

Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 629.3.015.4

DOI 10.18698/0536-1044-2018-2-32-41

Оценка эффективности применения композиционных материалов для энергопоглощающих зон автомобильных несущих систем*

Г.А. Арутюнян, А.Б. Карташов

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

The Estimation of Efficiency of Composite Materials in Energy-Absorbing Zones of Automotive Body Structures

G.A. Arutyunyan, A.B. Kartashov

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1 e-mail: georgy.arut@bmstu.ru, kartashov@bmstu.ru

i В связи с возрастающими требованиями к экологичности и топливной экономичности автомобилей становится актуальной задача по снижению их массы. Одним из перспективных путей ее решения является использование композиционных материалов для производства несущих систем. Кузов автомобиля может подвергаться как статическим и медленно изменяющимся динамическим нагрузкам, так и ударным. Поэтому необходимо оценить эффективность применения композиционных материалов для изготовления элементов, отвечающих за энергопоглощение. Проанализированы особенности энергопоглощения при разрушении композитных конструкций, описаны протекающие при этом процессы. Даны рекомендации по проектированию композитных лонжеронов. Обоснован выбор критерия для оценки их эффективности, с помощью которого выполнено сравнение металлического и композитного лонжеронов. Путем сопоставления различных конструкций и материалов лонжерона выявлена необходимость учета особенностей композиционных материалов на этапе выбора формы и проектирования. Проведено моделирование работы передней энергопоглощающей зоны с композитными лонжеронами при фронтальном ударе. Подтверждены работоспособность и высокая эффективность предложенной конструкции.

Ключевые слова: пассивная безопасность, энергопоглощающая зона, углепластиковый энергопоглощающий элемент, композитные лонжероны, инициатор разрушения, удельное энергопоглощение

i Due to increasing demands for environmentally friendly and fuel-efficient automobiles, the task of reducing their weight is becoming topical. One of the promising ways to solve this

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 11-38-07/15 от 29.07.2015 между ПАО «КАМАЗ» и Московским государственным машиностроительным университетом «МАМИ».

problem is to use composite materials for manufacturing automotive bodies. The body of the car is subjected not only to static and slowly changing dynamic loads, but also to shock loading. Therefore, it is necessary to assess the effectiveness of the use of composite materials for manufacturing the elements responsible for energy absorption. This paper analyzes the features of energy absorption during the destruction of composite structures, describes the ongoing processes and gives recommendations on the design of composite front rails. The criterion selection for evaluating the efficiency of metal and composite front rails is justified, and a comparative analysis is performed. By comparing various designs and materials, it is established that it is necessary to take account of the features of composite materials at the stage of selecting the shape and design of the front rail. Simulation of the operation of the composite front energy-absorbing zone subjected to oblique frontal impact is performed. The operating capacity and high efficiency of the proposed structure are confirmed.

Keywords: passive safety, energy absorption zone, carbon fiber energy absorption element, composite front rails, fragmentation trigger, specific energy absorption

В настоящее время композиционные материалы (КМ) достаточно активно применяют при производстве несущих систем автомобилей, в том числе крупносерийных. В первую очередь КМ используют при изготовлении части несущей системы, предназначенной для размещения водителя и пассажиров. Для элементов несущей системы, воспринимающих преимущественно статические нагрузки, замена стали на КМ, в частности на углепластик, позволяет снизить массу конструкции в 2 раза, а массу всей машины — на 37 % [1].

Чтобы удовлетворять требованиям пассивной безопасности автомобиля, композитная обитаемая часть несущей системы должна иметь такие показатели прочности и жесткости, которые позволят сохранить жизненное пространство в случае столкновения.

Для дальнейшего снижения массы автомобиля из КМ можно изготавливать другие части несущей системы, подверженные значительным деформациям и разрушениям в случае столкновения. К этим частям предъявляются иные требования: они должны обеспечивать достаточную статическую прочность и жесткость при нагрузочных режимах, возникающих в нормальных условиях эксплуатации автомобиля, а также деформироваться и разрушаться по заранее определенному механизму с эффективным поглощением энергии при столкновении. Основная энергопоглощающая зона (ЭПЗ) находится в передней части автомобиля, а ЭПЗ меньшего размера — в задней части несущей системы. С точки зрения снижения массы использование КМ для ЭПЗ может оказаться более эффективным, чем для обитаемой части.

Среди КМ наибольшее распространение как в обитаемой части несущих систем, так и в ЭПЗ

получил углепластик [2]. Существуют примеры применения углепластиковых ЭПЗ в автомобилях с металлической несущей системой (Lotus Elise, Lotus Exige, Aston Martin Vanquish) [3]. Широкое внедрение углепластиковых энергопоглощающих элементов (ЭПЭ) наблюдается в автоспорте, где их используют в большинстве гоночных автомобилей с открытыми колесами [4].

