

## Моделирование поведения тонкостенных труб с разными наполнителями при предельном нагружении применительно к решению проблем пассивной безопасности автомобилей

© Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов, Д.Н. Чайко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Рассмотрены вопросы, связанные с выбором эффективного конечно-элементного моделирования тонкостенных труб с разными типами наполнителей (имитирующими каркасные элементы кабин и кузовов автомобилей) при квазистатическом поперечном нагружении, вызывающем смятие трубы и наполнителя. Объектами исследований являются тонкостенные трубы из алюминиевого сплава АМгб с наполнителями из пеноалюминия, эпоксидной смолы и композиционного материала (состоящего из шариков Rogaver и эпоксидной смолы). Исследовано влияние наполнителя на механические свойства трубы, а также эффекты стесненного поведения материала наполнителя при предельном изгибном нагружении трубы. Для верификации теоретических положений проведены испытания на универсальной испытательной машине Zwick Z100 (для полый тонкостенной трубы из алюминиевого сплава и таких же труб с наполнителями). Представлены результаты расчетов прочности и жесткости трубы с различными наполнителями, выполненных численными методами, и результаты эксперимента (погрешность расчетов не превышает 8 %). Показано, что наиболее рациональным материалом с точки зрения соотношения энергоемкость — масса является пеноалюминий.*

**Ключевые слова:** наполнители, пеноалюминий, эпоксидная смола, МКЭ, конечно-элементная модель, LS-DYNA

**Введение.** Обеспечение как активной, так и пассивной безопасности людей в автомобиле является важнейшим требованием. Конструкции автомобиля, воспринимающие при аварии внешнее воздействие, в том числе ударное, должны быть легкими и прочными. Кроме того, они должны поглощать энергию таким образом, чтобы вокруг людей сохранялось жизненное пространство. При столкновении каркасные элементы кабин и кузовов автомобилей, изготавливаемые преимущественно сваркой тонкостенных профилей в замкнутый контур, теряют несущую способность под воздействием изгибных нагрузок [1–3]. Сходный характер деформирования получается при трехточечном изгибе тонкостенной трубы, поэтому в данной работе рассматривается моделирование поведения труб при предельном поперечном квазистатическом нагружении (вызывающем смятие трубы и наполнителя). В дальнейшем полученные результаты можно использовать применительно к проблемам пассивной безопасности для более сложных моделей кабин и кузовов.

Тонкостенные трубы в процессе трехточечного изгиба обычно очень сильно деформируются в месте контакта — вплоть до образования пластического шарнира. Для достижения оптимальных соотношений механических свойств при изгибе и массы конструкции целесообразно использовать в качестве наполнителя пенистый материал, например пеноалюминий. Авторами работы [4] проведена оптимизация конструкции, заполненной пористым материалом, для минимизации ее массы. Установлено, что пеноалюминий является хорошим энергопоглощающим материалом. Автором работы [5] исследовано поведение пенонаполненных профилей при изгибе и доказано, что применение пеноалюминия улучшает энергопоглощающие свойства конструкции. Авторами работы [6] экспериментально исследовано поведение вспененных профилей при изгибе и установлено, что пенный наполнитель значительно изменяет локальную картину деформации балок. В работах [7, 8] рассмотрены вопросы, связанные с применением и оптимизацией свойств пеноалюминия для доработки элементов кабин и кузовов автомобилей в целях удовлетворения требованиям пассивной безопасности. Показано, что использование наполнителя позволяет достичь заданных требований при минимальном увеличении массы.

Основная проблема, ограничивающая массовое применение пеноалюминия в конструкциях кабин и кузовов, связана с его производством. Современные технологии изготовления и обработки пеноалюминия сложны и дороги, что ведет к увеличению стоимости продукции, поэтому рассматривается возможность использования и других наполнителей. Одним из вариантов является применение эпоксидной смолы — дешевого и доступного материала. Благодаря отличным инфузионным свойствам ее можно закачивать под давлением в каркасные элементы кабин, что значительно упрощает и удешевляет технологию производства и сборки.

