

УДК 539.3

## АДЕКВАТНОСТЬ УПРОЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

**М.В. Чернобрывко, к.т.н., ст. научн. сотр.,  
Ю.С. Воробьёв, профессор, д.т.н., ИПМаш имени А.Н. Подгорного НАН Украины,  
А.В. Ярыжко, доцент, к.т.н., ХНАДУ**

*Аннотация.* Проведен сравнительный анализ упрощенных математических моделей высокоскоростного упруго-пластического деформирования цилиндрических оболочек, основанный на сравнении с экспериментальными данными. Показано, что нестационарная двухмерная модель должна учитывать динамические свойства материала и температурные параметры.

*Ключевые слова:* математическая модель, высокоскоростное деформирование, упруго-пластические деформации, цилиндрическая оболочка, динамические свойства материала.

## АДЕКВАТНІСТЬ СПРОЩЕНИХ МОДЕЛЕЙ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК

**М.В. Чернобрывко, к.т.н., ст. наук. співроб.,  
Ю.С. Воробйов, професор, д.т.н., ІПМаш імені А.М. Підгорного НАН України,  
О.В. Ярижко, доцент, к.т.н., ХНАДУ**

*Анотація.* Проведено порівняльний аналіз спрощених математичних моделей високошвидкісного пружно-пластичного деформування циліндричних оболонок, що ґрунтується на порівнянні з експериментальними даними. Показано, що нестационарна двовірна модель має враховувати динамічні властивості матеріалу і температурні параметри.

*Ключові слова:* математична модель, високошвидкісне деформування, пружно-пластичні деформації, циліндрична оболонка, динамічні властивості матеріалу.

## ADEQUATE SIMPLIFIED MODELS OF HIGH-SPEED DEFORMATION OF CYLINDRICAL CASINGS

**M. Chernobryvko, Associate Professor, Candidate of Engineering Science,  
Yu. Vorobyov, Professor, Doctor of Engineering Science, Institute for Mechanical  
Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
A. Yaryzhko, Associate Professor, Candidate of Engineering Science, KhNAHU**

*Abstract.* Comparative analysis of simplified mathematical models of high-speed elasto-plastic strain of cylindrical casings based on comparison with experimental data has been made. A non-stationery two-dimentional model has been shown to consider both the dynamic properties of the material and temperature parameters.

*Key words:* mathematical model, high-rate deforming, elastic-plastic deformation, cylindrical shell, dynamic properties of materials.

### Введение

Цилиндрические оболочки широко применяются в транспортном машиностроении, в частности, как газовые баллоны. В аварий-

ной ситуации они могут подвергаться высокоинтенсивной импульсной внутренней нагрузке, распределенной по всей поверхности оболочки. В этом случае еще на стадии проектирования возникает вопрос оценки динамического поведения конструкции и сохранения ее целостности в нештатной ситуации. Такие исследования целесообразно проводить путем компьютерного моделирования нестационарного поведения оболочки. При этом необходимо предварительно исследовать адекватность выбранной математической модели реальному поведению конструкционного материала при высоких скоростях деформаций.

### Анализ публикаций

При расчете параметров высокоскоростного упруго-пластического деформирования цилиндрических оболочек рациональным является использование упрощенных математических моделей, степень адекватности которых реальным процессам различна [1]. Основным критерием выбора той или иной модели является, наряду с трудоемкостью счетного процесса, мера соответствия теоретических и экспериментальных результатов [2].

Моделирование процессов деформирования металлических конструкций при воздействии на них импульсных нагрузок механического характера связано с необходимостью учета целого ряда факторов [3]. Экспериментально установлено существование зависимости механических параметров материала конструкции от температуры и скорости деформации [4]. В частности адиабатический разогрев вызывает разупрочнение металла, а высокоскоростное деформирование под действием импульсной механической нагрузки ведет к повышению его пределов текучести и прочности [5, 6]. Таким образом, исследование напряженно-деформированного состояния металлических конструктивных элементов связано с необходимостью отыскания напряжения  $\sigma$  как функции времени  $t$ , деформации  $\varepsilon$ , ее скорости  $\dot{\varepsilon}$  и температуры  $T$ :  $\sigma = \sigma(t, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$  [7].

