

УДК 539.3

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ  
НА РАСТЯЖЕНИЕ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ  
ОБРАЗЦОВ КОЛПАЧКОВОГО ТИПА  
НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ КОПРОВОЙ УСТАНОВКЕ\***

© 2013 г. **В.Г. Баженов, М.С. Баранова, Е.В. Павленкова,  
Д.В. Жегалов, М.Н. Жестков**

*НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского*

pavlyonkova@mech.unn.ru

*Поступила в редакцию 27.03.2013*

Численно исследованы процессы упруговязкопластического деформирования при растяжении образцов колпачкового типа при скоростях деформации порядка  $10^2 \text{ с}^{-1}$  с целью оценки скоростей и степеней деформации, реализуемых в экспериментах динамического разрушения конструкционных материалов на газодинамической копровой установке.

*Ключевые слова:* газодинамическая копровая установка, образцы колпачкового типа, ударное растяжение, упруговязкопластические характеристики.

### **Введение**

Исследование поведения металлов и сплавов при высокоскоростном деформировании является достаточно актуальным в связи с развитием в промышленности новых технологий обработки материалов. В настоящее время существует достаточно много экспериментальных методик исследования поведения материалов в условиях динамического нагружения. Наиболее распространенные из них – испытания с использованием 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. Недостатком таких испытаний является наличие изгибных компонент напряжений и деформаций в образце, что вносит погрешность в построение диаграммы деформирования в предположении однородного напряженно-деформированного состояния (НДС). Д. Мор и Г. Гари [2] предложили в испытаниях на растяжение использовать образец колпачкового типа, который позволяет производить исследования динамических свойств материалов с использованием стандартной установки разрезного стержня Гопкинсона. Другой вариант испытаний на

---

\* Работа выполнена при частичном финансировании Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-2843.2012.8), Министерством образования и науки РФ (соглашения 14.В37.21.1902, 14.В37.21.1495) и РФФИ (проекты 11-08-00565а, 12-08-31190-мол\_а, 12-08-33106-мол\_а\_вед, 12-08-12044-офи\_м).

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  $2000 \text{ с}^{-1}$ .

Все вышеперечисленные методики основываются на схеме Гопкинсона и методе Кольского. Экспериментальные исследования характеристик разрушения на образцах колпачкового типа связаны с большими погрешностями, вызванными неоднородностью НДС, так как обычно НДС образца принимают однородным. Также отсутствует анализ достоинств и недостатков использования вместо мерных стержней трубчатых опорных и измерительных элементов. Очевидно поэтому экспериментальные исследования характеристик разрушения на образцах колпачкового типа не получили распространения. Возникают также технические сложности при получении характеристик разрушения в диапазоне скоростей деформации  $10^2 \text{ с}^{-1}$ . Этим вопросам и посвящена настоящая статья.

### Исследование одномерных волновых процессов в стержне и трубе

В качестве опорных измерительных элементов при испытаниях образцов колпачкового типа различными исследователями используются сплошные или трубчатые стержни. Для оценки погрешности обработки результатов экспериментальных измерений, вызванной учетом поперечных колебаний, проводились численные исследования волнового процесса при ударном нагружении труб и стержней с применением пакета прикладных программ «Динамика-2» [5] в осесимметричной постановке.

Мерные стержни рассматривались как идеально упругие с механическими характеристиками:  $K = 1,7917 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ,  $G = 8,269 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ ,  $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Длина стержней  $L = 0,65 \text{ м}$ , внешний радиус трубы  $R_1 = 0,03 \text{ м}$ , внутренний радиус  $R_2 = 0,0217 \text{ м}$ . Сплошные стержни брались двух диаметров: радиус первого стержня равен внешнему радиусу трубы, радиус второго стержня  $R_1 = 0,0207 \text{ м}$ , площадь его поперечного сечения равна площади поперечного сечения трубы.

При  $t > 0$  на ударяемом торце задавалась постоянная осевая скорость  $V = 9,6 \text{ м/с}$ . Противоположный торец имел нулевую осевую скорость. Трение не учитывалось. На расстоянии  $15 \text{ см}$  от ударяемого и опертого торцов располагались тензодатчики, регистрирующие деформации. Расчеты проводились на квадратной разностной сетке, имеющей  $198$  ячеек по длине,  $9$  и  $6$  ячеек по радиусу соответственно первого и второго стержней и  $2$  ячейки по толщине трубы. Для устранения нефизических осцилляций применялось сглаживание разрывных решений.

