

УДК 629.3.015.4

DOI 10.18698/0536-1044-2018-1-45-54

# Разработка математической модели разрушения углепластиковых энергопоглощающих элементов несущей системы автомобиля

Г.А. Арутюнян, А.Б. Карташов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

## Development of a Mathematical Fracture Model of Carbon Fiber Energy-Absorbing Elements of a Vehicle Undercarriage

G.A. Arutyunyan, A.B. Kartashov

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: georgy.arut@bmstu.ru, kartashov@bmstu.ru

**i** Применение композиционных материалов является перспективным способом снижения массы несущей системы и автомобиля в целом, поэтому обеспечение пассивной безопасности конструкций, выполненных из таких материалов, становится актуальной задачей. Для проектирования и расчета частей несущей системы, отвечающих за пассивную безопасность, особенно энергопоглощающих зон, необходимо разработать математическую модель, учитывающую особенности разрушения изделий из композиционных материалов. В работе предложена расчетно-экспериментальная методика проектирования композитных конструкций, обеспечивающих пассивную безопасность и энергопоглощение. Выполнен обзор существующих подходов и обоснован выбор конструкции образца и способа проведения эксперимента. Разработанная математическая модель, реализованная в программном комплексе конечно-элементного анализа, верифицирована по результатам динамических испытаний трубчатых образцов. Выполнено сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей ускорения от времени. Подтверждены адекватность полученных результатов и возможность применения методики для проектирования несущих систем автомобилей.

**Ключевые слова:** пассивная безопасность, энергопоглощение, композитные энергопоглощающие элементы, разрушение углепластика, деформируемая зона

**i** The use of composite materials is a promising way to reduce the weight of the undercarriage and of the entire vehicle, therefore the task of ensuring the passive safety of composite structures becomes important. To design and model the parts of the undercarriage responsible for passive safety, in particular the energy-absorbing zones, it is necessary to develop a mathematical model that takes into account specific characteristics of the destruction of the parts made of composite materials. In this paper, a computational and experimental method of designing composite structures providing passive safety and energy absorption is proposed. The existing approaches are reviewed and the choice of the design of the experimental specimen and the method of carrying out the experiment is justified. The developed mathematical model realized through the finite element analysis is verified by the results of dynamic tests of tubular specimens. The dependences of accelerations on time, obtained experimentally and by calculation, are compared. The adequacy of the results

obtained and the feasibility of applying the proposed method for designing vehicle undercarriages are confirmed.

**Keywords:** passive safety, energy absorption, composite energy-absorbing elements, carbon fiber fracture, crumple zone

Пассивной безопасностью (ПБ) называется совокупность свойств автомобиля, предотвращающих или снижающих степень травмирования участников движения при дорожно-транспортном происшествии (ДТП). Конструкция несущих систем современных машин должна удовлетворять требованиям к ПБ, проверяемым с помощью сертификационных испытаний (краш-тестов). Согласно статистике, 64 % ДТП приходится на фронтальные столкновения [1]. В России проведение испытаний на безопасность при фронтальном столкновении регламентировано Правилами ЕЭК ООН № 94 [2]. В этом случае ПБ прежде всего обеспечивается двумя конструктивными особенностями несущей системы: наличием энергопоглощающей зоны в передней части транспортного средства и жестким и прочным кузовом, позволяющим сохранить жизненное пространство при столкновении.

К несущей системе, как и ко всему автомобилю, предъявляются требования по уменьшению массы. Особенно актуальным становится снижение массы вследствие возрастающих требований к экологичности и топливной экономичности, а также в связи с развитием и распространением электромобилей. При движении в городском цикле до 88 % энергии расходуется на потери, зависящие от массы машины [3], поэтому ее уменьшение приведет к значительному улучшению топливной экономичности. Для электромобилей снижение массы служит необходимым условием обеспечения достаточного запаса хода.

Применение композиционных материалов (КМ) в конструкции несущей системы — один из перспективных способов уменьшения массы транспортного средства при сохранении или повышении ПБ.

Методики проектирования деталей из КМ, эксплуатируемых при статических нагрузках, достаточно хорошо изучены, но для оценки ПБ необходимо исследовать работоспособность конструкций при динамическом ударном нагружении. В настоящее время оценка эффективности энергопоглощения при разрушении конструкций из КМ становится темой актуальных исследований. Перспективным материалом

является углепластик, который отличают как высокие удельные прочность и жесткость, так и эффективное энергопоглощение. Для отдельных энергопоглощающих элементов (ЭПЭ) из углепластика было получено удельное энергопоглощение 171 кДж/кг [3], что более чем в 4 раза превышает значение для стальных элементов.

У элементов, предназначенных для поглощения энергии в случае столкновения, снижение массы благодаря применению углепластика оказывается больше, чем у конструкций, воспринимающих статические нагрузки. Это делает актуальным использование углепластика не только для элементов несущей системы, обеспечивающих прочность, жесткость и сохранение жизненного пространства, но и для деформируемых зон, испытывающих значительные деформации и разрушения.

В качестве материала элементов несущих систем, позволяющих сохранять жизненное пространство, углепластик используют уже достаточно широко. Также существуют примеры его применения в энергопоглощающих зонах, например, в автомобилях Lexus LFA, Mercedes SLR.