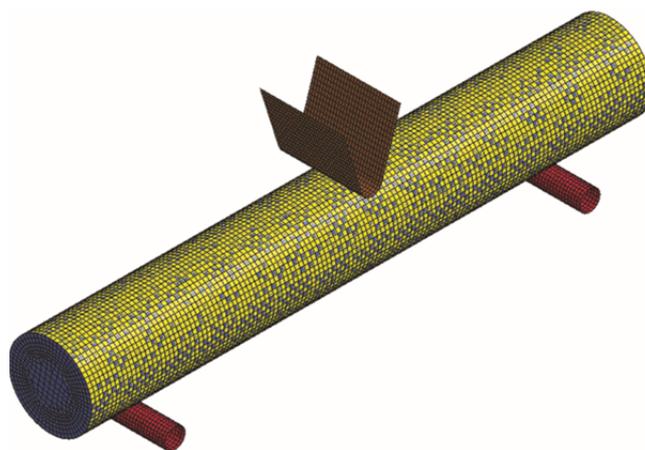
Особое внимание уделяется численному моделированию механических свойств наполнителей с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и программы LS-DYNA, включая разработку рациональных конечно-элементных моделей (КЭМ) и моделированию материалов. Проведено сравнение двух типов материалов — ячеистого упругопластического (пеноалюминий), допускающего большие деформации до разрушения, и хрупкого (эпоксидная смола), обладающего высокой прочностью в ограниченном диапазоне деформаций.

Для оценки погрешностей решений, полученных с помощью МКЭ, проведены соответствующие стендовые эксперименты.

Сравнение разных по механическим свойствам материалов необходимо для определения границ их применимости в области пассивной безопасности автомобилей и для прогнозирования требуемых свойств перспективных наполнителей.

Цель работы заключается в выборе эффективных способов конечно-элементного моделирования поведения тонкостенных труб (типа каркасных элементов автомобилей) и наполнителей (из упругопластических и хрупких материалов) при квазистатическом поперечном нагружении, вызывающем смятие трубы и наполнителя, а также в экспериментальной верификации предлагаемых подходов и анализе применимости этих материалов для улучшения параметров пассивной безопасности автомобилей.

**Моделирование наполненных труб из алюминиевого сплава с помощью МКЭ в программе LS-DYNA.** Для исследования и сравнения механических свойств ячеистых упругопластических и хрупких материалов была поставлена задача о квазистатическом нагружении трубы из алюминиевого сплава с наполнителем. Задача решалась в явной постановке с использованием МКЭ в программе LS-DYNA. Конечно-элементная модель трубы с наполнителем представлена на рис. 1. Предлагаемый тип элемента — восьмиузловой constant stress solid, базовый размер конечного элемента 2 мм, что характерно для высокоточных моделей [9]. Такой тип и размер элемента наилучшим образом подходят для решения задач трехточечного изгиба труб с наполнителем [10], в том числе многовариантных и оптимизационных [11]. Материал трубы (алюминиевый сплав АМг6) моделировался «картой» MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC с изотропным упрочнением (параметры материала приведены в табл. 1). Диаметр трубы 40 мм, толщина стенки 3 мм, длина 270 мм, расстояние между опорами для трехточечного изгиба 200 мм.



**Рис. 1.** Конечно-элементная модель трубы с наполнителем и нагружающим устройством

Решение задачи в программе LS-DYNA проводилось для следующих типов труб:

- полая;
- заполненная эпоксидной смолой;
- заполненная пеноалюминием.

Пеноалюминий в программе LS-DYNA описывается моделью DESHPANDE\_FLECK\_FOAM, предложенной В. Дешпендом и Н. Флеком [12]. Данная модель позволяет смоделировать механические свойства пенистого материала без моделирования пор, что существенно сокращает время, затрачиваемое на подготовку расчета, и машинное время счета.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ трех вариантов пеноалюминия с плотностью 50, 430 и 800 кг/м<sup>3</sup> [13, 14]. Механические свойства эпоксидной смолы задавались согласно данным, приведенным в табл. 1, и на основании исследования, описанного в работе [15]. Использовалась модель материала PLASTICITY\_POLYMER с условием разрушения при деформации 8 %.