Механизмы энергопоглощения композитных и металлических конструкций значительно различаются. В стальных и алюминиевых изделиях энергия преимущественно поглощается за счет пластической деформации материала и образования складок. В конструкциях, выполненных из КМ, основными механизмами энергопоглощения являются разрушение волокон, матрицы и деламинация слоев [5].

Можно выделить следующие формы деформации и разрушения композиционных ЭПЭ: катастрофическое разрушение, постепенная деформация и постепенное разрушение [6, 7].



Рис. 1. Деформированный образец на основе арамидной ткани

Постепенная деформация, показанная на рис. 1, близка по форме к пластическому деформированию металлических конструкций и также происходит с образованием складок. Энергопоглощение при этом невелико, так как КМ, в отличие от металлов, не имеют значительной зоны текучести.

Катастрофическое разрушение выражается в глобальной потере устойчивости или в появлении трещины у основания энергопоглотителя с его мгновенным разрушением.

Постепенное разрушение является наиболее эффективным режимом с точки зрения энергопоглощения. При этом возникает фронт разрушения, постепенно перемещающийся по всей длине энергопоглотителя. Выделяют две основные формы постепенного разрушения: фрагментацию и подгибание [8]. При фрагментации ЭПЭ разрушается с образованием большого количества мелких осколков. При подгибании появляются продольные трещины, разделяющие ЭПЭ на продольные полосы, которые подгибаются при контакте с препятствием. В этом случае большое влияние на энергопоглощение оказывает трение между полосами материала энергопоглотителя и препятствием. Подгибание характерно для КМ, где преобладают волокна в продольном направлении.

Композитам на основе арамидных волокон свойственна постепенная деформация, углепластикам — постепенное разрушение, стеклопластиковым ЭПЭ — и то, и другое [9].

В конструкции передней части большинства автомобилей есть элементы, предназначенные для обеспечения пассивной безопасности при фронтальном столкновении. Такими элементами обычно являются два лонжерона, имеющие замкнутое сечение, и соединяющая их поперечина. Лонжероны — основные элементы, предназначенные для поглощения энергии в случае высокоскоростных ударов. При различных фронтальных ударах на них приходится 40...60 % поглощенной энергии [10]. Кроме того, лонжероны, как правило, служат для крепления подвески и двигателя. Остальные узлы и части несущей системы оказывают меньшее влияние на энергопоглощение [11].

В металлических лонжеронах необходимо добиться образования равномерных складок. Сечение такого лонжерона обычно имеет выпуклый многогранный профиль со скругленными ребрами.

Для достижения высокой эффективности композитных энергопоглощающих конструкций надо стремиться к их постепенному разрушению. Поэтому следует избегать поверхностей с большим радиусом кривизны, так как они не предрасположены к фрагментации или подгибанию и разрушаются с образованием крупных осколков. У композитных конструкций в отличие от металлических профили с сечением в форме выпуклых многогранников оказываются не очень эффективными. Высокое энергопоглощение обеспечивают профили, грани которых имеют малые радиусы кривизны благодаря большому количеству выштамповок или изготовлению граней в виде гофр.

В целях предотвращения катастрофического разрушения и образования трещин у основания или в середине ЭПЭ на одном из его концов выполняют инициаторы разрушения [12]. Инициатором может быть уменьшение количества слоев армирующего материала, снятие фаски на кромке или специальная форма детали, на которую опирается энергопоглотитель [13, 14]. Кроме того, обеспечению постепенного разрушения ЭПЭ способствует придание ему формы усеченной пирамиды. В этом случае разрушение начинается со стороны меньшего основания. Инициаторы разрушения также служат для уменьшения пика ускорений в начальный момент удара и позволяют добиться относительного постоянства силы, возникающей при разрушении.

Цель работы — оценка эффективности изготовления ЭПЗ несущих систем из КМ и определение особенностей их проектирования путем сравнения композитной и металлической конструкций.

Для проведения сравнения необходимо выбрать критерий оценки эффективности ЭПЭ. Им может быть удельное энергопоглощение, вычисляемое как отношение поглощенной энергии к массе разрушенной или деформированной части ЭПЭ. Также можно использовать среднее напряжение разрушения, определяемое как отношение средней реакции в процессе разрушения к площади поперечного сечения ЭПЭ. Еще одним критерием является коэффициент равномерности реакции, рассчитываемый как отношение пиковой силы в начальный момент разрушения к средней реакции в процессе установившегося разрушения.