Одной из причин, затрудняющих еще большее внедрение углепластика в несущие системы, и особенно в энергопоглощающие зоны, является отсутствие устоявшихся методик расчета и проектирования конструкций с учетом обеспечения ПБ.

Цель работы — создание математической модели разрушения углепластиковых энергопоглощающих элементов для оценки ПБ автомобилей с композитными энергопоглощающими зонами.

При разрушении изделий из углепластика могут происходить такие процессы [4], как разрушение волокон и матрицы, отслоение волокон от матрицы и деламация слоев. Учет этих особенностей важен для оценки ПБ всей несущей системы, но в наибольшей степени они проявляются в конструкциях, подвергающихся большим деформациям и разрушению в случае столкновения.

На основании изложенного можно сделать вывод о необходимости разработки математической модели, учитывающей указанные осо-

бенности разрушения. Создание математической модели в большинстве исследований основано на поэтапном изучении упрощенных конструкций. Можно выделить следующие распространенные этапы:

- испытание:
  - плоских образцов [5],
  - гофрированных образцов [6],
  - различных профилей [7, 8],
  - деталей (лонжерона, краш-бокса) [9],
  - системы [10],
- краш-тест в составе автомобиля.

Каждый этап можно реализовать как с помощью квазистатических тестов, так и путем испытаний с динамическим ударным нагружением.

К недостаткам образцов плоской формы относится сложность их закрепления для испытаний на разрушение при сжатии. Этому недостатка лишены образцы в виде различных гофр, которые можно изготовить в простой оснастке. Профили чаще всего выполняют с круглым или квадратным сечением, а по форме они обычно

близки к лонжеронам или краш-боксам.

Профили подвергают как квазистатическому, так и динамическому тестированию. Целые системы обычно испытывают на установках, позволяющих проводить динамическое разрушение.

В предлагаемой методике предпочтение отдано динамическим испытаниям образцов с круглым поперечным сечением, на основе которых можно выполнить верификацию имитационной математической модели. Имитационное математическое моделирование с использованием верифицированной модели способно заменить дополнительные дорогостоящие исследовательские испытания для проектирования композитных энергопоглощающих зон. Кроме динамических испытаний образцов останется необходимость лишь в сертификационных испытаниях автомобиля.

Блок-схема предлагаемой методики приведена на рис. 1.

Достоинством образцов с круглым сечением является низкая стоимость производства, бла-

