

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НА ЭНЕРГОЁМКость ОСНОВНЫХ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КУЗОВА АВТОМОБИЛЯ В ЗОНЕ БОКОВОГО УДАРА

В.Н. Зузов, Д.А. Сулегин

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия*

В настоящее время актуальной проблемой является обеспечение пассивной безопасности автомобиля при боковом ударе. В работе разработаны рациональные конечно-элементные модели (КЭМ) кузова, сминаемого барьера и столба, на базе которых получаются результаты с приемлемой точностью и минимальным временем решения при использовании решателя LS-DYNA. Поведение материала кузова и рамы описаны с использованием модели Джонсона–Кука, позволяющей учесть нелинейность материала и влияние скорости нагружения, а поведение пеноалюминия описано с использованием модели Дешпенда–Флека. Были проанализированы фазы деформирования кузова и характер деформирования элементов кузова. По результатам расчёта получено, что наиболее опасным режимом нагружения при боковом ударе является удар о столб. Анализ картины деформированного состояния при ударе о столб показал, что порог, дверь, крыша, пол и рама существенно деформируются и нуждаются в дополнительном исследовании и усилении, поэтому в данной работе было предложено усиление элементов конструкции кузова с помощью пеноалюминия. Анализ показал, что для удовлетворения требованиям пассивной безопасности необходимо комплексное усиление элементов кузова, но это влечёт за собой существенное увеличение массы кузова, поэтому в будущем необходимо проведение топологической и параметрической оптимизаций силовых элементов кузова.

Ключевые слова: кузов, столб, пассивная безопасность, пеноалюминий, конечно-элементная модель, энергоёмкость, боковой удар.

Введение

Аварии вследствие бокового удара являются одними из самых опасных, приводящих ежегодно к гибели и травмам людей во всём мире. Статистические данные аварий показывают, что более трети всех аварий со смертельным исходом происходят из-за бокового удара автомобиля о деревья или столбы, что свидетельствует о его значимости по сравнению с лобовыми столкновениями. Существует множество исследований, посвященных способности конструкции транспортного средства поглощать энергию удара [1–7].

В настоящее время одним из эффективных способов повышения энергоёмкости конструкций является использование различных наполнителей. Ряд исследований, активировавших применение сотовых материалов для автомобилей, изложен в работах Cernicchi [5], Cazzola [6] и Gupta [7]. Gupta [7] изучал применение запененных стоек при воздействии силы на кромку крыши автомобиля. Был сделан вывод, что стойки с сотовым наполнителем значительно снижают изгиб и деформации В-стойки, по меньшей мере, на 15 %. С точки зрения улучшения конструкции автомобиля для фронтальных краш-тестов, Droste [8] показал, что сопротивление прогибу стойки может быть улучшено установкой в нее пенонаполненной трубы. В исследовании Paulino [9] была продемонстрирована эффективность применения пенонаполнения между дверными панелями. Для оценки динамического отклика двери автомобиля с и без наполнения было выполнено моделирование бокового удара. Результаты показали, что применение наполнителя эффективно снизило ускорение и проникновение в салон двери на 55 и 10 % соответственно. Однако ввиду того, что исследования проводились только для дверных панелей, невозможно перенести некоторые важные результаты на другие силовые элементы. В работе Р.Б. Гончарова, В.Н. Зузова [10] доказано, что наиболее эффективным материалом-наполнителем в несущих тонкостенных конструкциях применительно к задачам пассивной безопасности автомобилей является пеноалюминий с плотностью 800 кг/м^3 . Так как основными силовыми элементами кузова автомобиля, которые

подвергаются ударному воздействию при боковом ударе, являются тонкостенные порог, дверь, боковая стойка, пол, крыша и рама, которые являются тонкостенными, то в данной работе в качестве усилителя будет использоваться пеноалюминий.

