

УДК 629.113

EDN MCAУНР

И.А. Филин, Л.Н. Орлов, А.Г. Капустин
**ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕМЕНТАХ,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПАССИВНУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ
АВТОМОБИЛЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Разработана конструкция бокового защитного устройства на основе пултрузионного стеклопластикового профиля постоянного сечения. Проведены его расчеты с использованием программных комплексов *Catia V5* и *ABAQUS*, для которых было проверено выполнение требований Правил ЕЭК ООН № 73. На основе данных компьютерного моделирования даны рекомендации по проектированию бокового защитного устройства из композитного материала для грузового автомобиля. Подтверждены работоспособность и эффективность предложенной конструкции, что актуально в связи с использованием композитных материалов как способа снижения массы автомобиля при необходимости удовлетворения требованиям пассивной безопасности пассажиров.

Ключевые слова: боковое защитное устройство, грузовой автомобиль, расчетная модель, деформируемость, пассивная безопасность, оценка при проектировании.

Композитные материалы (КМ) достаточно активно применяют при производстве автомобильных компонентов, в том числе, крупносерийных. Все большую значимость при проектировании автомобилей придают уменьшению массы, сокращению расходов в расчете на весь срок службы, повышению сопротивляемости разрушению при столкновении. Применение КМ позволяет сократить расходы на изготовление конструкции, так как, в отличие от металлов, композитные материалы не требуют применения дорогостоящих и трудоемких операций: штамповки, сварки, зачистки и др. Отсутствие коррозии, помимо этого, увеличивает срок службы композитных изделий. КМ позволяют получать изделия сложной формы со сравнительно низкими затратами. С точки зрения безопасности, большое внимание уделяют созданию систем контролируемого поглощения энергии при столкновениях. Такие конструкции можно изготавливать из КМ, которые не только позволяют уменьшить массу изделия, но и способны подвергаться значительным деформациям в случае столкновения. К ним предъявляются иные требования: КМ должны обеспечивать достаточную статическую прочность и жесткость при нагрузочных режимах, как при действии эксплуатационных нагрузок, так и в случаях аварийных ситуаций. В последнем случае материалы должны деформироваться и разрушаться по заранее определенному механизму с эффективным поглощением энергии. Перечисленные проблемы производства и оценки автомобильных компонентов рассматриваются в [1-5].

Применяемые КМ представляют собой многокомпонентные материалы, состоящие из полимерной, металлической, углеродной, керамической или другой основы (матрицы), армированной наполнителями из волокон, нитевидных кристаллов, тонкодисперсных частиц и др. Путем подбора состава и свойств наполнителя и матрицы, их соотношения, ориентации наполнителя можно получить материалы с требуемым сочетанием эксплуатационных и технологических свойств. Основными достоинствами полимерных КМ являются: стойкость по отношению к гниению, нагреву, коррозии; высокая удельная прочность и жесткость; не требуются дорогие отделочные материалы; легкость ремонта; более дешевые, чем для металлов, пресс-формы. Недостатком КМ является относительная дороговизна конструкции по сравнению с металлами, хотя стоимость их применения уменьшается при учете общих затрат.

Механизмы энергопоглощения композитных и металлических конструкций значительно различаются. В стальных и алюминиевых изделиях энергия преимущественно погло-

щается за счет пластической деформации материала и образования складок. В конструкциях, выполненных из КМ, основными механизмами энергопоглощения являются разрушение волокон, матрицы и деламинация слоев. Выделяют следующие формы деформации и разрушения композитных энергопоглощающих элементов (ЭПЭ): постепенная деформация, постепенное разрушение и катастрофическое разрушение.

Постепенная деформация 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.

Постепенное разрушение является наиболее эффективным режимом с точки зрения энергопоглощения. При этом возникает фронт разрушения, постепенно перемещающийся по всей длине элемента. Выделяют две основные формы постепенного разрушения: фрагментацию и подгибание. При фрагментации композитный элемент конструкции 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 детали и препятствием. Подгибание характерно для КМ, где преобладают волокна в продольном направлении.

