной конференции «IX Харитоновские тематические научные чтения». 12–16 марта 2007 года. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2007. С. 179–180.

5. Баженов В.Г., Баранова М.С., Павленкова Е.В. и др. Численное моделирование экспериментов на растяжение при ударном нагружении образцов кол-

пачкового типа на газодинамической копровой установке // В сб.: Проблемы прочности и пластичности. Вып. 75, часть 2. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2013. С. 88–95.

6. Баженов В.Г., Баранова М.С., Павленкова Е.В. Методика исследования упругопластических характеристик материалов на газодинамической копровой установке по показаниям двух датчиков деформаций // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 6(1). С. 154–157.

7. Баженов В.Г., С.В. Зефилов, А.В. Кочетков и др. Пакет программ «Динамика-2» для решения плоских и осесимметричных нелинейных задач нестационарного взаимодействия конструкций со сжимаемыми средами // Мат. моделирование. 2000. Т. 12. № 6. С. 67–72.

NUMERICAL MODELING OF TENSILE EXPERIMENTS WITH HAT-SHAPED SPECIMENS BY DIRECT IMPACT METHOD

V.G. Bazhenov, M.S. Baranova, E.V. Nagornyykh, D.V. Shoshin

We study numerical modeling of elasto-viscoplastic deformation processes under tensile stress of hat-shaped specimen by direct impact method in the axisymmetric and one-dimensional formulations. The accuracy of reconstruction of force displacements and velocities of displacement in the hat-shaped specimens, obtained on the basis of the one-dimension model, is evaluated.

Keywords: vertical gas-gun stand, direct impact method, hat-shaped specimens, impact tension, elasto-viscoplastic characteristics.

References

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

2. Mohr D., Gary G. High strain rate tensile testing using a split Hopkinson pressure bar apparatus // J. Phys. IV. 2006. Vol. 134 P. 617–622.

3. Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain // Exp. Mech. 1981. Vol. 21. № 5. P. 177–195.

4. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К. и др. Высокоскоростная деформация алюминиевого сплава АК4-1 и титана ВТ6 // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Сборник тезисов докладов международной конференции «IX Харитоновские тематические научные чтения». 12–16 марта 2007 года. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2007. С. 179–180.

5. Bazhenov V.G., Baranova M.S., Pavlenkova E.V. i dr. Численное моделирование экспериментов на растяжение при ударном нагружении образцов колпачкового типа на газодинамической копровой установке // В сб.: Проблемы прочности и пластичности. Вып. 75, часть 2. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2013. С. 88–95.

6. Bazhenov V.G., Baranova M.S., Pavlenkova E.V. Методика исследования упругопластических характеристик материалов на газодинамической копровой установке по показаниям двух датчиков деформаций // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 6(1). С. 154–157.

Bazhenov V.G., S.V. Zefirov, A.V. Kochetkov i dr. Пакет программ «Динамика-2» для решения плоских и осесимметричных нелинейных задач нестационарного взаимодействия конструкций со сжимаемыми средами // Мат. моделирование. 2000. Т. 12. № 6. С. 67–72.