На рис. 1–3 приведено сравнение осевых деформаций в местах установки датчиков на трубе, первом и втором стержнях соответственно в одномерной (кривые 1 и 2) и осесимметричной (кривые 3 и 4) постановках. Здесь  $e^A$  – осевая деформация вблизи ударяемого торца стержня,  $e^B$  – осевая деформация вблизи опертого торца. Время пробега волны по трубе (стержню) определяется по формуле  $T = L/c$ , где  $c$  – скорость распространения одномерных волн в трубе (стержне).

Расчет показывает, что в осесимметричной постановке, в отличие от одномерной, наблюдаются осцилляции амплитуд продольных деформаций, вызванные по-

перечными колебаниями трубы и стержней. Амплитуда и период осцилляций деформаций в трубе больше, чем в стержнях. Ввиду разрывности скорости перемещений при ударном нагружении при  $t = 0$  первый пик является физически недостоверным, так как вызван дисперсией численного решения. В дальнейшем колебания медленно затухают из-за консервативного сглаживания численного решения. Амплитуды осцилляций продольных деформаций в трубе больше, чем в сплошном стержне того же поперечного сечения, в 1,5 раза. Численные результаты хорошо согласуются с известным из эксперимента и теории фактом – чем тоньше стержень, тем меньше амплитуда поперечных колебаний по отношению к уровню деформаций.

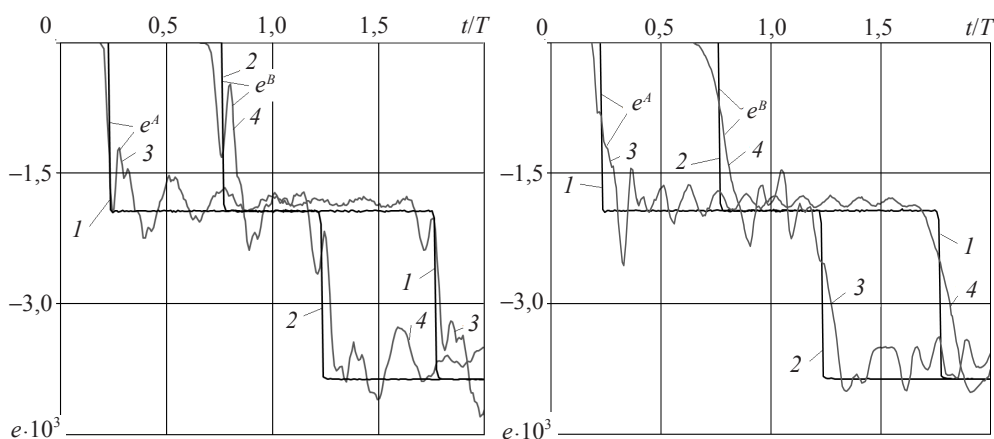


Рис. 1

Рис. 2

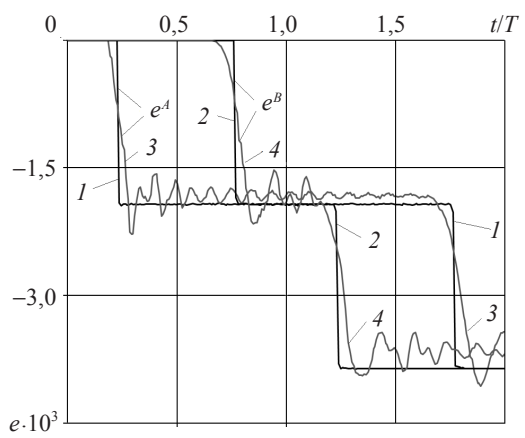


Рис. 3

**Экспериментальное и численное исследование процесса деформирования при растяжении образцов колпачкового типа на вертикальной газодинамической установке**

В НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского разработана пневмодинамическая установка вертикального типа. Это вертикальный копер с падающим грузом (бойком), имеющий пневматическое разгонное устройство, соединенное со стволом. Диапазон скоростей удара от 3 до 60 м/с, масса ударника от 3 до 10 кг.

Основными элементами установки являются ударник, образец и мерный стержень. Испытуемый образец устанавливается на торце измерительного стержня с наклеенными по схеме «мост» тензодатчиками (силоизмеритель). Установка снабжена электронным измерителем скорости бойка при ударе.

При численном моделировании волнового процесса в системе ударник–образец–мерный стержень при растяжении применялась расчетная схема, изображенная на рис. 4: 1 – ударник, 2 – передающая труба, 3 – испытуемый образец колпачкового типа, 4 – мерный стержень. Здесь  $Oz$  – ось симметрии.