Анализ напряженно-деформированных состояний (НДС) кузова легкового автомобиля при боковом ударе

Для легковых автомобилей проводятся испытания и моделирование для оценки безопасности транспортного средства при боковом ударе согласно Правилам ЕЭК ООН. Все остальные испытания (Европейский комитет испытания новых автомобилей – EuroNCAP; Американское управление дорожной безопасности – NHTSA и другие) базируются на методике данных правил, однако проводятся на более высоких скоростях. Согласно Правилам ЕЭК ООН, существует два вида испытаний автомобиля при боковом ударе [11, 12]:

1. Правило ЕЭК ООН № 95: имитация бокового удара другим автомобилем. При боковом краш-тесте в водительскую дверь неподвижного автомобиля на скорости 50 ± 1 км/ч направляется специальная тележка с закрепленным на ней деформируемым барьером;

2. Правило ЕЭК ООН № 135: автомобиль со скоростью 32 ± 1 км/ч направляют в столб диаметром в 25,4 см (рис. 1).

Удар с левой стороны (вид сверху)

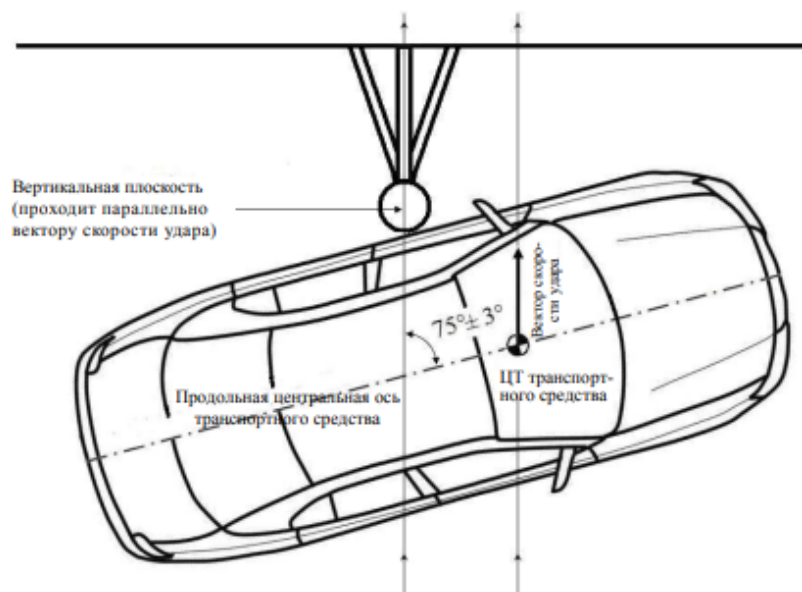


Рис. 1. Испытания по Правилу ЕЭК ООН № 135

Основной целью данной работы является исследование влияния различных силовых элементов кузова автомобиля на энергоёмкость конструкции с использованием пеноалюминия и без него при боковом ударе.

Краш-тесты представляют собой быстротекущие во времени процессы, сопровождающиеся большими деформациями объектов моделирования, пластическим их деформированием и разрушением, а также самоконтактными, т. е. являются высоконелинейными задачами, содержащими все три типа нелинейностей: геометрическую, нелинейность свойств материалов и контактную. Это обуславливает использование в качестве расчетной программы LS-Dyna, а повышенные требования к вычислительным ресурсам по их быстрдействию делает целесообразным решать данные задачи на базе метода конечных элементов (МКЭ), составленных из оболочечных элементов. Вследствие этого геометрическую модель кузова выполняют с использованием поверхностей инструмента. В модели учитывается геометрия самого кузова, рамы, а также стекол салона.

Объектом исследования в данной работе является кузов автомобиля УАЗ, поскольку он является одним из наиболее распространённых автомобилей на отечественном рынке, имеет раму и может быть использован для перевозки груза. Результаты испытаний данного автомобиля на

Расчет и конструирование

пассивную безопасность показывают, что кузов нуждается в дополнительном исследовании, доработке и улучшении. Конечно-элементная модель кузова автомобиля создавалась на основе методик, которые изложены в работах [13–15] (рис. 2). Размер конечного элемента – 15 мм, что характерно для моделей среднего уровня, количество конечных элементов – 375390. Элементы кабины моделировались преимущественно четырехузловыми оболочечными элементами типа Бельчико–Цая. Толщина внутренних и внешних панелей обшивки кузова 2 мм, лонжероны рамы – 4 мм, боковые стёкла – 4 мм, передние и задние стёкла – 6 мм.