Таблица 1

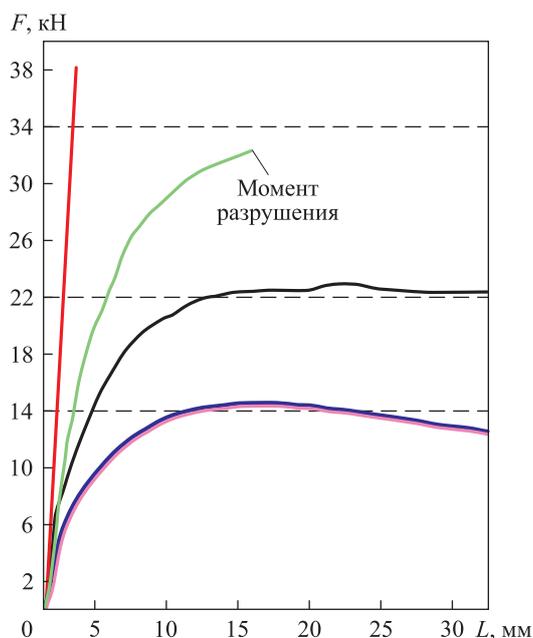
Механические свойства материалов

Параметр	Алюминиевый сплав АМг6	Эпоксидная смола EL с отвердителем EL 152 MLR	Poraver
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	2460	1100	390
Модуль упругости $E$ , ГПа	71	3,2	–
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ при растяжении, МПа	250	–	–
Предел прочности $\sigma_b$ , МПа:			
при растяжении	385	74	–
при изгибе	–	110	–
при сжатии	–	100	–
Удлинение при разрыве $\delta$ , %	11	8	–

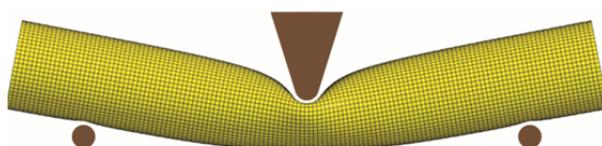
В данной работе моделировались несколько типов материалов: у одних ярко выражены упругопластические свойства, у других — хрупкие свойства. В качестве наполнителя каркасных элементов кабин и кузовов автомобилей могут выступать и другие типы материалов (в том числе композиционные) со свойствами, незначительно отличающимися от рассмотренных. Для адекватного моделирования таких материалов необходимо знать зависимость напряжений от деформаций для конкретного нагрузочного режима (растяжение, сжатие, изгиб). Такого рода зависимости лучше всего получать экспериментальным методом [16].

В программе LS-DYNA время расчета ограничивалось 0,1 с при скорости нагружения 0,5 м/с. Зависимость механических свойств материала от скорости нагружения не учитывалась.

Полученные в результате расчета кривые нагружения  $F(L)$  (где  $F$  — нагрузка;  $L$  — перемещение нагружающего элемента) приведены на рис. 2. Деформированное состояние трубы представлено на рис. 3. Результаты расчета приведены в табл. 2.



**Рис. 2.** Кривые нагружения для трубы с наполнителями из пеноалюминия плотностью 800 (—), 430 (—), 50 кг/м<sup>3</sup> (—), из эпоксидной смолы (—) и для полой трубы (—)



**Рис. 3.** Картина деформирования трубы

Таблица 2

Результаты расчета МКЭ

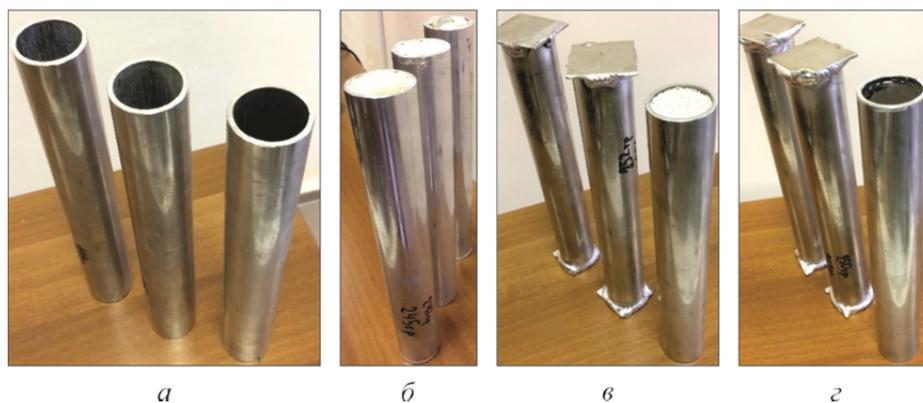
Труба	Масса, г	Максимальное воспринимаемое усилие, кН
Полая	250	14,1
Заполненная эпоксидной смолой	520	32,3
Заполненная пеноалюминием плотностью, кг/м <sup>3</sup> :		
50	267	14,2
430	396	22,5
800	521	5140,0

Анализ результатов (см. рис. 2 и табл. 2) показал, что хрупкие материалы (эпоксидная смола) обладают относительно высокой прочностью в малом диапазоне деформаций в отличие от ячеистых упругопластических материалов (пеноалюминий), которые сохраняют работоспособность при значительных прогибах и, как следствие, поглощают больше энергии в процессе деформирования, что является важным свойством для решения задач пассивной безопасности автомобилей.