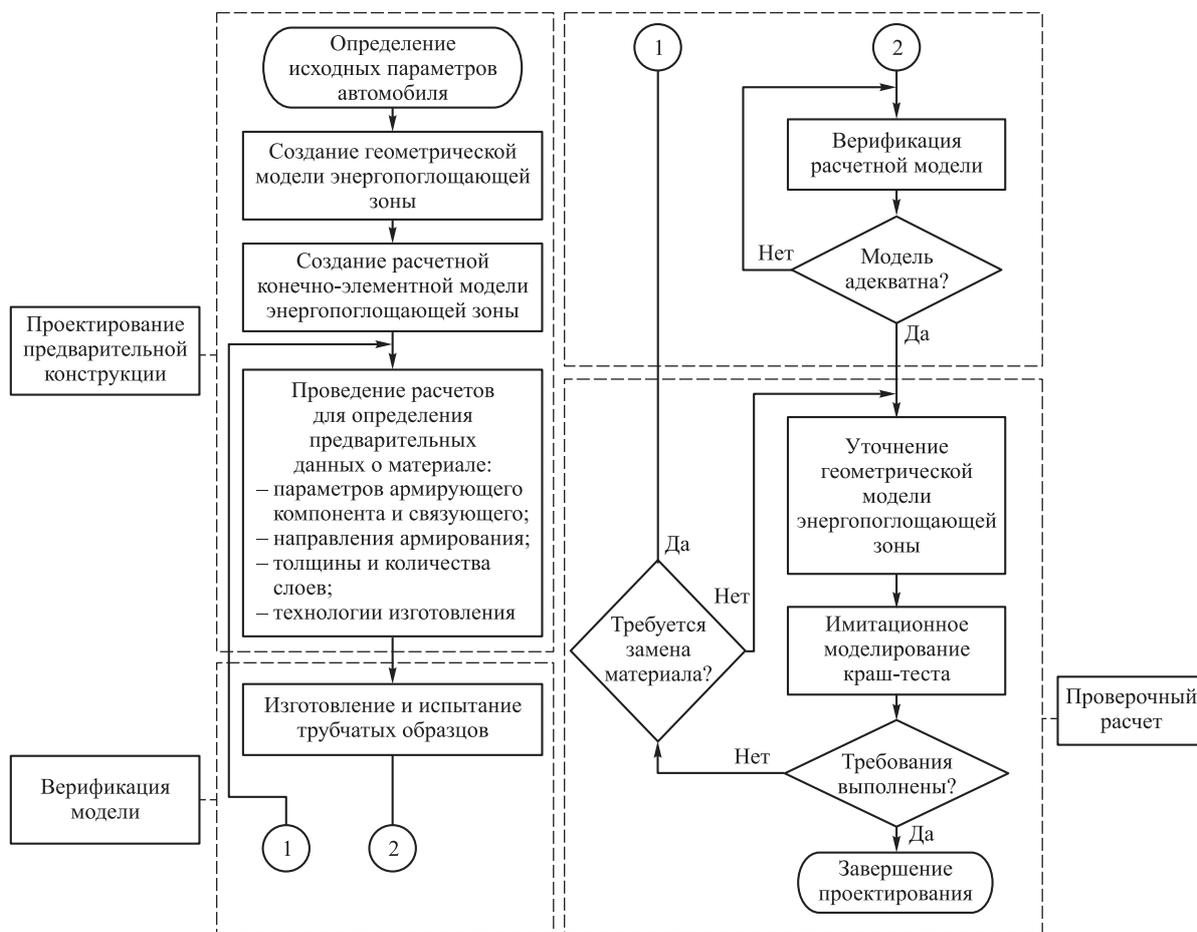


Рис. 1. Блок-схема методики разработки элементов несущих систем из КМ



Рис. 2. Образцы углепластиковых ЭПЭ

годаря чему их можно изготовить в большом количестве для испытаний. Такая форма приближена к конструкции лонжеронов, используемых в деформируемых зонах, которые в основном имеют замкнутое поперечное сечение. Постоянная кривизна поверхности обеспечивает равномерное разрушение и повторяемость результатов.

В данной работе предлагается проведение испытаний с динамическим разрушением образца. К преимуществам динамических испытаний перед другими тестами относятся большая приближенность к реальным условиям и возможность измерения непосредственно ускорений.

Для испытаний изготовлены два образца углепластиковых ЭПЭ (рис. 2) на основе эпоксидной матрицы с помощью метода вакуумной инфузии.

Образцы получены намоткой ткани на оснастку, волокна расположены под углами 0 и 90° к осям образцов. Чтобы уменьшить начальный пик ускорений и обеспечить начало де-

формации с определенной стороны, необходимо на одном из концов трубы выполнить инициатор разрушения [11]. Для этого у каждого образца на одном конце сделана фаска, а на другом — утолщение стенки (рис. 3). Параметры образцов приведены в табл. 1.

Испытания проводили на стенде маятникового типа, схема которого показана на рис. 4. Образец 2 закрепляли на основании 3. Удар по образцу выполнял маятник 1 массой 315,6 кг, предварительно поднятый на необходимую высоту подъемным устройством.

Для первого образца скорость маятника в момент удара составляла 4,0, для второго — 4,5 м/с.

В процессе удара наблюдалось равномерное разрушение углепластикового образца с образованием большого количества мелких осколков, как показано на рис. 5.

Образцы после испытаний приведены на рис. 6. Для оценки эффективности образцов использовали удельное энергопоглощение, вычисляемое как отношение поглощенной кинетической энергии к массе разрушившейся части элемента. Для первого образца удельное энергопоглощение составило 40,4, для второго — 56,2 кДж/кг. Удельное энергопоглощение зависит как от материала, так и от формы ЭПЭ. Разница в полученных значениях свидетельствует о более оптимальном соотношении толщины стенки и диаметра у второго образца.