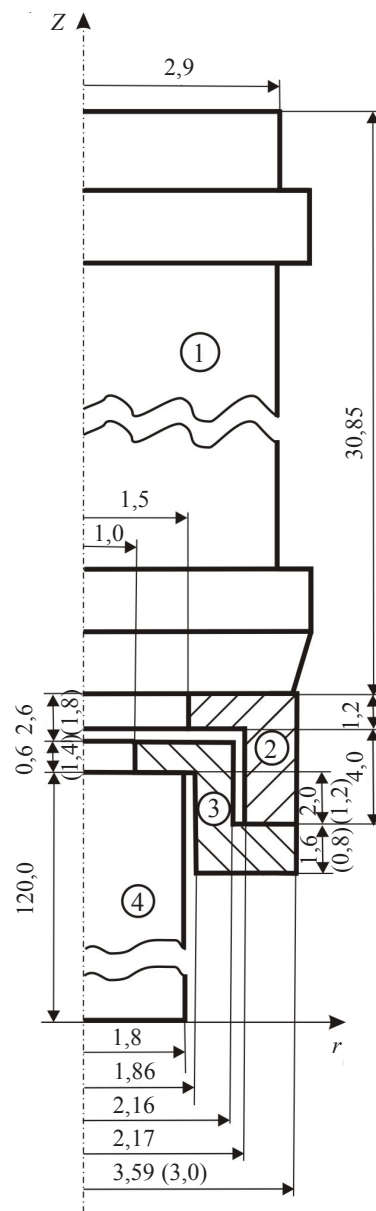


Рис. 4

В начальный момент времени образец типа колпачка доньшком опирается на мерный стержень. На фланец колпачка опирается передающая труба. Ударник движется с заданной скоростью  $V_0$ . После удара по передающей трубе растягивающее усилие передается на фланец колпачка.

На расстоянии 20 см от ударяемого края мерного стержня расположен тензометрический датчик, регистрирующий импульс осевой деформации. Геометрические размеры, с которыми производился расчет, приведены на схеме рис. 4 (в см), масса ударника 7,5 кг.

Полагалось, что ударник, передающая труба и мерный стержень деформируются упруго, образец – упругопластически. Механические характеристики элементов копровой установки приведены в таблице 1.

Таблица 1

	Ударник	Труба	Образец	Мерный стержень
Номер подобласти (рис. 4)	1	2	3	4
Материал	Сталь 20	Сталь 20	Д16	Сталь 35ХГСА
$K$ , МПа	$1,77 \cdot 10^5$	$1,77 \cdot 10^5$	$6,25 \cdot 10^4$	$1,79 \cdot 10^5$
$G$ , МПа	$8,15 \cdot 10^4$	$8,15 \cdot 10^4$	$2,89 \cdot 10^4$	$8,27 \cdot 10^4$
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$7,8 \cdot 10^3$	$7,8 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^3$	$7,8 \cdot 10^3$
$\sigma_T$ , МПа			$4,5 \cdot 10^2$	

В расчетах применялась истинная диаграмма деформирования материала Д16 (рис. 5), которая была получена на основе экспериментов по динамическому сжатию образцов-таблеток по методике, описанной в [6]. Материал оказался нечувствительным к скорости деформации.

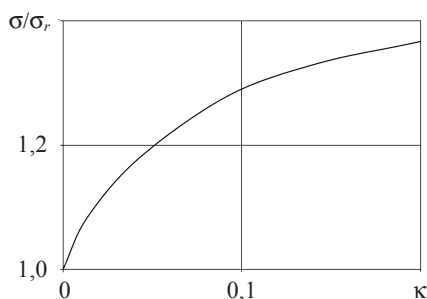


Рис. 5

При моделировании контактного взаимодействия элементов копровой установки применялся алгоритм контакта с отрывом на несогласованных сетках без учета сил трения.

В процессе деформирования при скорости удара  $V_0 = 30,7$  м/с наблюдался «изгиб» меридионального сечения образца. При этом произошел частичный отрыв контактных поверхностей доньшка и мерного стержня. Внешняя поверхность образца в процессе деформирования вступила в контакт с внутренней поверхностью передающей трубы. Вследствие этого наблюдалась существенная неоднородность НДС рабочей части образца. Поэтому было решено изменить геометрические размеры колпачка, усилив его опорные части. Измененные размеры приведены на рис. 4 в скобках. Длина рабочей части уменьшена с 2 до 1,2 см; толщина доньшка увеличе-

на с 0,6 до 1,4 см; радиус фланца и передающей трубы уменьшен с 3,59 до 3 см.