Коэффициент равномерности реакции в значительной степени зависит от конструкции инициаторов разрушения, вследствие чего не

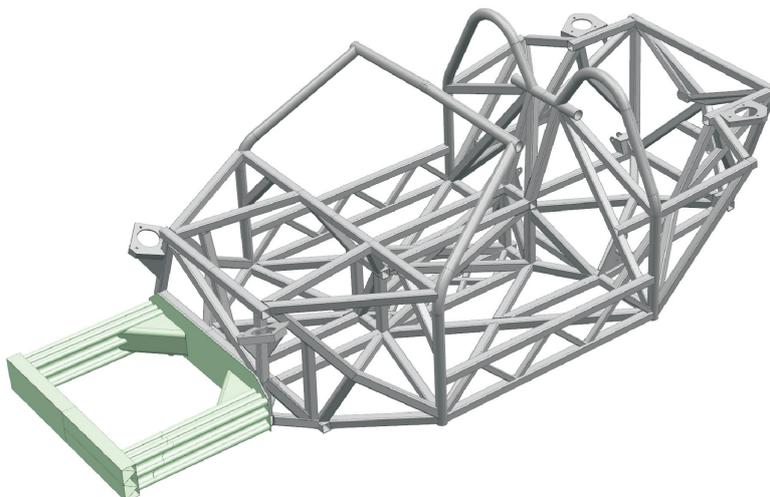


Рис. 2. Общий вид несущей системы

подходит для сравнения механизмов энергопоглощения. Первые два критерия практически взаимозаменяемы, и выбор между ними зависит от возможности измерения величин. Поскольку сравнение выполнялось путем имитационного математического моделирования, обеспечивающего точное измерение поглощенной энергии, в качестве критерия принято удельное энергопоглощение. Этот параметр не является непосредственной характеристикой свойств материала, так как на него влияет конструкция и форма ЭПЭ.

Общий вид рассматриваемой несущей системы показан на рис. 2. В исследуемом автомобиле использована среднеторная компоновка, поэтому деформируемая зона имеет большую длину вследствие отсутствия двигателя в передней части.

Для уменьшения влияния различных факторов и сокращения ресурсоемкости расчета смоделировано фронтальное столкновение в недеформируемое препятствие на скорости движения 56 км/ч. Так как задача симметричная, рассмотрен один лонжерон. Моделирование

процесса ударного нагружения и деформирования проведено в программном комплексе конечно-элементного анализа. Этот процесс является быстропротекающим и высоконелинейным, поэтому использован решатель Radioss, реализующий явный метод интегрирования.

В качестве исследуемого объекта выбран стальной лонжерон (рис. 3), имеющий восьмигранную форму, что способствует равномерному и частому образованию складок и обеспечивает участие значительной доли материала в энергопоглощении.

Для оценки эффективности лонжерона восьмигранной формы смоделирована его работоспособность при замене изотропного металла на углепластик. Сравнение параметров стального и углепластикового лонжеронов восьмигранной формы приведено в табл. 1.

Замена стали на углепластик без изменения геометрии повышает удельное энергопоглоще-

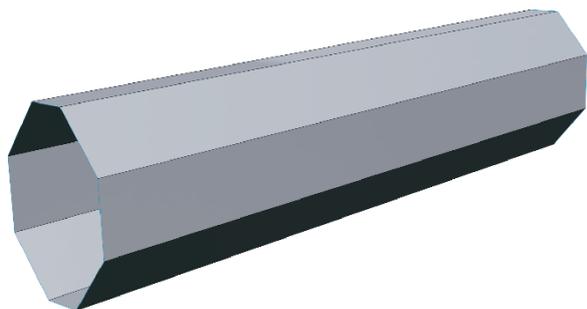


Рис. 3. Стальной лонжерон восьмигранной формы

Таблица 1

Сравнение параметров лонжеронов восьмигранной формы

| Параметр | Лонжерон | |
|-----------------------------------|----------|-----------------|
| | стальной | углепластиковый |
| Толщина стенки, мм | 1,8 | 3,0 |
| Масса, кг | 3,95 | 1,24 |
| Поглощенная энергия, кДж | 60,8 | 52,4 |
| Удельное энергопоглощение, кДж/кг | 15,4 | 42,3 |