Таблица 1

Параметры образцов

Номер образца	Высота	Диаметр	Толщина стенки
1	200	110	1,6
2	200	50	1,8

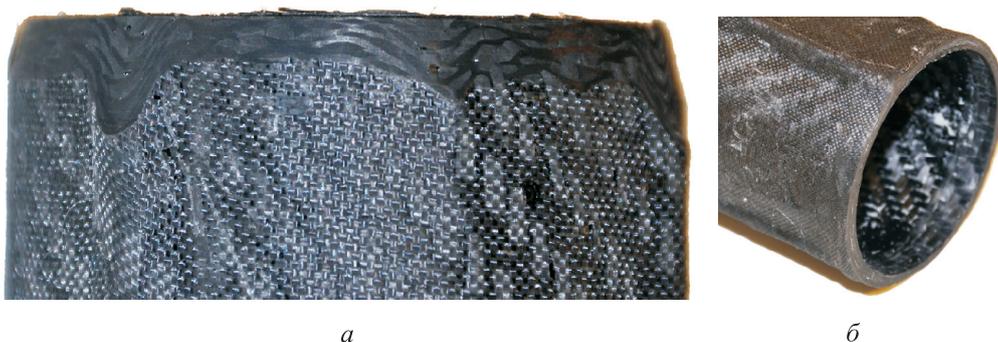


Рис. 3. Фаска (а) и утолщение стенки (б) на концах образца

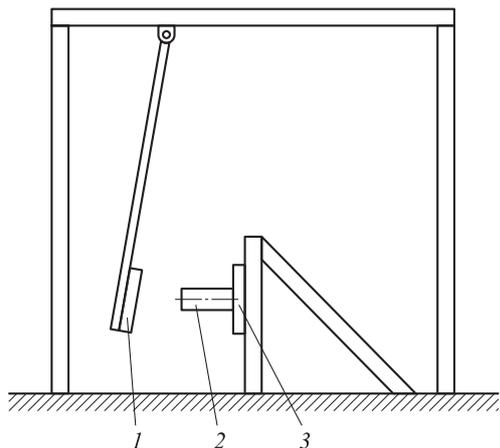


Рис. 4. Схема стенда маятникового типа

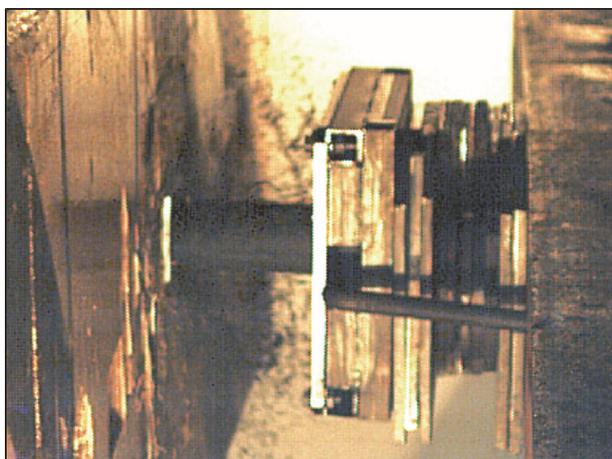


Рис. 5. Процесс разрушения углепластикового образца

Моделирование динамического процесса разрушения углепластиковых ЭПЭ выполнено с помощью метода конечных элементов, широко применяемого для решения подобных задач. Так как процесс является высоконелинейным и быстропротекающим, для его описания выбран решатель Radioss, реализующий явный метод интегрирования.

Состояние динамической системы описывается уравнением [12]

$$M\ddot{u} + B\dot{u} + Ku = P(t),$$

где  $M$  — матрица масс;  $u$  — вектор перемещений;  $B$  — матрица демпфирования;  $K$  — матрица жесткости;  $P$  — матрица сил;  $t$  — время.

Для решения дифференциальных уравнений использован метод интегрирования Ньюмарка [13]. Ускорения и перемещения вычислены по формулам:

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \frac{1}{2}h_{n+1}(\ddot{u}_n + \ddot{u}_{n+1});$$

$$u_{n+1} = u_n + h_{n+1}\dot{u}_n + \frac{1}{2}h_{n+1}^2\ddot{u}_n,$$

где  $h_{n+1}$  — временной интервал между  $t_n$  и  $t_{n+1}$ .

Для математического описания работы КМ применяют феноменологические критерии разрушения, которые сформулированы на основе обработки большого количества экспериментальных данных. Широкое распространение получил квадратичный критерий разрушения Цзя-Ву, относящийся к квадратичным критериям разрушения. Функция критерия разрушения имеет вид

$$F(\sigma) = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{44}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2,$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  — напряжения в различных направлениях;  $F_1, F_2, F_{11}, F_{22}, F_{44}, F_{12}$  — коэффициенты критерия разрушения, зависящие от напряжений.

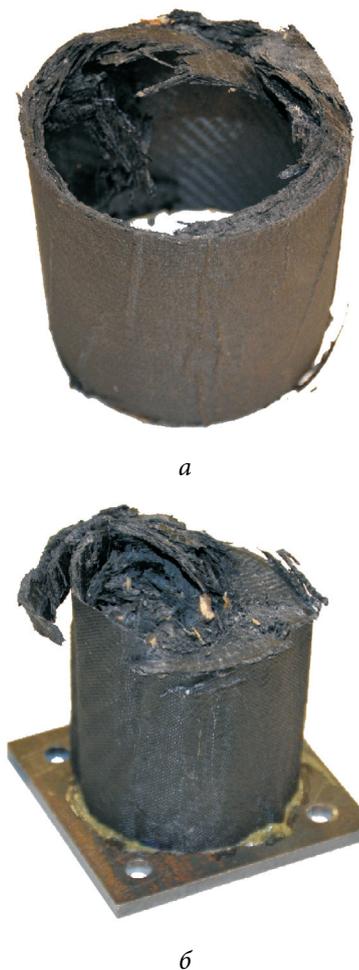


Рис. 6. Первый (а) и второй (б) образцы после испытаний

Критерий Цзя–Ву позволяет определить текущее состояние материала:

- $F(\sigma) < 1$  — зона упругих деформаций;
- $F(\sigma) = 1$  — начало пластической зоны;
- $F(\sigma) > 1$  — зона пластической деформации.

При расчете конструкций, воспринимающих преимущественно статические и медленно изменяющиеся нагрузки, их работоспособность рассматривают при критерии разрушения, меньшем единицы. Особенностью расчета конструкций, подвергающихся ударному разрушению, является необходимость моделирования работы КМ при критерии разрушения, превышающем единицу, и при наличии больших разрушений. Для этого используют модифицированную форму записи критерия разрушения.

В программном комплексе для описания КМ выбрана модель материала № 25 Orthotropic shell and solid material, основанная на модели материала CRASURV [14] и учитывающая большое количество особенностей КМ, а также зависимость коэффициентов критерия разрушения от энергии пластического деформирования  $W_p$ :

$$F_i(W_n) = -\frac{1}{\sigma_{iT}^c W_p} + \frac{1}{\sigma_{iT}^t W_p};$$

$$F_{ii}(W_n) = -\frac{1}{\sigma_{iT}^c W_p \sigma_{iT}^t W_p},$$

где  $\sigma_{iT}^c$  — предел текучести при сжатии;  $\sigma_{iT}^t$  — предел текучести при растяжении.

