

## Математическое моделирование процесса упругопластического деформирования трубчатых энергопоглощающих элементов

Г.А. Арутюнян<sup>1</sup>, А.Б. Карташов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва 105005, Россия

*Обоснована актуальность применения трубчатых энергопоглощающих элементов для повышения взрывозащищенности военных автомобилей. Описаны особенности процесса деформирования трубчатых элементов. Предложен метод математического моделирования упругопластического деформирования трубчатых элементов. Адекватность результатов моделирования подтверждена проведенным экспериментом.*

**E-mail:** [george.arut@yandex.ru](mailto:george.arut@yandex.ru); [kartashov@bmstu.ru](mailto:kartashov@bmstu.ru)

**Ключевые слова:** *трубки круглого сечения, осевая деформация трубок, поглощение энергии, метод конечных элементов, явный метод интегрирования.*

В настоящее время к военным автомобилям все чаще предъявляются требования по взрывозащищенности, направленные на обеспечение выживания экипажа при подрыве автомобиля на минах или самодельных взрывных устройствах. Об актуальности темы свидетельствует большое количество автомобилей, созданных как в нашей стране, так и за рубежом. Среди российских разработок можно выделить машины СПМ-3 “Медведь”, “Скорпион-ЛТА”, семейства автомобилей “Тайфун” и “Волк”, принятый на вооружение автомобиль “Тигр”. В США существует программа MRAP (Mine-Resistant Ambush Protected) по созданию взрывозащищенных автомобилей.

Повышение защиты от подрыва на mine только путем увеличения толщины брони не позволяет достичь требуемых результатов. Кроме того, чрезмерное бронирование увеличивает массу машины, снижает ее вместимость и грузоподъемность. Поэтому необходимо искать новые конструктивные решения, одним из которых является использование в конструкции бронев автомобилей энергопоглощающих элементов.

На основании анализа отечественных и зарубежных разработок в области противоминной защиты было установлено, что в качестве энергопоглощающих элементов взрывозащищенных конструкций могут быть применены тонкостенные трубки различных конфигураций: круглого, квадратного или прямоугольного сечения; полые или заполненные пористым материалом. Трубки могут быть выполнены из различных материалов (алюминий, сталь, композиты), а также быть составными.

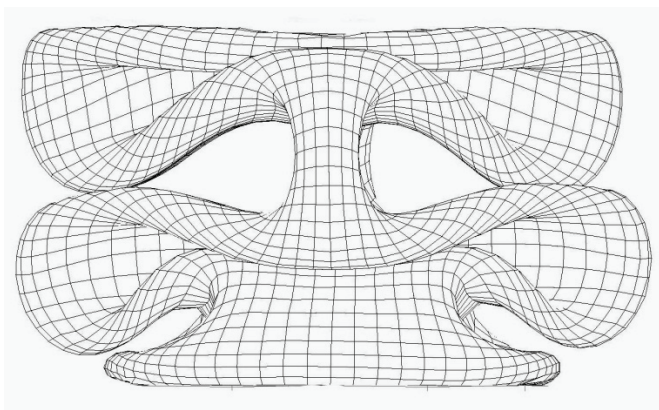
Широкое распространение получили тонкостенные алюминиевые трубки, так как они обладают высокой энергопоглощающей способностью при небольшой массе и обеспечивают практически постоянную силу при деформировании. При осевой деформации трубки весь ее материал участвует в поглощении энергии.

Согласно литературным источникам [4, 5], деформация трубки может иметь несколько форм:

- осесимметричную (также называется концентричной), при этом на трубке образуются равномерные складки (рис. 1, *а*);
- асимметричную (в англоязычной литературе также называется diamond — деформация в форме алмаза) (рис. 1, *б*);
- изгиба, в этом случае трубка прогибается и быстро деформируется (рис. 2).