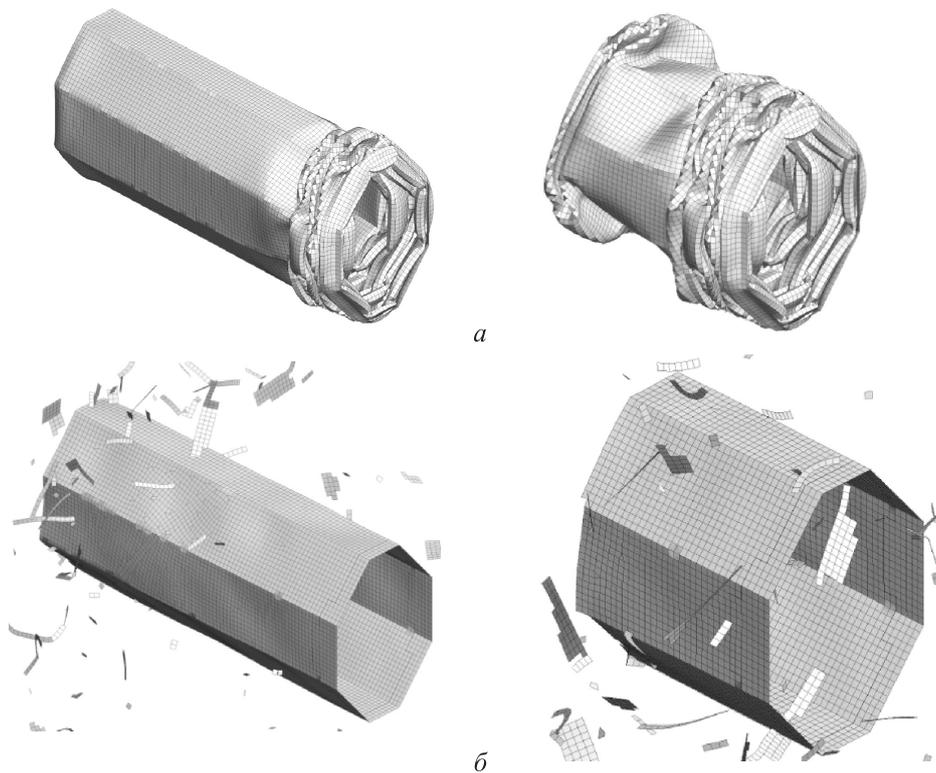


Рис. 4. Сравнение этапов разрушения стального (а) и углепластикового (б) лонжеронов восьмигранной формы при времени нагружения $t = 25$ мс (слева) и $t = 50$ мс (справа)

ние в 2,7 раза. При этом форма деформации значительно изменяется. Сравнение этапов разрушения стального и углепластикового лонжеронов восьмигранной формы при ударном нагружении представлено на рис. 4.

Стальной ЭПЭ деформируется с образованием равномерных складок. Композитный лонжерон разрушается постепенно с возникновением отдельных осколков.

Для повышения эффективности энергопоглощения предложена конструкция углепластикового ЭПЭ, учитывающая особенности его разрушения. Разработанный углепластиковый лонжерон (рис. 5, а) имеет грани в виде гофр с малыми радиусами кривизны, которые обеспечивают стабильное разрушение с образованием мелких фрагментов.

На рис. 5, б показан фрагмент конечно-элементной модели предложенного углепластикового лонжерона. Для более плавного разрушения разбиение на конечные элементы сделано нерегулярным, на одном из концов смоделирован инициатор разрушения в виде кольца элементов уменьшенной толщины.

Выполнена также оценка эффективности разработанной конструкции лонжерона при замене углепластика на сталь. Сравнение пара-

метров стального и углепластикового лонжеронов предложенной формы приведено в табл. 2.

Благодаря более оптимальной форме сечения удельное энергопоглощение углепластико-

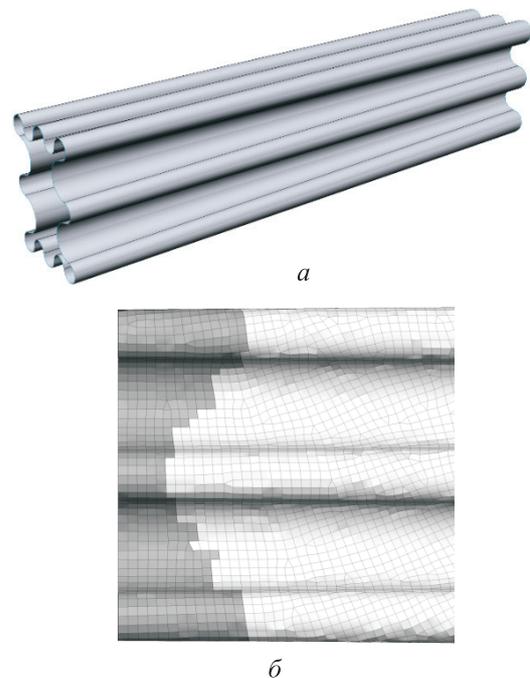


Рис. 5. Разработанный углепластиковый лонжерон (а) и фрагмент его конечно-элементной модели (б)

Таблица 2

Сравнение параметров лонжеронов предложенной формы

| Параметр | Лонжерон | |
|-----------------------------------|----------|-----------------|
| | стальной | углепластиковый |
| Толщина стенки, мм | 1,2 | 2,0 |
| Масса, кг | 4,39 | 1,54 |
| Поглощенная энергия, кДж | 60,84 | 60,84 |
| Удельное энергопоглощение, кДж/кг | 13,9 | 48,8 |

вого лонжерона увеличилось на 15,4 %. Использование этого сечения для стального лонжерона снижает удельное энергопоглощение на 9,7 %.

Сравнение этапов разрушения стального и углепластикового лонжеронов гофрированной конструкции при ударном нагружении представлено на рис. 6.