Кроме того, введена зависимость пределов текучести от энергии пластического деформирования. Предел текучести при сжатии определяется по формуле

$$\sigma_{iT}^c = \sigma_{i0}^c (1 + b_i^c W_p^n),$$

где  $\sigma_{i0}^c$  — начальный предел текучести;  $b_i^c$  — коэффициент пластического упрочнения;  $n$  — показатель степени кривой упрочнения.

Модель учитывает накопление разрушений и разупрочнение в КМ, причем отдельно для растяжения и сжатия. И при растяжении, и при сжатии после достижения максимальных напряжений происходит разупрочнение, и в некотором интервале деформаций напряжения принимают значение остаточных напряжений. Кривые нагружения в виде зависимостей напряжения от относительной деформации показаны на рис. 7.

При растяжении разупрочнение начинается по достижении относительной деформацией

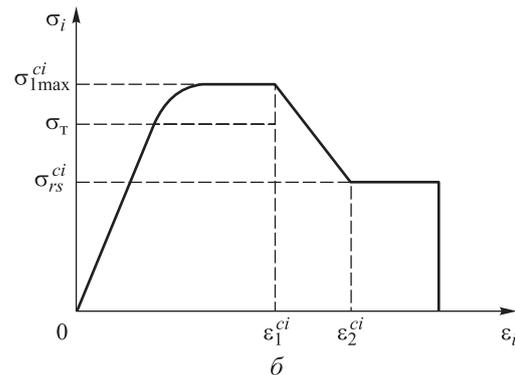
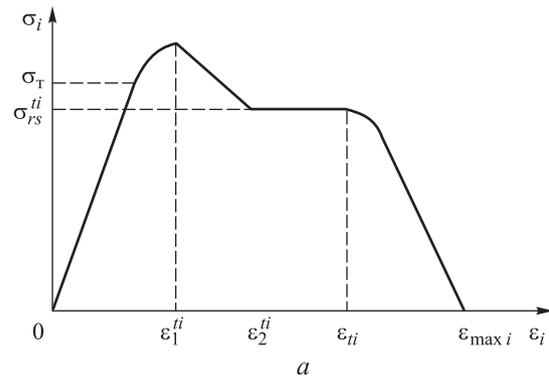


Рис. 7. Зависимости напряжения  $\sigma_i$  от относительной деформации  $\varepsilon_i$  при растяжении (а) и сжатии (б)

значения  $\varepsilon_1^{ii}$  и длится до  $\varepsilon_2^{ii}$ , где напряжения становятся равными  $\sigma_{rs}^{ii}$ . Индекс « $i$ » может принимать значения 1 и 2 и обозначает соответствующие направления. Накопление повреждений происходит при относительной деформации  $\varepsilon_{ii}$ . При этом модули упругости определяются по формулам:

$$E'_i = (1 - d_i) E_i \quad (i = 1, 2);$$

$$G'_{12} = (1 - d_1)(1 - d_2) G_{12},$$

где  $d_1, d_2$  — коэффициенты повреждений;  $E_i$  и  $G_{12}$  — модули упругости первого и второго рода.

Аналогичный процесс имеет место при сжатии по достижении относительных деформаций  $\varepsilon_1^{ci}$  и  $\varepsilon_2^{ci}$ .

Модель предусматривает два условия разрушения конечных элементов. Разрушение при растяжении происходит в случае превышения значения относительной деформации  $\varepsilon_{max i}$ . Ее максимальное значение может быть задано так, что разрушение наступит раньше, чем разупрочнение или накопление повреждений.

Вторым критерием, обуславливающим разрушение и удаление конечного элемента, явля-

ется энергия пластического деформирования  $W_p$ . При достижении ее максимального значения происходит разрушение элемента. Это единственный механизм разрушения при воздействии сжимающих напряжений. При наличии растягивающих напряжений разрушение может произойти вследствие достижения максимального значения как относительной деформации, так и энергии пластического деформирования.

Некоторые параметры модели не могут быть получены только на основе квазистатических испытаний плоских образцов материала и требуют калибровки по результатам натуральных испытаний.

Модель разбивают на специальные многослойные оболочечные конечные элементы, позволяющие моделировать слоистые КМ. Эти элементы дают возможность оценивать напряженное состояние и моделировать разрушение