### Цель и постановка задачи

В общей постановке задача носит нелинейный характер [8] и требует значительных временных затрат на численные исследования. Однако в ряде случаев модель можно

упростить. При этом математическое моделирование должно включать определение параметров для уравнения состояния конкретного металла как в упругой, так и в пластической областях с учетом того, что температура подчиняется адиабатическому закону [8]. Поэтому целесообразно проводить теоретико-экспериментальные исследования поставленной задачи на базе численного моделирования и использования эмпирических зависимостей для динамических характеристик металлов [1, 2, 6].

Целью работы является сравнительный анализ адекватности построенных математических моделей реальному процессу деформирования, зарегистрированному экспериментально.

В качестве сопоставляемых математических моделей рассматривались: модель цилиндрического слоя конечной длины с учетом влияния скорости деформации на закон упрочнения материала в степенной форме и влияния тепловых параметров; модель движения цилиндрического слоя без учета влияния температуры на динамические свойства материала; модель одномерного высокоскоростного расширения цилиндра; модель без учета влияния скорости деформации на динамические параметры. Расчет по перечисленным четырем моделям сравнивался с экспериментальными данными.

### Экспериментальные исследования

Исследовалось деформирование цилиндрической оболочки. Разработанная в ИПМаш НАН Украины технология использования широкополосной тензометрической станции для регистрации высокоскоростных процессов позволяет определить величину деформаций и скоростей деформаций на малых интервалах времени (до 5–10 мкс) [1]. Цилиндрическая оболочка находится под действием внутреннего ударно-импульсного нагружения большой интенсивности, возникающего, например, при детонационной нагрузке.

В очаге нагружения и его окрестности возникает зона пластического деформирования и значительные прогибы, что не дает возможности проводить многократное нагружение для одной и той же конструкции. Волновой характер процесса деформирования

требует охвата точками измерения большой поверхности оболочки, а большие градиенты деформаций в зоне нагружения – достаточной плотности размещения точек измерения. При этом датчики расположены в точках вдоль главных направлений тензора деформации – в осевом и окружном сечениях (рис. 1). Принятая схема размещения тензорезисторов позволяет регистрировать главные деформации  $\varepsilon_r$  и  $\varepsilon_\theta$  в ряде точек поверхности в осевом и меридиональном сечениях.

### Анализ упрощенных моделей

По результатам серии экспериментов был выполнен сравнительный анализ результатов, полученных численным путем с применением выше перечисленных математических моделей, с экспериментальными данными. Значения параметров материала принимались следующие: модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3-0,5$ ; плотность  $\rho = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; динамические параметры материала  $\lambda n = 0,992$ ;  $D = 396$  с<sup>-1</sup>;  $n = 7,14$ .

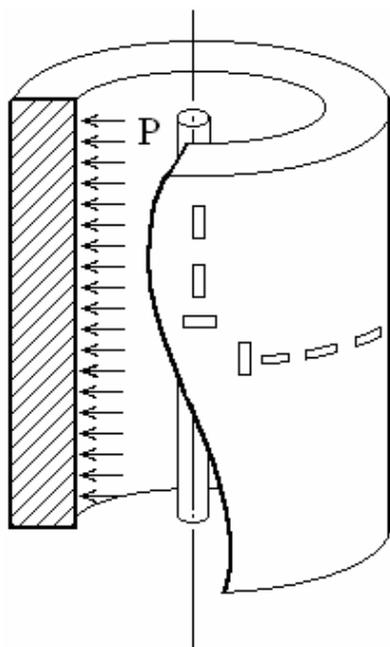


Рис. 1. Схема нагружения оболочки

На рисунке 2 представлено сравнение экспериментальных (кривая 1) и теоретических данных, полученных при значениях нагрузки  $P_{\max} = 3,734 \cdot 10^8$  Па, время затухания импульса  $Q = 7,1 \cdot 10^{-6}$  с.

Математические модели изображены в следующем порядке: модель цилиндрического

слоя конечной длины с учетом влияния скорости деформации на закон упрочнения материала в степенной форме, а также влияния тепловых параметров (кривая 2). Кривая 3 соответствует результатам, полученным при исследовании движения цилиндрического слоя без учета термокинетических свойств материала. Кривая 4 отражает данные, полученные для одномерной схемы высокоскоростного расширения цилиндра; кривая 5 соответствует результатам, полученным при решении задачи без учета влияния скорости деформации на динамические параметры.