О большей эффективности предложенной формы для композитного лонжерона свидетельствует меньшее количество отделившихся осколков и их меньший размер. Неэффективность формы гофрированного лонжерона при

изготовлении из стали обусловлена неравномерностью образования складок. Удельное энергопоглощение композитной гофрированной конструкции превышает этот показатель для стальной гофрированной в 3,2 раза.

На рис. 7 приведено сравнение реакций (сил), возникающих при разрушении стального восьмигранного и композитного гофрированного лонжеронов.

Обе конструкции в процессе разрушения создают реакцию с достаточно постоянным средним значением, но амплитуда ее колебаний значительно больше при деформации стального лонжерона. Это объясняется дискретностью образования пластических складок. Вследствие равномерного разрушения и участия в энергопоглощении всего материала углепластиковый лонжерон создает реакцию практически постоянного значения.

При разрушении композитного лонжерона происходит плавное увеличение реакции без выраженного пика в начале, что свидетельствует об эффективности примененного инициатора разрушения. В начале деформации стального лонжерона наблюдается пик реакции. Для уменьшения начального пика в конструкции металлических ЭПЭ могут предусматриваться

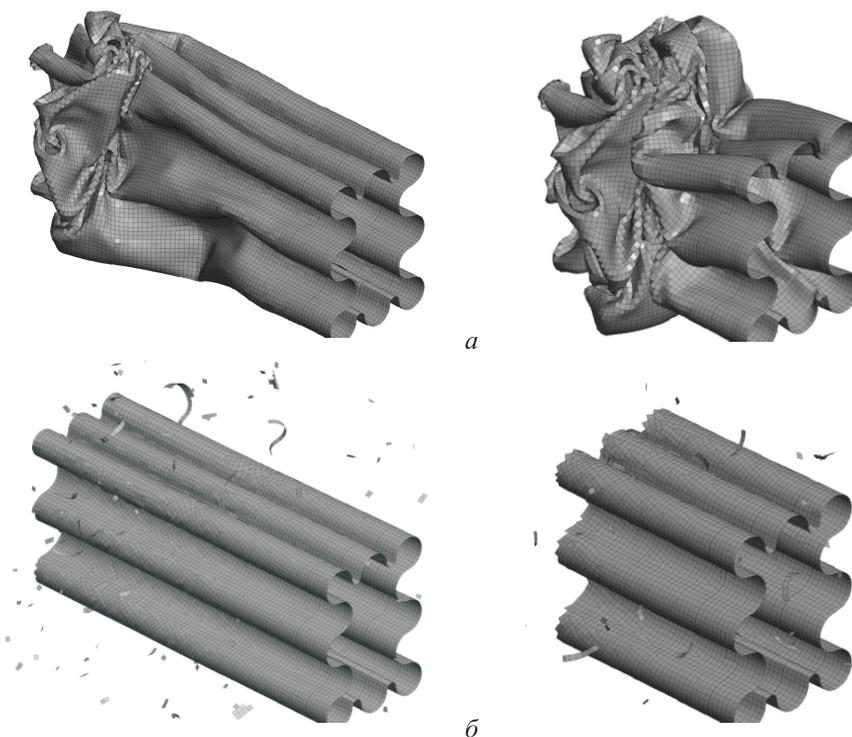


Рис. 6. Сравнение этапов разрушения стального (а) и углепластикового (б) лонжеронов гофрированной конструкции при времени нагружения $t = 25$ мс (слева) и $t = 50$ мс (справа)

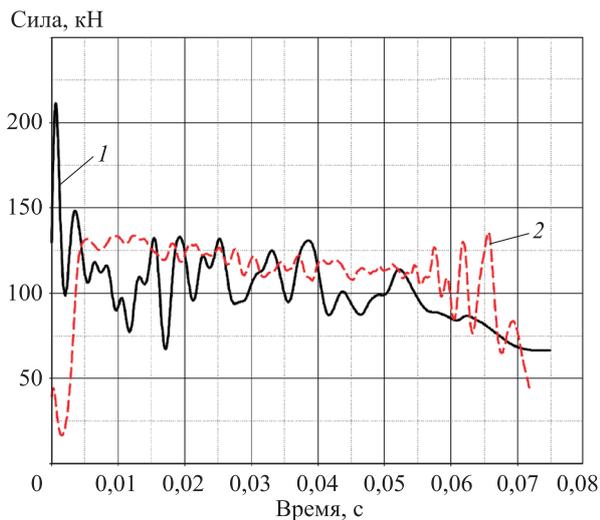


Рис. 7. Временные зависимости сил, возникающих при разрушении стального восьмигранного (1) и композитного (2) гофрированного лонжеронов

инициаторы деформации, часто выполняемые в форме заломов на ребрах [15]. Инициаторы влияют преимущественно на начальный момент деформации и не оказывают значительного воздействия на удельное энергопоглощение.