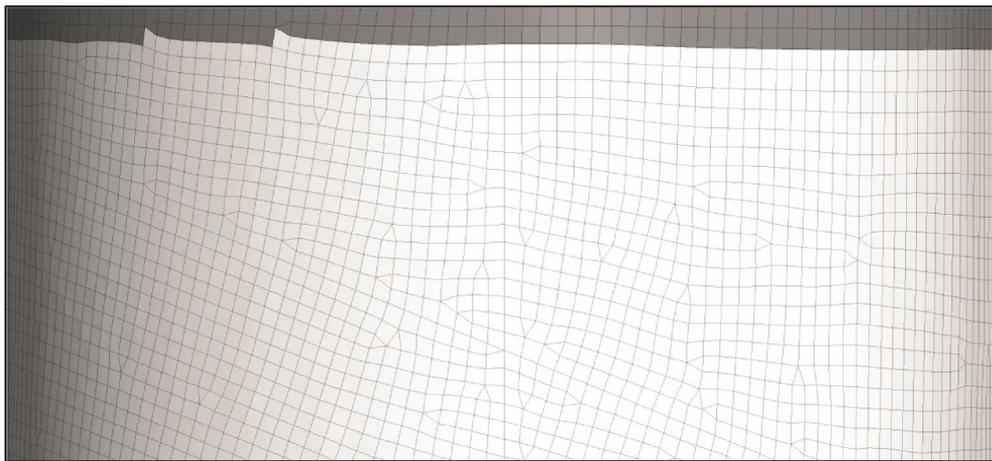


Рис. 8. Фрагмент конечно-элементной модели первого образца

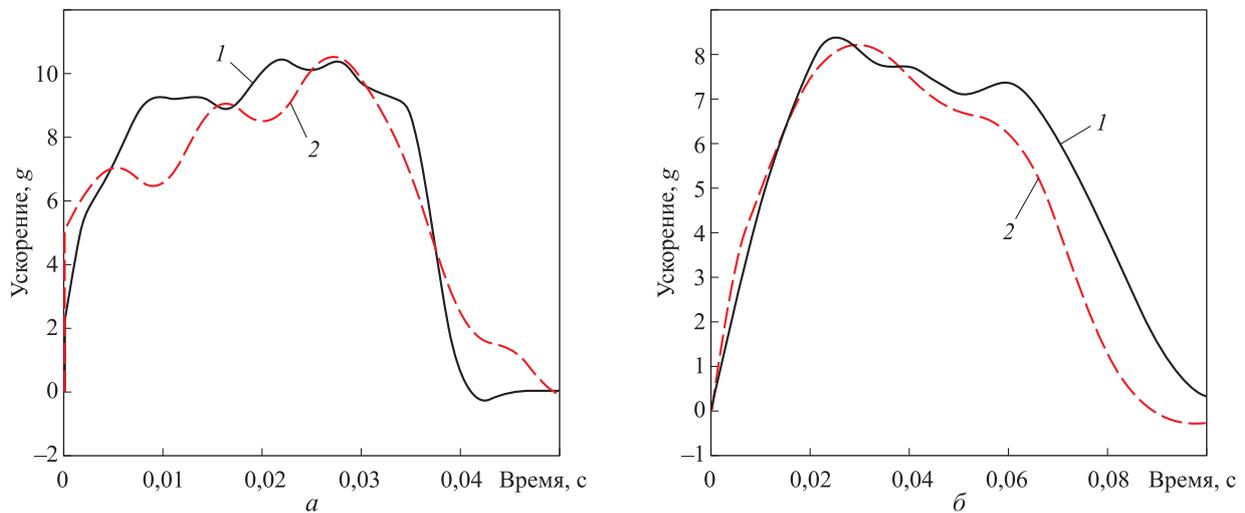


Рис. 9. Расчетные (1) и экспериментальные (2) зависимости ускорения от времени для первого (а) и второго (б) образцов

Таблица 2

**Сравнение экспериментальных и расчетных результатов**

Параметр	Эксперимент	Расчет	Отклонение от эксперимента, %
Длина разрушенной части, мм	78,7/135,3	76/133,8	3,4/1,1
Среднее ускорение, м/с <sup>2</sup>	6,4/4,9	6,7/5,5	5/12

Примечание. В числителе указаны значения для первого образца, в знаменателе — для второго.

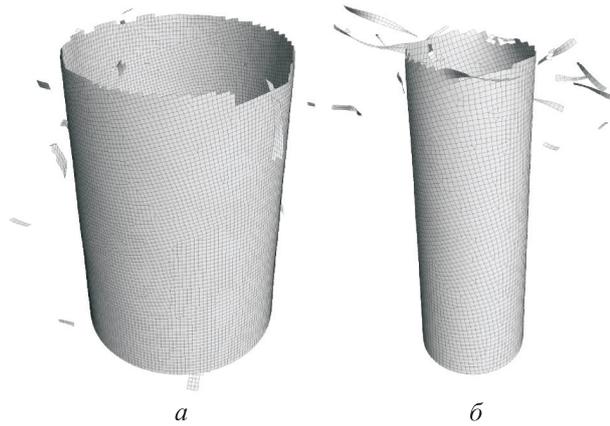


Рис. 10. Промежуточные этапы моделирования первого (а) и второго (б) образцов

каждого слоя отдельно с учетом толщины и направления слоев.

Образец имеет простую цилиндрическую форму, но более стабильные результаты достигаются использованием нерегулярной сетки даже при небольшом количестве треугольных элементов [15]. Это связано с тем, что при регулярной сетке и симметричном нагружении разрушение происходит одновременно в целом

кольце элементов. Мгновенное удаление большого количества элементов приводит к неестественным волнам деформации. При нерегулярной сетке элементы не образуют ровных рядов, и их разрушение осуществляется постепенно.

Инициатор разрушения в виде фаски моделировали путем уменьшения количества слоев КМ в кольце элементов на одном из концов, а маятник — поступательно движущейся абсолютно жесткой стенкой с равной ему массой. Фрагмент конечно-элементной модели первого образца представлен на рис. 8, где темным цветом выделены элементы с уменьшенным количеством слоев.