*а*



*б*

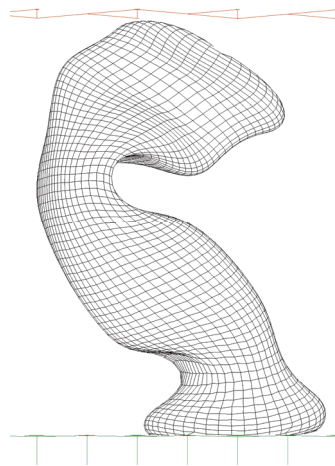
**Рис. 1. Осесимметричная (*а*) и асимметричная (*б*) формы деформации трубки**

В некоторых случаях деформация начинается как осесимметричная, но затем продолжается как асимметричная. Такой тип деформации называется смешанным.

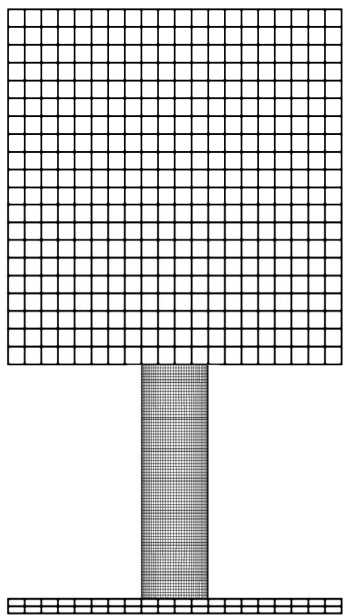
Согласно имеющимся данным [4], осесимметричная деформация обеспечивает лучшее поглощение энергии, чем асимметричная или изгиб трубки. Форма деформации зависит от материала, от соотношения диаметра трубки, толщины ее стенки и длины. Для эффективной работы трубчатых энергопоглощающих элементов необходимо определять наиболее оптимальные значения этих параметров. Прогнозирование на стадии проектирования энергопоглощающих свойств трубчатых элементов является достаточно трудоемкой задачей, требующей проведения большого количества сложных и дорогостоящих натуральных экспериментов. Существует и другое направление — имитационное математическое моделирование быстропротекающих динамических процессов упругопластического деформирования трубки с использованием метода конечных элементов. Благодаря относительно невысокой трудоемкости численного моделирования можно проверить большое количество конфигураций энергопоглощающих элементов, а реальные испытания провести только для трубок, выбранных в результате расчета.

Математическое моделирование методом конечных элементов ударного или ударно-волнового процесса упругопластического деформирования тонкостенной трубки является достаточно сложной высоконелинейной задачей. Для решения уравнений динамики, описывающих быстропротекающий процесс упругопластического деформирования трубки, был выбран метод явного интегрирования, а среди существующих программ конечно-элементного анализа, реализующих явное интегрирование, — программный комплекс LS-DYNA, разработанный компанией LSTC (США).

В качестве объекта исследования рассматривали алюминиевую трубку круглого сечения с наружным диаметром  $D = 50$  мм, толщиной стенки  $h = 2$  мм и длиной  $L = 160$  мм. Для создания конечно-элементных моделей трубок с различными характеристиками была разработана многопараметрическая программа на языке APDL, позволяющая в автоматизированном режиме генерировать и изменять конечно-элементную сетку для тонко- и толстостенных деформируемых трубок. Конечно-элементная модель состояла из объемных восьмиузловых конечных элементов со сторонами, равными половине толщины стенки. Трубка опиралась на стальную поверхность, удар производили стальным грузом массой 118,3 кг (рис. 3). Опорную поверхность и груз при моделировании считали абсолютно жесткими. Скорость движения груза в момент удара составила 5,47 м/с, что соответствовало скорости, при-



**Рис. 2. Изгиб трубки**



**Рис. 3. Расчетная модель**

Plastic kinematic. Диаграмма деформирования аппроксимируется двумя прямыми. Зависимость между напряжениями и деформацией выражается уравнением

$$\sigma = \sigma_T + E_T(e - e_T),$$

где  $\sigma_T$ ,  $e_T$  — напряжение и деформация в начале текучести соответственно;  $E_T$  — модуль упрочнения в упругопластической области ( $0 < E_T < E$ ).