Катастрофическое разрушение выражается в глобальной потере устойчивости или в появлении трещины у основания детали с ее мгновенным разрушением. Для достижения высокой эффективности композитных энергопоглощающих конструкций надо стремиться к их постепенному разрушению.

Целью работы является разработка энергопоглощающих элементов из композитных материалов и их проверка на соответствие предъявляемым требованиям на примере бокового защитного устройства (БЗУ) грузового автомобиля. В качестве объекта исследования был выбран автомобиль категории N₂. По требованиям действующего ТР ТС 018/2011 транспортные средства категорий N₂, N₃, O₃, O₄ должны оборудоваться передними, боковыми и задними защитными устройствами. Для обеспечения конкурентоспособности производимых автомобилей, встает вопрос об улучшении визуального восприятия автомобиля и повышения его потребительских качеств. Достаточно часто владельцы или частные фирмы самостоятельно дорабатывают автомобили, оснащая их другими БЗУ и универсальными инструментальными ящиками, не всегда соответствующими действующим в Российской Федерации Правилам ЕЭК ООН № 73 [6] (далее – Правила). Подобное изменение конструкции автомобиля может иметь негативные последствия как для его владельца, так и для других участников дорожного движения.

Предложенная конструкция БЗУ показана на рис. 1.

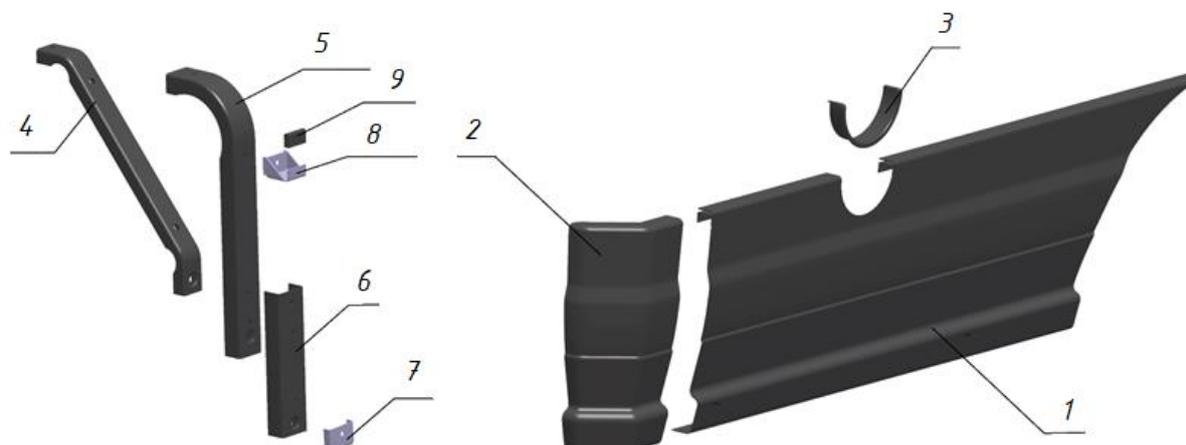


Рис. 1. Конструкция бокового защитного устройства с композитной панелью

Она состоит из двух вертикальных стоек (поз. 5), раскосов (поз. 4), удлинителей стоек (поз. 6). Стойки в сборе крепятся к нижней части бортовой платформы с помощью болтовых соединений. Панель бокового защитного устройства из пултрузионного стеклопластикового профиля (поз. 1) устанавливается на верхние кронштейны (поз. 8) стоек с резиновыми уплотнителями (поз. 9) соединением паз-шип. К нижним кронштейнам (поз. 7) панель окончательно закрепляется болтовыми соединениями. На панель бокового защитного устройства также устанавливаются угловая накладка из АБС-пластика (поз. 2) и накладка под заливную горловину (поз. 3).