Сравнительный анализ показал, что из-за различных механизмов энергопоглощения простая замена материала металлической конструкции на композиционный не позволяет добиться высокой эффективности. Удельное энергопоглощение композитного лонжерона восьмигранной формы составляет 42,3 кДж/кг, а гофрированной конструкции, учитывающей особенности КМ, — 48,8 кДж/кг. Поэтому для достижения высокой эффективности ЭПЭ из КМ необходимо учитывать особенности их разрушения и протекающие при этом процессы.

Одним из отличий углепластиковых ЭПЗ от стальных является их полное разрушение и потеря структурной целостности. Это обуславливает одно из их преимуществ, так как позволяет задействовать в энергопоглощении практически всю длину элемента, в то время как металлические элементы деформируются до соприкосновения складок и имеют остаточную длину. В то же время полное разрушение углепластиковых ЭПЗ затрудняет изготовление частей несущей системы, служащих для крепления таких важных агрегатов, как двигатель или подвеска. К перспективным способам устранения указанного недостатка относится использование КМ на основе нескольких армирующих материалов, например углеволокна и арамидных волокон

[16]. В этом случае одни волокна отвечают за энергопоглощение, а другие — за сохранение структурной целостности.

В результате проведенного моделирования выявлены особенности проектирования и расчета композитных ЭПЗ. Наибольшее энергопоглощение достигается при постепенном разрушении с образованием мелких осколков, поэтому предпочтительны формы энергопоглотителей, имеющие грани с малым радиусом кривизны. Необходимо добиться появления фронта разрушения на конце энергопоглотителя, для чего можно использовать инициаторы разрушения. Этому способствует и придание энергопоглотителю формы усеченной пирамиды. Инициаторы разрушения также содействуют снижению пиковых ускорений в начальный момент разрушения. Основание ЭПЭ следует изготавливать с увеличенной прочностью для предотвращения возникновения трещин и катастрофического разрушения.

Сравнительный анализ показал значительно большую эффективность углепластиковых ЭПЗ и подтвердил перспективность их использования.

Для оценки работоспособности предложенной конструкции композитной ЭПЗ и ее применимости в несущей системе автомобиля проведено имитационное моделирование нагружения конструкции с граничными условиями, соответствующими испытанию на фронтальный удар согласно Правилам ЕЭК ООН № 94 [17]. Конечно-элементная модель предложенной конструкции композитной ЭПЗ приведена на рис. 8.