Если воспользоваться относительными напряжениями и деформациями:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_T}; \quad \bar{e} = \frac{e}{e_T},$$

то уравнение можно записать в виде

$$\bar{\sigma} = 1 + \bar{E}_T(\bar{e} - 1),$$

где  $\bar{E}_T$  — относительный модуль упрочнения,  $\bar{E}_T = E_T / E$ .

Напряжение  $\bar{\sigma}'_T$  в точке пересечения прямой упругого и линейного деформирования принято за предел текучести. Наклон

обрутаемой при свободном падении с высоты 1 525 мм. Моделирование проводили в поле сил тяжести. Опорная пластина полностью закреплена в пространстве, перемещение трубки ограничено только контактом с пластиной и грузом. Контактное взаимодействие задано с помощью встроенного алгоритма \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SINGLE\_SURFACE [1] на основе модели трения Кулона. Коэффициенты трения покоя и трения скольжения принимали равными 0,2 и 0,16 соответственно.

Для воспроизведения пластических свойств алюминия была принята модель материала с линейной аппроксимацией диаграммы деформирования (рис. 4). Данная модель является частным случаем полигональной аппроксимации и описана в литературе [2, 3]. В LS-DYNA эта модель реализована в материале

диаграммы деформирования характеризуется относительным модулем  $\bar{E}_T$ .

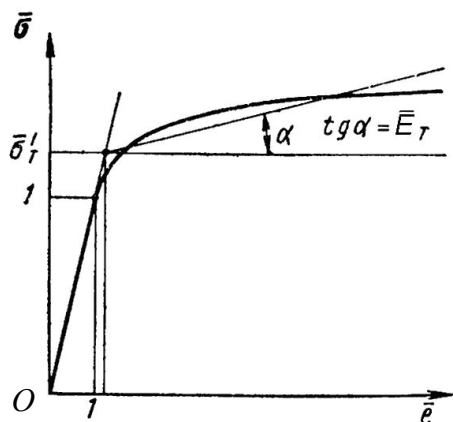


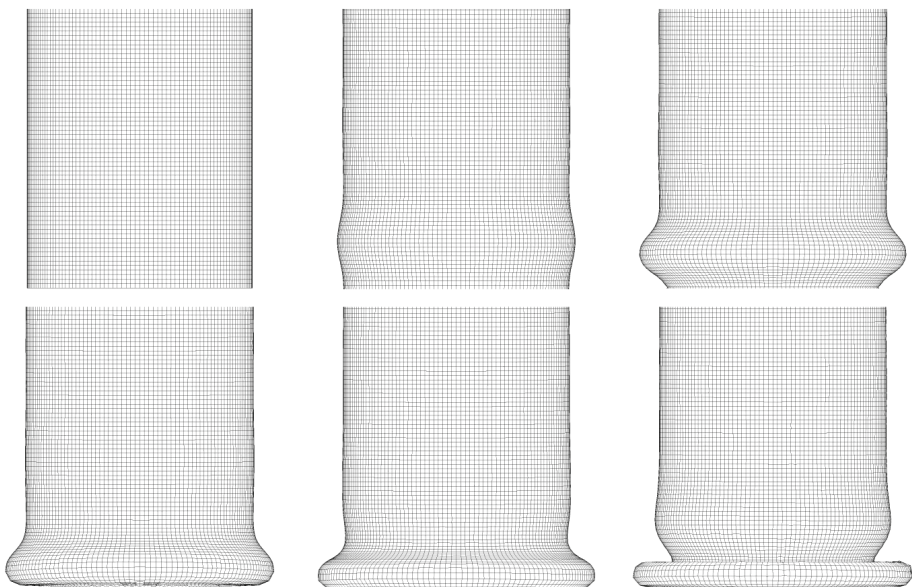
Рис. 4. Линейная аппроксимация кривой деформирования

На основании справочных данных для материала трубки были выбраны следующие значения: плотность  $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$ ; модуль упругости  $E = 70 \text{ ГПа}$ ; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,33$ ; модуль упрочнения в упругоупругой области  $E_T = 1,36 \text{ ГПа}$ ; относительный модуль упрочнения  $\bar{E}_T = 0,0194$  и условный предел текучести  $\sigma'_T = 360 \text{ МПа}$ .