Угловая накладка панели БЗУ повторяет ее профиль и устанавливается внахлест. Она представляет собой цельную вертикальную деталь, закрывающую ограждение на всю его высоту, и имеет угол наклона в 45° относительно продольной плоскости автомобиля. Все внешние радиусы закруглений выполнены больше 2,5 мм с учетом требований по травмобезопасности. Передний и задний края бокового ограждения имеют определенные ограничения относительно отступа от вертикальных плоскостей, перпендикулярных продольной плоскости транспортного средства. Расстояние между нижним краем ограждения и уровнем грунта не должно превышать 550 мм, а верхний край БЗУ не должен быть более чем на 350 мм ниже той части конструкции транспортного средства, которую образует вертикальная плоскость, касательная к внешней поверхности шин. Поскольку главной функцией бокового ограждения является защита сторонних участников движения от попадания под кузов грузового автомобиля, оно должно быть жестким и прочным. Вид на боковое защитное устройство с композитной панелью представлен на рис. 2.



Рис. 2. Вид на боковое защитное устройство с композитной панелью

Оценка прочности и безопасности спроектированного БЗУ по требованиям Правил выполнено с применением программ *DS CATIA V5* и *SIMULIA Abaqus*, основанных на методе конечных элементов. Они дают возможность моделировать конструкцию БЗУ с учетом болтовых соединений, сварных швов, контактов поверхностей, что способствует обеспечению достаточно близких к реальным результатам расчета.

Расчеты проводились в *Abaqus/Standard* с учетом нелинейности свойств материала. Принятое значение коэффициента трения деталей внутри модели 0,15. Расчетная модель представлена на рис. 3 и включает в себя панель боковины, кронштейны крепления.

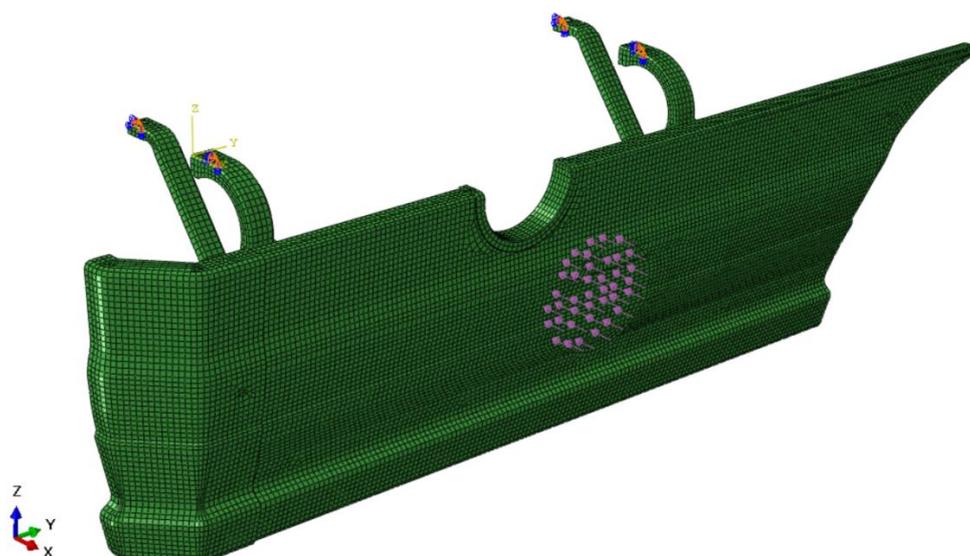


Рис. 3. Расчетная модель БЗУ автомобиля «ГАЗон Next»

Панель БЗУ находится под воздействием статической нагрузки в 1 кН, прилагаемой перпендикулярно к любой части ее внешней поверхности с помощью абсолютно жесткой плоской плиты диаметром 220 мм. В расчетной модели болты крепления были заменены абсолютно жесткими элементами RBE2. Характеристики материалов БЗУ представлены в табл. 1.