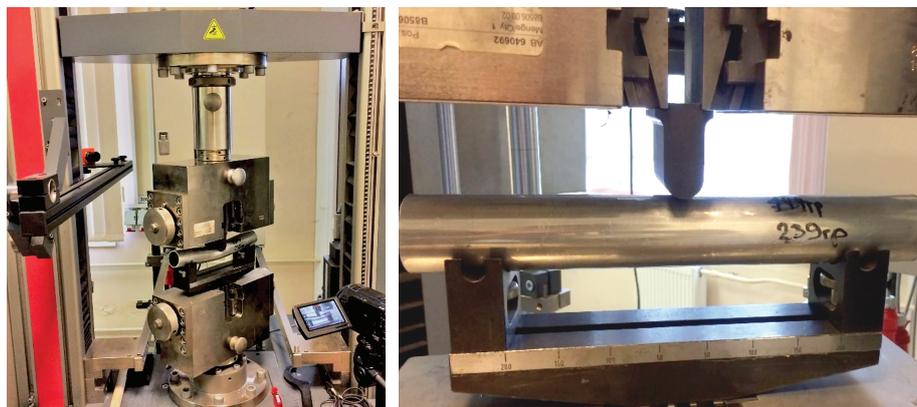
Применение пеноалюминия с минимальной плотностью ( $50 \text{ кг/м}^3$ ) не приводит к существенному повышению изгибной жесткости конструкции. При увеличении плотности наполнителя до  $800 \text{ кг/м}^3$  максимальное воспринимаемое усилие увеличивается в десятки раз, а масса в 2,1 раза.

**Верификации теоретических положений.** В целях верификации были проведены натурные эксперименты с различными образцами труб (рис. 4). Исследовались механические свойства полых трубы из алюминиевого сплава, трубы, заполненной эпоксидной смолой, и дополнительно свойства труб, заполненных монтажной пеной или композиционным материалом, который состоит из наполнителя (шариков Poraver) и связующего (эпоксидной смолы EL с отвердителем EL 152 MLR).

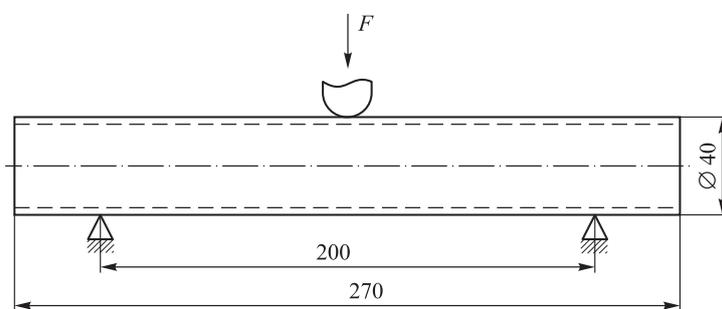
Помимо влияния наполнителя на механические свойства труб изучались эффекты при стесненном поведении материалов в случае трехточечного изгиба. Для этого у образцов труб с композиционным материалом и труб с эпоксидной смолой торцы были заварены прямоугольными пластинами из алюминиевого сплава (рис. 4, в и г).



**Рис. 4.** Образцы труб для испытаний:  
а — полых; б — с монтажной пеной; в — с композитной конструкцией;  
г — с эпоксидной смолой



а



б

Рис. 5. Испытательная машина Zwick Z100 (а) и схема испытаний (б)

Испытания на трехточечный изгиб проводились на универсальной испытательной машине Zwick Z100 (рис. 5).

Эксперимент проводился следующим образом:

1) к образцу прикладывалась постепенно возрастающая квазистатическая нагрузка с помощью индентора со скругленным торцом (скорость приложения нагрузки 20 мм/мин);

2) прикладываемое усилие измерялось в зависимости от перемещения траверсы с использованием специальных датчиков и программного обеспечения.