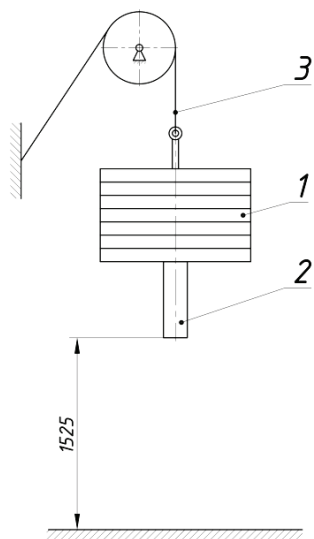
В результате серии численных экспериментов было установлено, что после удара трубка частично деформируется по концентричной форме, причем сторона, с которой начинается деформация, зависит от граничных условий, и может измениться даже при минимальном варьировании параметров расчетной модели или граничных условий (рис. 5). После удара трубка имела длину 137 мм, т. е. деформация составила 23 мм.

Для подтверждения адекватности расчета была проведена серия экспериментов. Параметры схемы эксперимента соответствовали параметрам расчетной модели. Удар осуществляли грузом 1, состоящим из закрепленных на тросе 3 металлических дисков (рис. 6). Испытываемую трубку 2 закрепляли на грузе в центре дисков. Таким образом, груз и трубка были соосны, что обеспечивало симметричную нагрузку в момент удара. Масса алюминиевой трубки 130 г, что составляет 0,11 % от массы груза и позволяет пренебречь массой трубки по сравнению с массой груза.

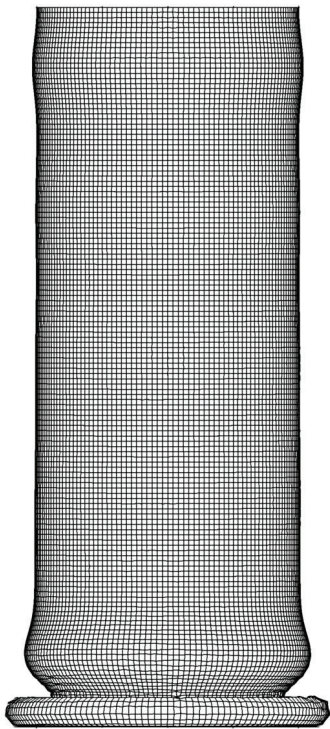
Форма деформации трубки, полученная в ходе эксперимента, достаточно точно совпала с результатами численного моделирования (рис. 7). Средняя деформация трубки составила 21 мм, т. е. относительная погрешность математического моделирования — не более 9,5 %.



**Рис. 5. Этапы деформации трубки**



**Рис. 6. Схема эксперимента**



*a*



*б*

**Рис. 7. Формы деформации трубки, полученные в результате численного моделирования (а) и эксперимента (б)**

Таким образом, адекватность результатов моделирования процесса деформирования алюминиевой трубки подтверждена экспериментально. Установлено, что с помощью математического моделирования ударного процесса упругопластического деформирования алюминиевой трубки в LS-DYNA можно определить форму и размер деформации трубчатого энергопоглощающего элемента. Предлагаемый метод пригоден как для оценки свойств уже существующих трубчатых элементов, так и для оптимизации параметров энергопоглощающих элементов при их проектировании.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gladman B. LS-DYNA User's Manual. Version 971. — Livermore (California): LSTC, 2007. 2206 p.
2. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.
3. Шнейдерович Р.М. Прочность при статическом и повторно-статическом нагружениях. — М.: Машиностроение, 1968. — 343 с.

4. Tabiei A., Nilakantan G. Axial crushing of tubes as an energy dissipating mechanism for the reduction of acceleration induced injuries from mine blasts underneath infantry vehicles // International journal of impact Engineering. — 2009. — V. 36. — P. 729—736.
5. Florent P., Wenyi Y., Cui W. Crushing Modes of Aluminium Tubes under Axial Compression. // 5th Australasian Congress on Applied Mechanics. Brisbane (Australia). — 2007. — P. 178—183.

Статья поступила в редакцию 09.10.2012