Таблица 1.
Характеристика материалов

Наименование материала	Модуль упругости E, МПа	Условный предел текучести σ_t , МПа	Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	Коэффициент Пуассона ν	Плотность, г/мм ³
Пултрузионный профиль ГОСТ 33344-2015-ZG (X/Y/Z)	23000/7000/7000 X/Y/Z	-	240/50/50 X/Y/Z	220/70/70 X/Y/Z	0,15/0,15/0,35 X/Y/Z	$1,75 \times 10^{-9}$
Сталь 08 ГСЮФ	$2,1 \times 10^5$	196	—	—	0.266	$7,85 \times 10^{-6}$

Был рассмотрен вариант нагружения в центральный участок БЗУ на расстоянии 200 мм по горизонтали от задней стойки и 240 мм по вертикали от нижней части панели БЗУ. Нагрузка задавалась перемещением нагружающего цилиндра с постоянной скоростью. БЗУ считаются пригодными, если прогиб устройства под нагрузкой, измеренный в центре силового цилиндра, в этом случае не превышает 150 мм.

На начальных этапах проектирования БЗУ был проведен предварительный его расчет на прочность с использованием программного комплекса *CATIA V5R19*. Анализ полученных результатов позволил установить, что максимальное значение напряжений наблюдалось в верхних кронштейнах крепления панели БЗУ, которое превышало предел текучести материала. В целях снижения максимальных значений напряжений в кронштейнах и повышения их жесткости к первоначальной конструкции кронштейнов были добавлены косынки. Оценка их влияния проведена по результатам расчетов исходной конструкции кронштейна и усиленного варианта. При этом к кронштейнам была приложена нагрузка в

500 Н по оси Y, имитирующая давление от панели при ударе и нагрузка в 150Н по оси Z, имитирующая вес панели БЗУ. После этого были произведены расчеты, результаты которых представлены на рис. 4. В результате изменения конструкции исходного кронштейна (рис. 4а), зона распределения максимальных напряжений в усиленной конструкции (рис. 4б) уменьшилась. Деформация при этом уменьшилась в 2,5 раза.