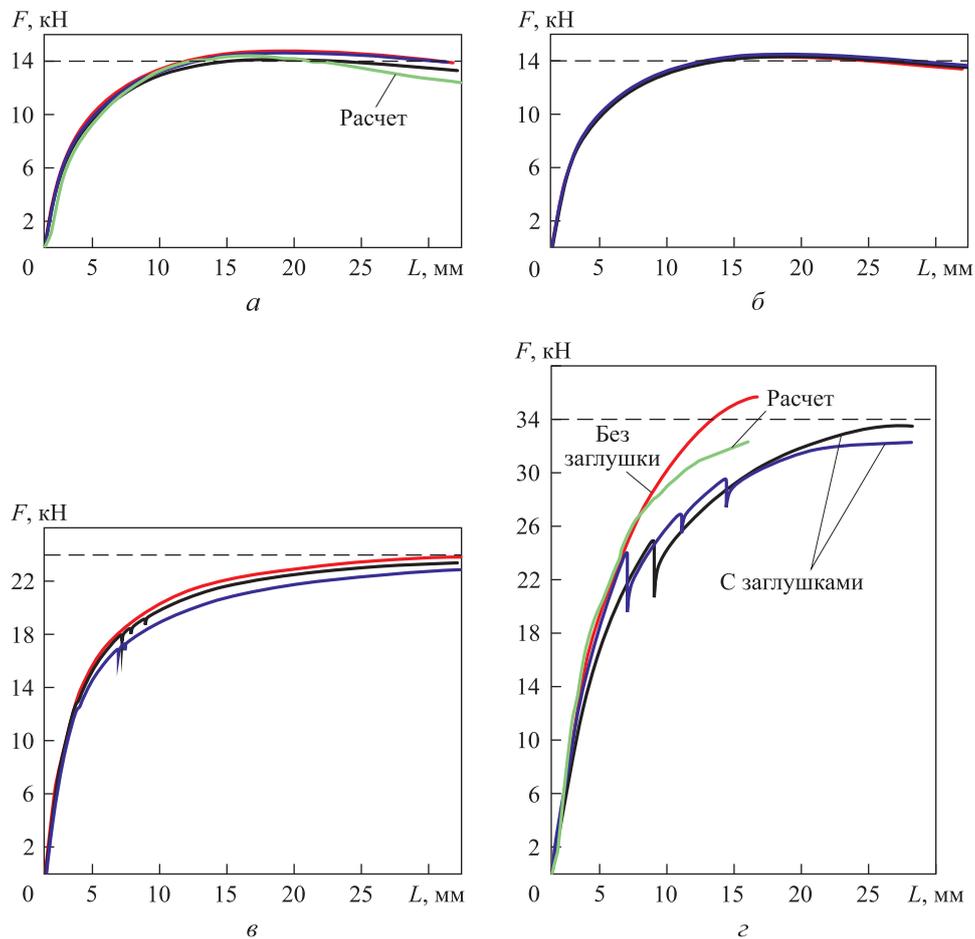
Результаты эксперимента приведены в табл. 3 и на рис. 6, картина деформированного состояния труб представлена на рис. 7.

Таблица 3

Результаты эксперимента с образцами труб

Труба	Номер образца	Масса, г	Максимальное воспринимаемое усилие, кН
Полая	1	239	14,73
	2	238	14,10
	3	239	14,58

Труба	Номер образца	Масса, г	Максимальное воспринимаемое усилие, кН
Заполненная монтажной пеной	1	241	14,27
	2	240	14,28
	3	238	14,48
Заполненная композиционным материалом	1	413	23,79
	2 (с заваренными торцами)	451	23,18
	3 (с заваренными торцами)	457	22,44
Заполненная эпоксидной смолой	1	514	35,35
	2 (с заваренными торцами)	543	33,21
	3 (с заваренными торцами)	545	31,42



**Рис. 6.** Диаграммы нагружения образцов 1 (—), 2 (—), 3 (—) труб (см. табл. 3):  
 а — полых; б — с монтажной пеной; в — с композиционным материалом;  
 г — с эпоксидной смолой



Рис. 7. Трубы после натурального эксперимента

Из анализа результатов эксперимента следует, что использование предлагаемых КЭМ позволяет достичь приемлемой точности моделирования. Погрешность значений максимального воспринимаемого усилия не превышает 8 %.