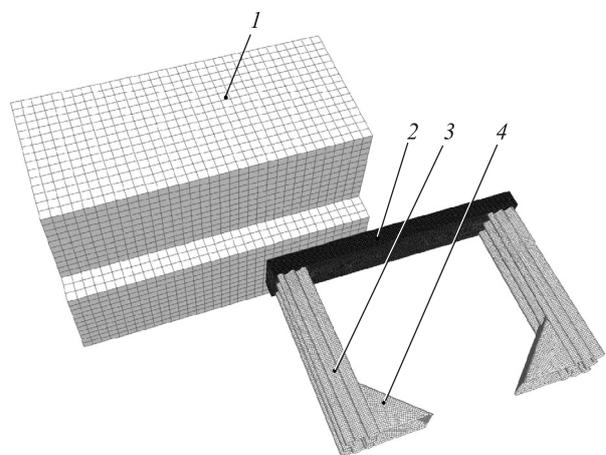


Рис. 8. Конечно-элементная модель предложенной конструкции композитной ЭПЗ

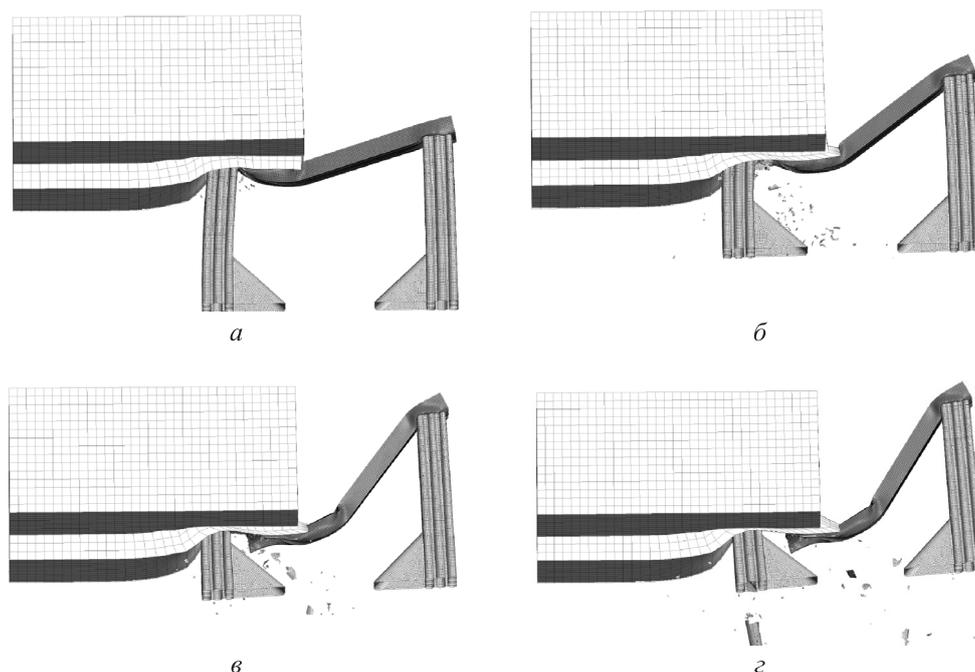


Рис. 9. Этапы процесса разрушения ЭПЗ при различном времени нагружения:
 а — $t = 20$ мс; б — $t = 40$ мс; в — $t = 60$ мс; г — $t = 80$ мс

Расчетная модель состоит из деформируемого барьера 1, смоделированного объемными конечными элементами. Передняя ЭПЗ включает в себя лонжероны 3 предложенной формы, связывающую их стальную поперечину 2 и усилители 4, предназначенные для увеличения прочности лонжеронов у основания и препятствующие катастрофическому разрушению при отклонении направления действия силы от их оси.

Так как рассматривалась эффективность работы ЭПЗ, остальная часть несущей системы не моделировалась. Масса и момент инерции автомобиля имитировались жестким телом, соединяющим основания лонжеронов. Модели-

ровалось столкновение на скорости движения 56 км/ч [17]. Этапы процесса разрушения ЭПЗ показаны на рис. 9.

В процессе столкновения наблюдалось равномерное разрушение одного из лонжеронов. Несмотря на наличие действующей в боковом направлении силы и изгиба лонжерона, у его основания разрушения не происходит благодаря применению усилителя. Длины лонжерона достаточно для поглощения кинетической энергии удара. Происходит отделение металлической поперечины со стороны разрушаемого лонжерона, но сохраняется ее соединение со второй стороны.

На рис. 10 приведен график ускорения точки, расположенной в плоскости основания лонжеронов.

Как видно из рис. 10, максимальное значение ускорения, равное 25,7g, наблюдается еще до начала разрушения композитного лонжерона. Затем начинается процесс разрушения, и ускорение изменяется с амплитудой 10g. Процесс носит стабильный характер, и разрушение происходит по ожидаемой форме. Среднее значение ускорения составляет 11g.

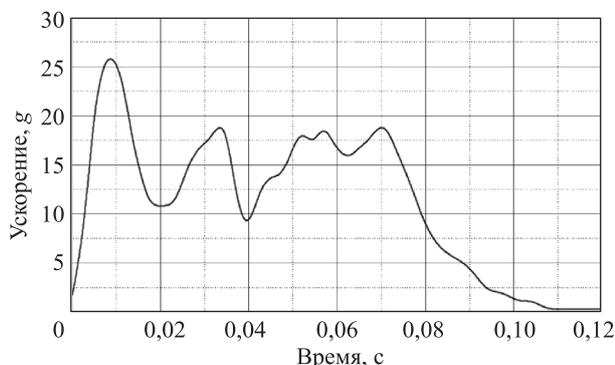


Рис. 10. График ускорения точки, расположенной в плоскости основания лонжеронов

Выводы

1. На основании проведенных расчетов установлено, что композитные ЭПЭ обеспечи-

вают большее удельное энергопоглощение, чем металлические. Для достижения высоких показателей энергопоглощения композитные конструкции необходимо проектировать с учетом особенностей их разрушения.

2. Имитационное моделирование фронтального удара с частичным перекрытием подтвердило работоспособность композитной конструкции и возможность применения КМ в ЭПЗ автомобилей.