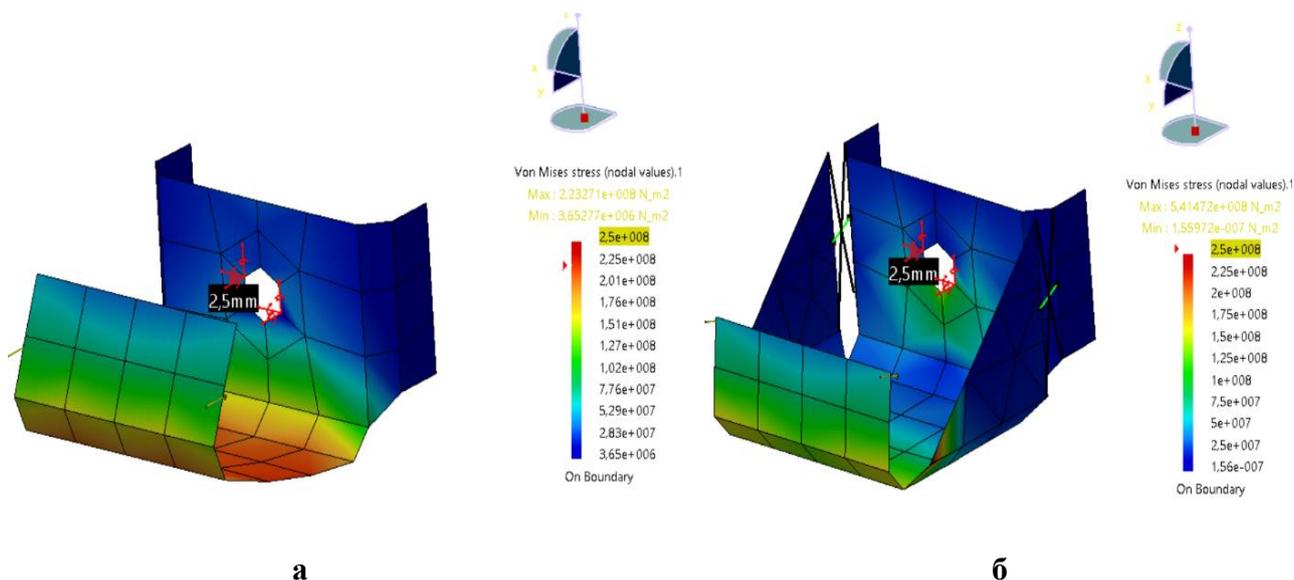


Рис. 4. Распределение напряжения по критерию Мизеса в кронштейнах БЗУ, Н/м²

Окончательная оценка спроектированного БЗУ на соответствие требованиям Правил была выполнена на завершающем этапе проектирования по результатам расчетов в программном комплексе *Abaqus*. Решатель *Abaqus* позволяет проводить расчеты в нелинейной постановке с учетом контактного взаимодействия деталей конструкции, что обеспечивает получение результатов максимально приближенных к реальным. В соответствии с требованиями Правил к центральной части БЗУ была перпендикулярно приложена статическая нагрузка, равная 1 кН. Деформированное состояние БЗУ показано на рис. 5. Под действием нагрузки максимальная величина деформации конструкции составила 75,65 мм и не превысила требуемых 150 мм. Измененная конструкция имеет достаточный запас прочности. Максимальное значение напряжений наблюдалось в области крепления стоек БЗУ к основанию платформы и составило 275 МПа, что меньше временного предела прочности ($\sigma_{вр} = 320$ МПа). Величина пластических деформаций составляла 1,7 %, что намного меньше относительного удлинения материала ($\delta = 26$ %).

Для пултрузионной панели БЗУ максимальные напряжения наблюдались в местах крепления с верхними кронштейнами стоек панели БЗУ 54,51 МПа, что меньше предела прочности материала (70 МПа). Напряжения в зонах крепления панели к нижним кронштейнам стоек были значительно меньше и составляли 18 МПа. Это говорит о том, что напряженно-деформированное состояние спроектированной конструкции при данном виде нагружения находится в допустимых пределах. Таким образом установлено, что разработанное композитное защитное устройство отвечает требованиям Правил ООН № 73 и обеспечивает пассивную безопасность автомобиля при боковом ударе. При использовании композитной панели удалось получить конструкцию на 20 % легче традиционного варианта, выполненного из металла. Помимо этого, форма панели повторяет дизайнерское решение базового автомобиля и имеет большую площадь перекрытия пространства под бортовой платформой.