В случае полых труб экспериментально полученные кривые нагружения для трех образцов и расчетная кривая нагружения практически совпадают (см. рис. 6, а). Следует отметить, что наполнитель в виде монтажной пены не увеличивает жесткости трубы, в данном случае кривые нагружения (см. рис. 6, б) сопоставимы с кривыми нагружения для полых труб.

Как следует из графиков, приведенных на рис. 6, а и б, при перемещении более чем на 20 мм воспринимаемая нагрузка, действующая на образцы, уменьшается, т. е. в обоих случаях конструкция теряет несущую способность.

Применение наполнителя в виде композиционного материала позволяет увеличить жесткость трубы в 1,6 раза. Использование заглушек по торцам трубы существенных изменений в механические свойства конструкции не вносит. Масса композиционного наполнителя 200 г. Появление «зубчиков» на графике (см. рис. 6, в) связано предположительно с разрушением шариков Porever и кратковременным уменьшением жесткости всей модели до тех пор, пока во взаимодействие не вступят соседние шарики и конструкция не начнет вновь работать как единое целое. Доработка каркасных элементов кабин с помощью такого рода наполнителей технологична, но эффект от заполнения не столь значителен, как в случае применения пеноалюминия.

Использование наполнителя из эпоксидной смолы дает более существенное увеличение жесткости — в 2,23 раза. В процессе деформирования хрупкая смола разрушается, о чем свидетельствуют характерные скачки значений силы (см. рис. 6, з). Образец 1 (без заглушек) разрушился при большем усилии, но при меньших деформациях, чем образцы 2 и 3 (с заглушками). Это связано с тем, что в эпоксидной смоле возникли трещины, она потеряла несущую способность и, как следствие, начала выдавливаться через свободные концы трубы. Все три образца труб с наполнителем из эпоксидной смолы разрушились при меньших деформациях (рис. 8), чем в случае применения пеноматериала. Следовательно, несмотря на большую прочность хрупкого материала, его энергоемкость меньше из-за меньших деформаций. В связи с этим применение хрупких материалов для обеспечения пассивной безопасности автомобилей нецелесообразно (к тому же масса эпоксидной смолы относительно большая — 275 г).



Рис. 8. Внешний вид разрушенного образца

**Заключение.** На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Разработанные КЭМ позволяют эффективно прогнозировать упругопластическое поведение тонкостенной трубы (из алюминиевого сплава АМг6) с наполнителем (в виде пеноалюминия, эпоксидной смолы EL с отвердителем EL 152 MLR, композиционного материала) при предельном трехточечном изгибе (погрешность моделирования не превышает 8 % по сравнению с экспериментом).

2. Применение пеноалюминия дает наилучшее соотношение энергоемкость — масса. В этом случае максимальное воспринимаемое усилие при изгибе в десятки раз больше, чем при использовании других типов наполнителей.

3. Применение эпоксидной смолы увеличивает изгибную жесткость конструкции в 2,23 раза по сравнению с жесткостью полый трубы, при этом масса конструкции возрастает в 2,1 раза.

4. Использование композиционного материала, состоящего из шариков Poraver и связующего в виде эпоксидной смолы, позволяет увеличить изгибную жесткость конструкции в 1,6 раза, при этом ее масса возрастает в 1,8 раза.