С помощью разработанной и откалиброванной модели проведено моделирование процесса разрушения углепластиковых ЭПЭ. На рис. 9 приведены зависимости ускорений от времени, полученные экспериментально и путем математического моделирования для двух типов образцов.

Расчетная модель позволяет адекватно вычислять максимальные и средние значения ускорений, хотя наблюдаются отклонения в диапазоне изменения ускорений, которые

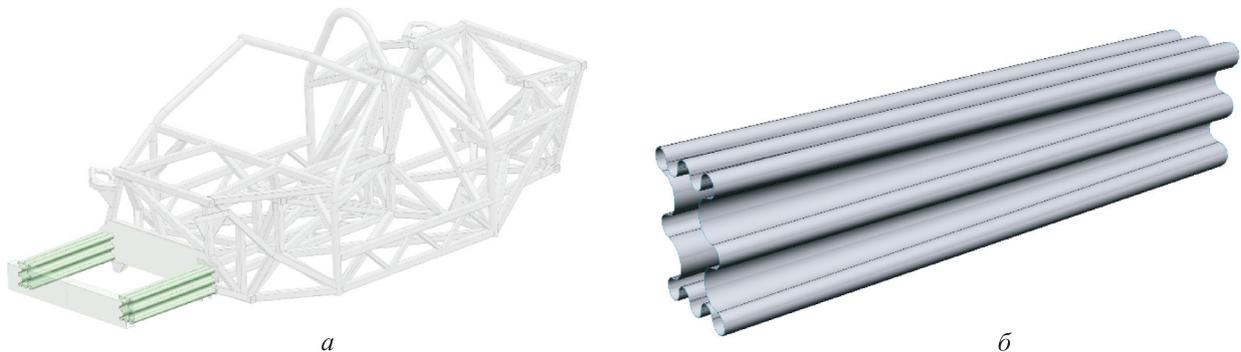


Рис. 11. Несущая система автомобиля с ЭПЭ (а) и энергопоглощающий элемент (б)

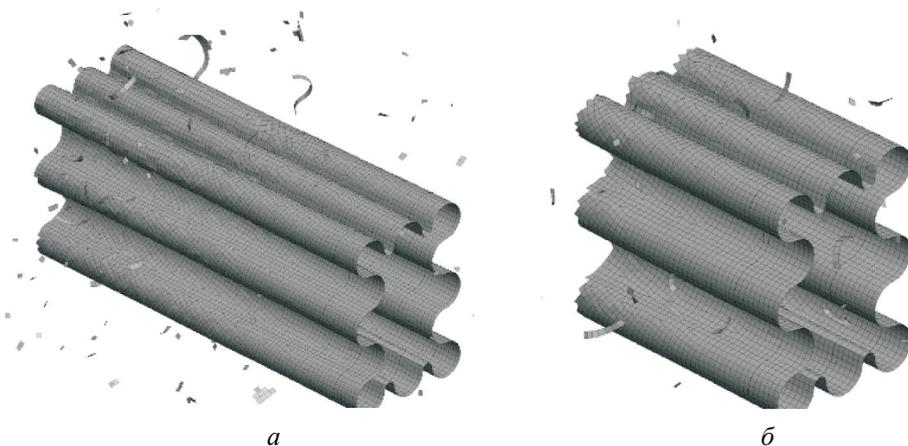


Рис. 12. Промежуточные этапы разрушения лонжерона:  
а — 25 мс; б — 50 мс

можно объяснить недостаточной жесткостью экспериментального стенда.

В табл. 2 приведено сравнение экспериментальных и расчетных результатов.

На рис. 10 представлены промежуточные этапы разрушения первого и второго образцов, полученные путем имитационного моделирования.

С помощью разработанной математической модели композитных ЭПЭ проведены расчеты углепластикового переднего лонжерона легкового автомобиля, показанного на рис. 11.

Промежуточные этапы разрушения, полученные в результате моделирования, показаны на рис. 12.

Результаты расчетов подтверждают адекватность моделирования лонжерона с использованием модели, верифицированной по испытаниям трубчатых образцов.

## Выводы

1. Обоснованы актуальность применения углепластика в несущих системах автомобилей и необходимость разработки методики оценки их ПБ на стадии проектирования.

2. Разработана имитационная математическая модель процесса разрушения углепластикового образца и продемонстрирована ее адекватность на основе проведенных испытаний. Модель корректно предсказывает форму разрушения образцов и их остаточные размеры.

3. Показано, что имитационное моделирование может быть использовано как альтернатива дополнительным испытаниям для проектирования несущих систем и позволяет ограничиться только тестированием образцов простой формы и сертификационными испытаниями.