Расчет с измененными размерами и при той же начальной скорости удара показал, что отрыва доньшка от мерного стержня по линии контакта не происходит, а НДС рабочей части колпачка стало более однородным.

Согласно второй рассмотренной схеме были изготовлены образцы. В эксперименте ударник массой 5 кг двигался с начальной осевой скоростью 9,6 м/с. На рис. 6 приведены временные зависимости осевой силы в тензодатчике, расположенном на расстоянии 0,3 м от ударяемого торца мерного стержня. Наблюдается удовлетворительное согласование значений напряжений в эксперименте (кривая 1) и расчете (кривая 2). Здесь  $T$  – время пробега волны по мерному стержню,  $F_T = \sigma_T S$ ,  $\sigma_T$  – предел текучести,  $S$  – площадь поперечного сечения рабочей части образца. Средняя деформация рабочей части образца порядка 4%.

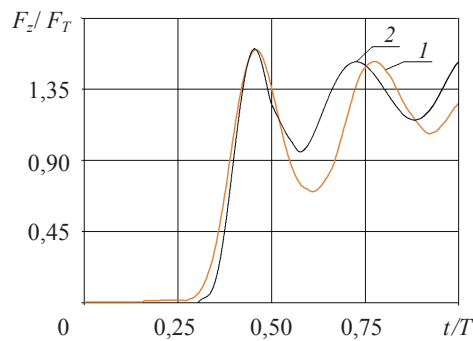


Рис. 6

### Исследование влияния параметров образцов и элементов газодинамической копровой установки на процесс растяжения

Проведен анализ влияния длины ударника, длины и толщины рабочей части образца колпачкового типа, длины и толщины опорной трубы на скорость и степень деформации при моделировании процесса растяжения образца в копровой установке. Рассматривалась следующая схема (рис. 7): ударник 1, мерный стержень 2, образец колпачкового типа 3, труба 4.

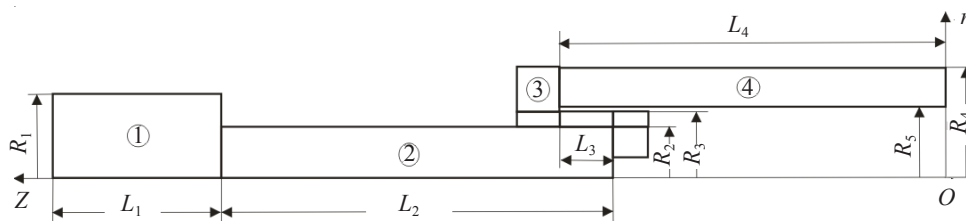


Рис. 7

Геометрические параметры установки, варьируемые при численном моделировании, приведены в таблице 2. Здесь  $m_1 = 10$  кг,  $R_1 = 0,0364$  м,  $l_1 = 0,3085$  м,  $R_2 = 0,018$  м,  $L_2 = 0,65$  м,  $l_3 = 0,006$  м,  $h_3 = R_3 - R_2 = 0,001$  м,  $R_4 = 0,03$  м,  $R_5 = 0,0217$  м,  $l_4 = 0,325$  м,  $Oz$  – ось симметрии. Начальная скорость ударника 3 м/с.

Таблица 2

	Масса ударника $m_1$	Длина ударника $L_1$	Длина рабочей части образца $L_3$	Толщина рабочей части колпачка $H_3$	Длина трубы $L_4$
1	$m_1$	$2l_1$	$l_3$	$3h_3$	$2l_4$
2	$2m_1$	$2l_1$	$4l_3$	$h_3$	$l_4$
3	$2m_1$	$2l_1$	$4l_3$	$h_3$	$2l_4$
4	$m_1$	$l_1$	$4l_3$	$h_3$	$l_4$
5	$m_1$	$l_1$	$2l_3$	$h_3$	$2l_4$
6	$m_1$	$l_1$	$4l_3$	$h_3$	$2l_4$
7	$m_1$	$l_1$	$4l_3$	$3h_3$	$2l_4$
8	$2m_1$	$2l_1$	$2l_3$	$h_3$	$2l_4$

Кривыми 1–8 на рис. 8 обозначены зависимости условной деформации в рабочей части образца от времени, а на рис. 9 – зависимости скоростей деформации от времени. Номерам кривых на рис. 8 и 9 соответствуют номера строк в таблице 2.