5. Применение хрупких материалов не дает значительного эффекта с точки зрения энергопоглощения, поэтому их не рекомендуется использовать для обеспечения пассивной безопасности автомобилей. В отличие от хрупких материалов, упругопластические пеноматериалы теряют несущую способность при значительно больших деформациях.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шабан Б.А., Зузов В.Н. Анализ влияния конструктивных факторов на пассивную безопасность кабины грузового автомобиля при фронтальном ударе. *Наука и образование. Электрон. журн.*, 2013, № 8, с. 91–108. DOI: 10.7463/0813.0580257
- [2] Шабан Б.А., Зузов В.Н. Анализ влияния конструктивных факторов кабины на пассивную безопасность грузовых автомобилей при ударе по передним стойкам. *Наука и образование. Электрон. журн.*, 2013, № 11, с. 95–106. DOI: 10.7463/1113.0636798
- [3] Шабан Б.А., Зузов В.Н. Особенности моделирования каркасных элементов кузовов и кабин автомобилей при исследовании пассивной безопасности. *Наука и образование. Электрон. журн.*, 2012, № 11, с. 81–104. DOI: 10.7463/1112.0486675
- [4] Chen W., Wierzbicki T., Santosa S. Bending collapse of thin-walled beams with ultralight filler: numerical simulation and weight optimization. *Acta Mechanica*, 2002, vol. 153 (3), pp. 183–206. DOI: 10.1007/BF01177451
- [5] Chen W. Experimental and numerical study on bending collapse of aluminum foam-filled hat profiles. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, vol. 38 (44), pp. 7919–7944. DOI: 10.1016/S0020-7683(01)00094-4
- [6] Hanssen A.G., Hopperstad O.S., Langseth M. Bending of square aluminum extrusions with aluminum foam filler. *Acta Mechanica*, 2000, vol. 142 (1), pp. 13–31. DOI: 10.1007/BF01190010
- [7] Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Проблемы поиска оптимальных конструктивных параметров бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности. *Тр. НГТУ им. П.Е. Алексеева*, 2018, № 3 (122), с. 130–136.
- [8] Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Проблемы поиска оптимальных решений для обеспечения пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей при минимальной массе. *Изв. Моск. гос. техн. ун-та МАМИ*, 2018, № 4 (38), с. 92–102.
- [9] Шабан Б.А., Зузов В.Н. Особенности построения конечно-элементных моделей кабин для исследования пассивной безопасности при ударе в соответствии с правилами ЕЭК ООН № 29. *Наука и образование. Электрон. журн.*, 2013, № 3, с. 129–156. DOI: 10.7463/0313.0542301
- [10] Guo L., Yu J. Dynamic bending response of double cylindrical tubes filled with aluminum foam. *Int. J. of Impact Engineering*, 2011, no. 38, pp. 85–94.

- [11] Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Топологическая оптимизация конструкции бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности. *Изв. Моск. гос. техн. ун-та МАМИ*, 2018, № 2 (36), с. 2–9.
- [12] Deshpande V.S., Fleck N.A. Isotropic constitutive models for metallic foams. *J. Mech. Phys. Solids*, 2000, vol. 48, pp. 1253–1283.
- [13] Xiao Zh., Fang J., Sun G., Li Q. Crashworthiness design for functionally graded foam-filled bumper beam. *Int. J. Advances in Engineering Software*, 2015, vol. 85, no. C, pp. 81–95.
- [14] Li Zh., Yu Q., Zhao X., Yu M., Shi P., Yan C. Crashworthiness and lightweight optimization to applied multiple materials and foam-filled front end structure of auto-body. *Adv. in Mech. Eng.*, 2017, vol. 9 (8), pp. 1–21.  
DOI: 10.1177/1687814017702806
- [15] Шебанов С.М., Гаевой Н.В. Деформативность нанокompозита эпоксидная смола — многослойные углеродные нанотрубки при многократном сжатии. *Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России*, 2010, № 3, с. 104–110.
- [16] Арутюнян Г.А., Карташов А.Б. Разработка математической модели разрушения углепластиковых энергопоглощающих элементов несущей системы автомобиля. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 1 (694), с. 45–54. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-1-45-54

Статья поступила в редакцию 27.02.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Гончаров Р.Б., Зузов В.Н., Чайко Д.Н. Моделирование поведения тонкостенных труб с разными наполнителями при предельном нагружении применительно к решению проблем пассивной безопасности автомобилей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 3.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-3-1856>

**Гончаров Роман Борисович** — аспирант кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [goncharov.roman@bmstu.ru](mailto:goncharov.roman@bmstu.ru)

**Зузов Валерий Николаевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 работ в области машиностроения. e-mail: [zuzvalery@rambler.ru](mailto:zuzvalery@rambler.ru)

**Чайко Дмитрий Николаевич** — инженер кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [dimos-trust.89@mail.ru](mailto:dimos-trust.89@mail.ru)

## **Modeling the behavior of thin-walled tubes with different fillers at the maximum load in solving the problems of crashworthiness**