## Литература

- [1] *Автомобильный справочник. BOSCH*. Москва, Изд-во За рулем, 2000. 896 с.
- [2] ГОСТ Р 41.94–99 (*Правила ЕЭК ООН № 94*) *Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении защиты водителя и пассажиров в случае лобового столкновения*. Москва, Изд-во Стандартов, 2007. 86 с.
- [3] *Advanced Composite Materials for Automotive Applications: Structural Integrity and Crashworthiness*. Ed. Elmarakbi A. New Delhi, John Wiley&Sons, Ltd., 2014. 446 p.
- [4] Kilic Y. *Impact and energy absorption of laminated and sandwich composites*. PhD thesis. Cambridge, MIT, 2008.
- [5] Feraboli P. Development of a Modified Flat-plate Test Specimen and Fixture for Composite Materials Crush Energy Absorption. *Journal of composite materials*, 2009, vol. 43, no. 19, pp. 1967–1990.
- [6] Garattoni F. *Crashworthiness and composite materials: development of an experimental test method for the energy absorption determination and implementation of the relative numerical model*. PhD thesis. Universita di Bologna, 2011. 113 p.
- [7] Zarei H., Kroger M. *Crashworthiness investigation and optimization of empty and foam filled composite crash box*. Woven Fabric Engineering, 2010. 414 p.
- [8] Туренко А.Н., Ужва А.В., Сергиенко А.В. Результаты исследований поглощения энергии при ударе изделиями из композитных материалов. *Вестник ХНАДУ*, 2013, № 60, с. 90–94.
- [9] Obradovic J., Boria S., Belingardi G. Lightweight design and crash analysis of composite frontal impact energy absorbing structures. *Composite Structures*, 2012, vol. 94, no. 2, pp. 423–430.
- [10] Savage G. Formula 1 Composites Engineering. *Engineering Failure Analysis*, 2010, no. 17(1), pp. 92–115.
- [11] Abrate S. *Impact engineering of composite structures*. Wien, New York, Springer, 2011. 407 p.
- [12] Gohlke M. *Practical aspects of finite element simulation*. Altair Engineering, 2015. 503 p.
- [13] Newmark N.M. A method of computation for structural dynamics. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1959, vol. 85, is. 3, pp. 67–94.
- [14] *Radioss theory manual. Part 2. Version 2017*. Altair Engineering, 75 p.
- [15] Andersson M., Liedberg P. *Crash behavior of composite structures*. Goteborg, Chalmers University of technology, 2014. 109 p.

## References

- [1] *Avtomobil'nyi spravochnik. BOSCH* [Automotive Handbook. BOSCH]. Moscow, Za rulem publ., 2000. 896 p.
- [2] GOST R 41.94–99 (*Pravila EEK OON N 94*) *Edinoobraznye predpisaniia, kasaiushchiesia ofitsial'nogo utverzhdeniia transportnykh sredstv v otnoshenii zashchity voditelia i passazhirov v sluchae lobovogo stolknoveniia* [State Standard R 41.94–99. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a frontal collision]. Moscow, Standartinform publ., 2007. 86 p.
- [3] *Advanced Composite Materials for Automotive Applications: Structural Integrity and Crashworthiness*. Ed. Elmarakbi A. New Delhi, John Wiley & Sons, Ltd., 2014. 446 p.
- [4] Kilic Y. *Impact and energy absorption of laminated and sandwich composites*. PhD thesis. Cambridge, MIT, 2008.
- [5] Feraboli P. Development of a Modified Flat-plate Test Specimen and Fixture for Composite Materials Crush Energy Absorption. *Journal of composite materials*, 2009, vol. 43, no. 19, pp. 1967–1990.
- [6] Garattoni F. *Crashworthiness and composite materials: development of an experimental test method for the energy absorption determination and implementation of the relative numerical model*. PhD thesis. Universita di Bologna, 2011. 113 p.
- [7] Zarei H., Kroger M. *Crashworthiness investigation and optimization of empty and foam filled composite crash box*. Woven Fabric Engineering, 2010. 414 p.
- [8] Turenko A.N., Uzhva A.V., Sergienko A.V. Rezul'taty issledovaniia pogloshcheniia energii pri udare izdeliiami iz kompozitnykh materialov [Research results concerning impact energy absorbing by composite products]. *Vestnik KhNADU* [Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University]. 2013, no. 60, pp. 90–94.
- [9] Obradovic J., Boria S., Belingardi G. Lightweight design and crash analysis of composite frontal impact energy absorbing structures. *Composite Structures*, 2012, vol. 94, no. 2, pp. 423–430.
- [10] Savage G. Formula 1 Composites Engineering. *Engineering Failure Analysis*, 2010, no. 17(1), pp. 92–115.
- [11] Abrate S. *Impact engineering of composite structures*. Wien, New York, Springer, 2011. 407 p.
- [12] Gohlke M. *Practical aspects of finite element simulation*. Altair Engineering, 2015. 503 p.
- [13] Newmark N.M. A method of computation for structural dynamics. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1959, vol. 85, is. 3, pp. 67–94.
- [14] *Radioss theory manual. Part 2. Version 2017*. Altair Engineering, 75 p.
- [15] Andersson M., Liedberg P. *Crash behavior of composite structures*. Goteborg, Chalmers University of technology, 2014. 109 p.

Статья поступила в редакцию 12.09.2017

## Информация об авторах

**АРУТЮНЯН Георгий Артурович** (Москва) — аспирант кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: georgy.arut@bmstu.ru).

**КАРТАШОВ Александр Борисович** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kartashov@bmstu.ru).

## Information about the authors

**ARUTYUNYAN Georgiy Arturovich** (Moscow) — Post-graduate, Department of Wheeled Vehicles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: georgy.arut@bmstu.ru).

**KARTASHOV Aleksander Borisovich** (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Wheeled Vehicles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kartashov@bmstu.ru).