Литература

- [1] Owens E. *Lightweight Materials R&D Annual Progress Report*. U.S. Department of energy, 2014. 320 p.
- [2] Lukaszewicz D. Design drivers for enhanced crash performance of automotive CFRP structures. *23rd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Seoul, 27–30 May, 2013, paper no. 13-0302-O.
- [3] Sills P. *A novel solution for achieving lightweight, safe vehicle structures through composites* (2008).
URL: https://www.arb.ca.gov/cc/ccms/meetings/042108/4_21_current_techn_3_sills.pdf (дата обращения 19 августа 2017).
- [4] Pignacca L. *Speed and safety: composite materials in motorsport*. Altair Americas HTC, Detroit, 2012. 56 p.
- [5] Hiermaier S. *Structures under crash and impact*. Springer, 2008. 410 p.
- [6] Elmarakbi A. *Advanced composite materials for automotive applications: structural integrity and crashworthiness*. John Wiley & Sons, Ltd., 2014. XXIV, 446 p.
- [7] Hull D. A unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes. *Composites science and technology*, 1991, no. 40, pp. 377–421.
- [8] Abrate S., Castanie B., Rajapakse Y. *Dynamic failure of composite and sandwich structures*. Springer, 2013. 643 p.
- [9] Thornton P.H. Energy absorption in composite structures. *Journal of Composite Materials*, 1979, vol. 13, is. 3, pp. 247–262.
- [10] Morello L., Rossini L., Pia G., Tonoli A. *The automotive body. Vol. I: Components Design*. Springer, 2011. 668 p.
- [11] Morello L., Rossini L., Pia G., Tonoli A. *The automotive body. Vol. II: System Design*. Springer, 2011. 539 p.
- [12] Hussain N., Regalla S., Rao Y. Comparative Study of Trigger Configuration for Enhancement of Crashworthiness of Automobile Crash Box Subjected to Axial Impact Loading. *Procedia Engineering*, 2017, no. 173, pp. 1390–1398.
- [13] Yang T., Wang J. Crashworthy component design of an ultra-light helicopter with energy absorbing composite structure. *Procedia Engineering*, 2014, no. 80, pp. 329–342.
- [14] Heimbs S., Strobl F., Middendorf P., Guimard J. Composite crash absorber for aircraft fuselage applications. *11th International Conference on Structures under Shock and Impact*, 27 July 2010, Tallinn, Estonia, 2010, no. 113, pp. 3–14.
- [15] Хусаинов А.Ш., Кузьмин Ю.А. *Пассивная безопасность автомобиля*. Ульяновск, УлГТУ, 2011. 89 с.
- [16] Kim J.S., Yoon H.J., Lee H.S., Kwon T.S. Energy absorption characterization of composite tubes for railway application. *17th International Conference on Composite Materials, ICCM-17*, 27–31 July 2009, Edinburgh, United Kingdom, 2009, no. 85394.
- [17] 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 p.

References

- [1] Owens E. *Lightweight Materials R&D Annual Progress Report*. U.S. Department of energy, 2014. 320 p.
- [2] Lukaszewicz D. Design drivers for enhanced crash performance of automotive CFRP structures. *23rd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Seoul, 27–30 May, 2013, paper no. 13-0302-O.

- [3] Sills P. *A novel solution for achieving lightweight, safe vehicle structures through composites* (2008). Available at: https://www.arb.ca.gov/cc/ccms/meetings/042108/4_21_current_tech_n_3_sills.pdf (accessed 19 August 2017).
- [4] Pignacca L. *Speed and safety: composite materials in motorsport*. Altair Americas HTC, Detroit, 2012. 56 p.
- [5] Hiermaier S. *Structures under crash and impact*. Springer, 2008. 410 p.
- [6] Elmarakbi A. *Advanced composite materials for automotive applications: structural integrity and crashworthiness*. John Wiley & Sons, Ltd., 2014. 446 p.
- [7] Hull D. A unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes. *Composites science and technology*, 1991, no. 40, pp. 377–421.
- [8] Abrate S., Castanie B., Rajapakse Y. *Dynamic failure of composite and sandwich structures*. Springer, 2013. 643 p.
- [9] Thornton P.H. Energy absorption in composite structures. *Journal of Composite Materials*, 1979, vol. 13, is. 3, pp. 247–262.
- [10] Morello L., Rossini L., Pia G., Tonoli A. *The automotive body. Vol. I: Components Design*. Springer, 2011. 668 p.
- [11] Morello L., Rossini L., Pia G., Tonoli A. *The automotive body. Vol. II: System Design*. Springer, 2011. 539 p.
- [12] Hussain N., Regalla S., Rao Y. Comparative Study of Trigger Configuration for Enhancement of Crashworthiness of Automobile Crash Box Subjected to Axial Impact Loading. *Procedia Engineering*, 2017, no. 173, pp. 1390–1398.
- [13] Yang T., Wang J. Crashworthy component design of an ultra-light helicopter with energy absorbing composite structure. *Procedia Engineering*, 2014, no. 80, pp. 329–342.
- [14] Heimbs S., Strobl F., Middendorf P., Guimard J. Composite crash absorber for aircraft fuselage applications. *11th International Conference on Structures under Shock and Impact*, 27 July 2010, Tallinn, Estonia, 2010, no. 113, pp. 3–14.
- [15] Khusainov A.Sh., Kuz'min Iu.A. *Passivnaia bezopasnost' avtomobilia* [Passive safety of the vehicle]. Ul'ianovsk, UlSTU publ., 2011. 89 p.
- [16] Kim J.S., Yoon H.J., Lee H.S., Kwon T.S. Energy absorption characterization of composite tubes for railway application. *17th International Conference on Composite Materials, ICCM-17*, 27–31 July 2009, Edinburgh, United Kingdom, 2009, no. 85394.
- [17] 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.

Статья поступила в редакцию 19.09.2017

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, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: georgy.arut@bmstu.ru).

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