© R.B. Goncharov, V.N. Zuzov, D.N. Chaiko

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article considers issues related to the choice of effective finite-element modeling thin-walled tubes with different types of fillers (imitating elements of car bodies and cabs of frame-type cars) with quasi-static bending load, causing the tube and filler to collapse, in the context of optimal design. Thin-walled pipes made of aluminum alloy AMg6 with aluminum foam fillers; epoxy resin and composite (consisting of Poraver balls and epoxy resin) were the subject of the study. Aluminum foam is an elastoplastic material; it is one of the best fillers for solving the problems of crashworthiness, although it requires expensive technological equipment for filling. Epoxy resin is a fragile material, but inexpensive, affordable and technologically "convenient". In addition to the influence of the filler on the tube mechanical properties the effects of the constrained behavior of the filler material under the ultimate bending loading of the tube are investigated. To verify the theoretical assumptions, tests were performed on the Zwick Z100 universal testing machine (for a hollow thin-walled tube made of aluminum alloy and similar tubes with fillers). Here there are the results of numerical computations and the results of the experiment (the error of calculations does not exceed 8 %). The most rational material in terms of energy-mass ratio is aluminum foam (with an increase in sample mass of 2.1 times the mechanical properties increased tenfold). Other fillers give much worse results for the same parameters. Using the proposed finite element models (FEM), allows assessment of the effectiveness of existing and being created filler materials for refining the car bodies and cabs according to the requirements of crashworthiness.*

**Keywords:** fillers, aluminum foam, epoxy resin, finite-element analysis, finite element model, LS-DYNA

### REFERENCES

- [1] Shaban B.A., Zuzov V.N. *Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchno-tekhnicheskij zhurnal — Science and Education: Electronic Scientific and Technical Journal*, 2103, no. 8, pp. 91–108. DOI: 10.7463/0813.0580257
- [2] Shaban B.A., Zuzov V.N. *Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchno-tekhnicheskij zhurnal — Science and Education: Electronic Scientific and technical Journal*, 2013, no. 11, pp. 95–106. DOI: 10.7463/1113.0636798
- [3] Shaban B.A., Zuzov V.N. *Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchno-tekhnicheskij zhurnal — Science and Education: Electronic Scientific and Technical Journal*, 2012, no. 11, pp. 81–104. DOI: 10.7463/1112.0486675
- [4] Chen W., Wierzbicki T., Santosa S. *Acta Mechanica*, 2002, vol. 153, no. 3, pp. 183–206. DOI: 10.1007/BF01177451
- [5] Chen W. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, vol. 38, no. 44, pp. 7919–7944. DOI: 10.1016/S0020-7683(01)00094-4
- [6] Hanssen A.G., Hopperstad O.S., Langseth M. *Acta Mechanica*, 2000, vol. 142, no. 1, pp. 13–31. DOI: 10.1007/BF01190010

- [7] Goncharov R.B., Zuzov V.N. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva — Proceedings of the R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University*, 2018, no. 3 (122), pp. 130–136.
- [8] Goncharov R.B., Zuzov V.N. *Izvestiya Moskovskogo gosudaestvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI — Izvestiya MGTU MAMI*, 2018, no. 4 (38), pp. 92–102.
- [9] Shaban B.A., Zuzov V.N. *Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchno-tekhnicheskyy zhurnal — Science and Education: Electronic Scientific and technical Journal*, 2013, no. 3, pp. 129–156. DOI: 10.7463/0313.0542301
- [10] Guo L., Yu J. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, no. 38, pp. 85–94.
- [11] Goncharov R.B., Zuzov V.N. *Izvestiya Moskovskogo gosudaestvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI — Izvestiya MGTU MAMI*, 2018, no. 2 (36), pp. 2–9.
- [12] Deshpande V.S., Fleck N.A. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2000, vol. 48, pp. 1253–1283.
- [13] Xiao Z., Fang J., Sun G., Li Q. *Advances in engineering software*, 2015, vol. 85, no. C, pp. 81–95.
- [14] Li Z., Yu Q., Zhao X., Yu M., Shi P., Yan C. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 9, no. 8, pp. 1–21. DOI: 10.1177/1687814017702806
- [15] Shebanov S.M., Gayevoy N.B. *Oboronnyy kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii — Defense Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress*, 2010, no. 3, pp. 104–110.
- [16] Arutyunyan G.A., Kartashov A.B. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 1 (694), pp. 45–54. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-1-45-54

**Goncharov R.B.**, Postgraduate student, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: goncharov.roman@bmstu.ru

**Zuzov V.N.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 50 research publications in the field of mechanical engineering. e-mail: zuzvalery@rambler.ru

**Chaiko D.N.**, Engineer, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: dimos-trust.89@mail.ru