Анализ результатов исследования показывает, что двумерная постановка задачи позволяет получить приемлемую точность решения, аппроксимируя экспериментальную кривую лучше, чем одномерная схема. Помимо этого следует отметить, что для данного материала (конструкционная сталь Х18Н10Т) существенным является учет влияния скорости деформации на динамические параметры. Моменты времени, когда скорость деформации равна нулю и в материале начинается разгрузка, определяемые по кривым 2 и 3, приблизительно равны, сильно отличаясь от времени разгрузки, определяемого по кривой 5. Результаты, получаемые с использованием двумерной модели деформирования, хорошо согласуются с экспериментальными данными для широкого класса относительных толщин и при различных нагрузках.

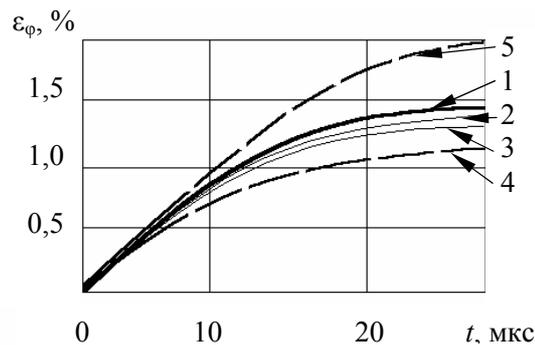


Рис. 2. Сравнение результатов расчетов

На рис. 3 показано изменение во времени интенсивности напряжений для экспериментальных исследований (кривая 1), теоретических исследований без учета (кривая 2) и с учетом (кривая 3) скорости деформаций для конечного цилиндрического слоя. Качественный анализ представленных зависимостей показывает что характер их изменений

совпадает, коэффициент множественной корреляции для кривой 2 равен  $\rho = 0,904$ , для кривой 3 –  $\rho = 0,958$ .

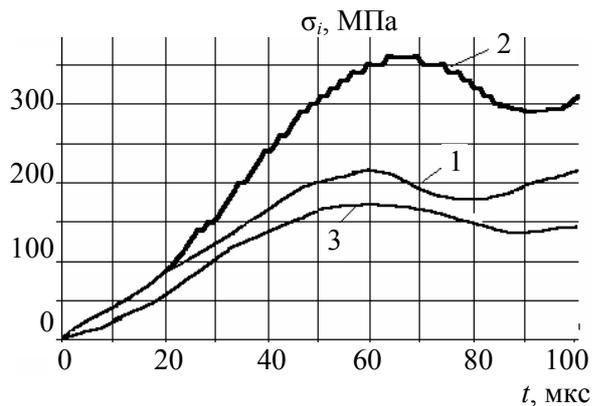


Рис. 3. Интенсивность напряжений

### Выводы

Проверка адекватности показала, что рациональным следует считать выбор двумерной математической модели упруго-пластического деформирования конечного цилиндрического слоя, учитывающей влияние скорости деформации на величину предела текучести, а также влияние адиабатического разупрочнения.

### Литература

1. Воробьев Ю.С. Скоростное деформирование элементов конструкций / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, В.И. Севрюков, Е.И. Янютин. – К. : Наук. думка, 1989. – 192 с.
2. Степанов Г.В. Сопротивление металлов деформации при ударном нагружении / Г.В. Степанов // Пробл. прочности. – 2002. – № 3. – С. 7–14.
3. Воробьев Ю.С. Математическое моделирование скоростного деформирования материалов и элементов конструкций / Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрышко // Наукові нотатки. – 2009. – Вип. 25, Ч. II. – С. 31–38.
4. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – К. : Наук. думка, 1988. – 736 с.
5. Трощенко В.Г. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения / В.Г. Трощенко, А.А. Лебедев, В.А. Стрижало и др. – К. : Наук. думка, 2000. – 570 с.
6. Meyers M.A. Dynamics behavior of materials / M.A. Meyers. – New York: Wiley, 1994. – 283 p.
7. Чернобрышко М.В. Нестационарное термоупругопластическое деформирование многослойной составной оболочки / М.В. Чернобрышко // Надійність і довговічність машин і споруд. – 2006. – Вип. 27. – С. 145–152.
8. Chernobryvko M. Effect of the shock-wave loading on building and structural elements / M. Chernobryvko, Y. Vorobyov, L. Kruszka // Proceedings Seventh International Symposium on Impact Engineering. – Warsaw, Poland, 2010. – P. 163–168.

Рецензент: О.В. Полярус, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 30 мая 2012 г.