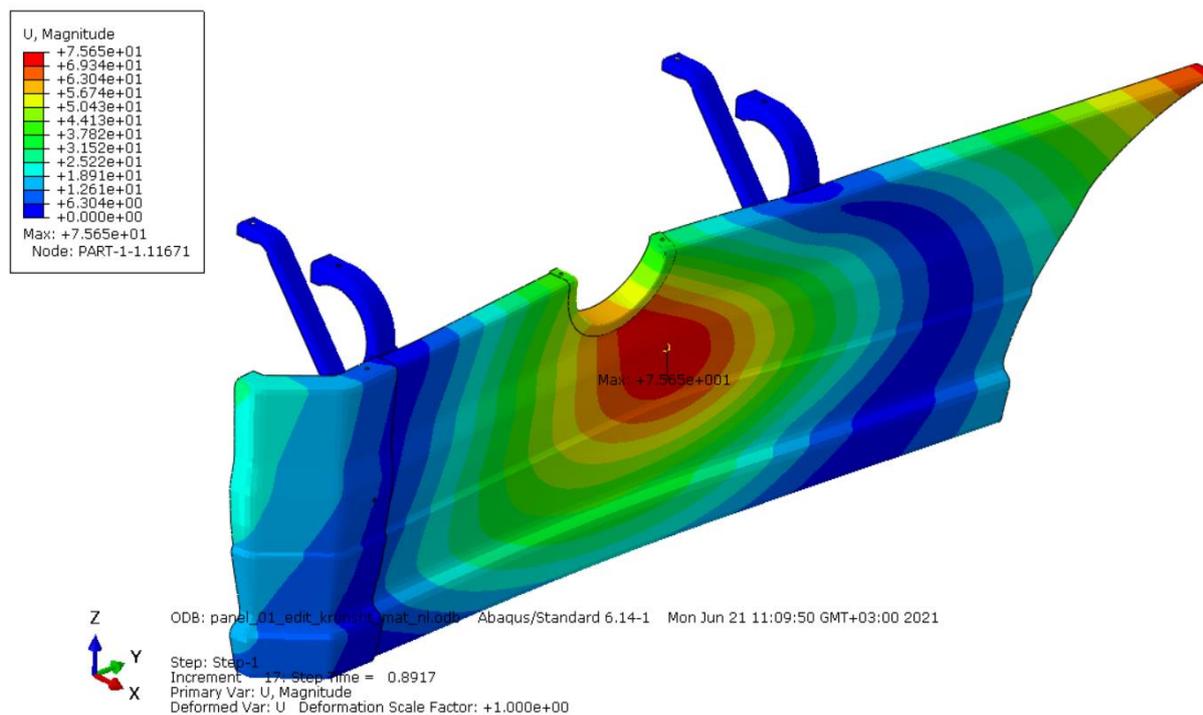


Рис. 5. Деформируемость модели БЗУ, мм

Рассмотренная методика компьютерного моделирования условий аварийного нагружения конструкции имеет практическое значение и может применяться при проектировании других защитных устройств, обеспечивающих пассивную безопасность автомобиля. Ее эффективность особенно высока при проведении сравнительных оценок влияния вносимых в конструкцию изменений, например, применения КМ, на повышение пассивной безопасности наземных транспортных средств. Использование компьютерного моделирования при рассмотрении аварийных ситуаций, связанных с автомобилем, в соответствии с требованиями технического регламента, дает возможность прогнозировать его пассивную безопасность на ранних этапах проектирования. Этот подход позволяет оценивать и анализировать безопасность на всех этапах разработки, а также конструкции кузова и ее последующих изменений, что является важным аспектом в обеспечении существующих стандартов безопасности транспортных средств.

Библиографический список

1. **Кулагин, А.Л.** Композиционные материалы в системах пассивной безопасности и элементах конструкции спортивных автомобилей класса «formula student» / А.Л. Кулагин, Р.В. Деунажев, К.О. Гончаров, Л.Н. Орлов // Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы. Сборник материалов 94 международной научно-технической конференции ассоциации автомобильных инженеров. – Н. Новгород: изд-во НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016. С. 145-148.
2. **Сулегин, Д.А.** Оптимизация конструкции основания кузова грузопассажирского автомобиля в целях повышения энергоемкости при боковом ударе // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. №2(110). С.1-16.
3. **Лю, И.** Сравнительное исследование напряжено-деформационных состояний склеенных и сварных конструкций автомобиля при ударных нагрузках / И. Лю, В.Н. Зузов, Р.Б. Гончаров // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета Серия «Машиностроение». 2022. № 3. С. 64-77.

4. **Лю, И.** Исследование влияния применения клеевого соединения в двери на пассивную безопасность автомобиля при боковом ударе / И. Лю, В.Н. Зузов // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса. Сборник статей XV Международной научно-практической конференции. – Пенза: изд-во Пензенского государственного аграрного университета, 2021. С. 38-45.
5. **Арутюнян, Г.А.** Оценка эффективности применения композиционных материалов для энергопоглощающих зон автомобильных несущих систем / Г.А. Арутюнов, А.Б. Карташов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 2 (695). С. 32-41.
6. ГОСТ 3 41.73-99 (Правила ЕЭК ООН № 73). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения грузовых транспортных средств, прицепов и полуприцепов в отношении их боковой защиты. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. – 12 с.