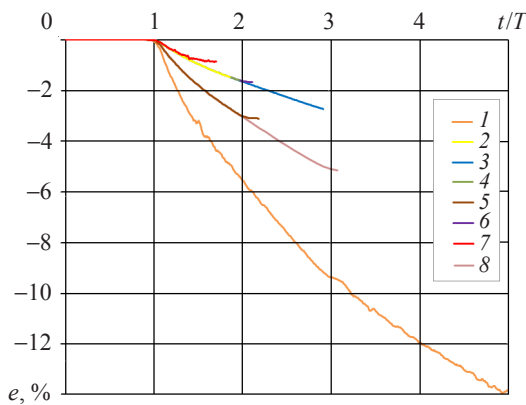


Рис. 8

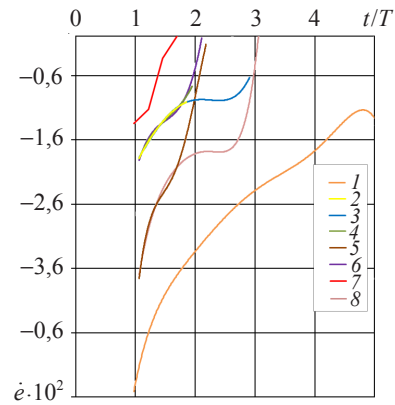


Рис. 9

Наибольшая степень деформации порядка 14% достигается на кривой 1 при скорости деформации  $5,5 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$  в случае  $L_1 = 2l_1$ ,  $L_3 = l_3$ ,  $H_3 = 3h_3$ ,  $L_4 = 2l_4$ ,  $m_1 = 10 \text{ кг}$ . Наименьшая скорость деформации составляет  $1,5 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$  в случае  $L_1 = l_1$ ,  $L_3 = 4l_3$ ,  $H_3 = 3h_3$ ,  $L_4 = 2l_4$ ,  $m_1 = 10 \text{ кг}$  (кривая 7).

### Заключение

Проведено численное и физическое моделирование процесса деформирования образцов колпачкового типа при растяжении на вертикальной газодинамической установке. Установлено, что амплитуда осцилляций деформаций в опорной трубе значительно больше, чем в стержнях эквивалентного поперечного сечения. Подобраны наиболее подходящие размеры образцов колпачкового типа и мерного стержня сплошного сечения.

Проведен анализ влияния параметров вертикальной газодинамической копро-вой установки: массы, длины и начальной скорости ударника, длины и толщины рабочей части образца колпачкового типа на процесс растяжения. Показано, что достижимы скорости деформации порядка  $1,5 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$  при степенях деформации, достаточных для вязкого разрушения образцов с концентраторами напряжений.

Диапазон скоростей деформации порядка  $10^2$  в настоящее время сложно реализовать на горизонтально расположенных газодинамических испытательных установках.

#### Список литературы

1. Lindholm U.S., Yeakley L.M. High strain-rate testing: tension and compression // Exp. Mech. 1968. Vol. 8, No 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, No 5. P. 177–185.
4. Высокоскоростная деформация алюминиевого сплава АК4-1 и титана ВТ6 / А.М. Брагов, А.Ю. Константинов, А.К. Ломунов, И.В. Сергеичев, А.Р. Филиппов, Ю.Н. Шмотин // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Сб. тез. докл. Международ. конф. «IX Харитоновские тематические научные чтения». 12–16 марта 2007 г. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. С. 179–180.
5. Пакет программ «Динамика-2» для решения плоских и осесимметричных нелинейных задач нестационарного взаимодействия конструкций со сжимаемыми средами / В.Г. Баженов, С.В. Зефирова, А.В. Кочетков и др. // Мат. моделирование. 2000. Т. 12, №6. С. 67–72.
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: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2009. Вып. 71. С. 184–192.

#### NUMERICALLY MODELLING TENSILE EXPERIMENTS WITH CAP-SHAPED SPECIMENS UNDER IMPACT LOADING ON A VERTICAL GAS-GUN STAND

V.G. Bazhenov, M.S. Baranova, E.V. Pavlenkova, D.V. Zhegalov, M.N. Zhestkov

The paper deals with numerically investigating the processes of elasto-viscoplastic deformation of cap-shaped specimens loaded in tension in the strain-rate range of  $10^2 \text{ s}^{-1}$  to evaluate strain rates and values implemented in the experiments on dynamic failure of structural materials on a vertical gas-gun stand.

*Keywords:* vertical gas-gun stand, cap-shaped specimens, impact tension, elasto-viscoplastic characteristics.