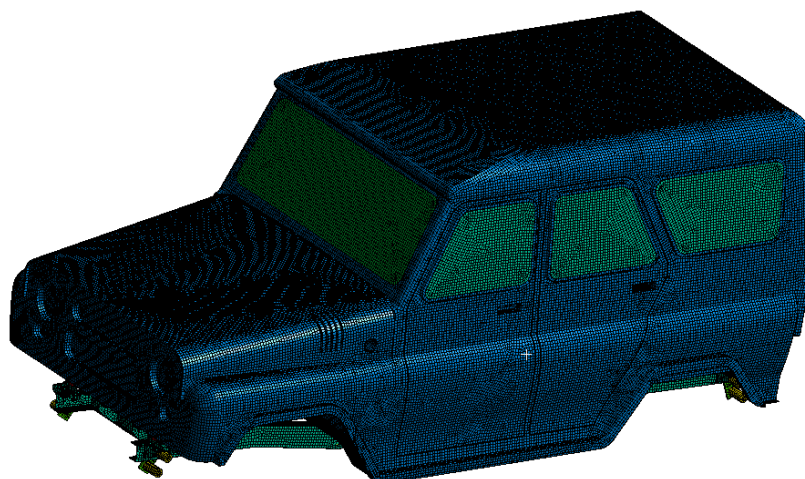


Рис. 2. КЭМ кузова с рамой

В модели использовались следующие материалы:

– стекло. Тип модели Multilinear Isotropic Hardening с критерием разрушения Failure/Principal Stress Failure с уровнем разрушающих напряжений 150МПа;

– сталь AISI1020 с описанием напряженно-деформированного состояния моделью Джонсона–Кука;

– пеноалюминий с описанием напряженно-деформированного состояния моделью Дешпенда–Флека (только в моделях с пенонаполненными элементами усиления).

Модели Джонсона–Кука и Дешпенда–Флека описываются в соответствии со следующими уравнениями [10, 16]:

1. Модель Джонсона–Кука:

$$\sigma = (A + B\bar{\epsilon}_p^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - (T^*)^m),$$

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0},$$

где A, B, n, C, m – зависящие от свойств материала константы (приведены в табл. 1); $\bar{\epsilon}_p^n$ – эффективная пластическая деформация; $\dot{\epsilon}^*$ – эффективная скорость пластической деформации; T_0, T_m – температура окружающей среды и температура плавления материала (см. табл. 1) соответственно.

Таблица 1

Значения констант и температуры плавления материала

Initial Yield Stress	A	3500 МПа
Hardening Constant	B	2750 МПа
Hardening Exponent	n	0,36
Strain Rate Constant	C	0,022
Thermal Softening Exponent	m	1
Melting Temperature	T_m	1515 °C

2. Модель Дешпенда–Флека.

Описание свойств материала пеноалюминия с помощью зависимостей Дешпенда и Флека:

– описание поверхности текучести материала:

$$Y = \sigma_p + \gamma \frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_D} + \alpha_2 \ln \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{\hat{\varepsilon}}{\varepsilon_D}\right)^\beta} \right],$$

– эмпирические зависимости (коэффициенты приведены в табл. 2):

$$\{\sigma_p, \alpha_2, \frac{1}{\beta}, E_p\} = C_0 + C_1 \left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)^k,$$

$$\varepsilon_D = -\ln \left(1,4 \frac{\rho_f}{\rho_s}\right).$$

Таблица 2

Коэффициенты для описания свойств пеноалюминия

Коэффициент	σ_p (МПа)	α_2 (МПа)	$1/\beta$	γ (МПа)	E_p (МПа)
C_0	0	0	0,22	0	0
C_1	720	140	320	42	330
k	2,33	0,45	4,66	1,42	2,45

– физико-механические характеристики материалов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Физико-механические характеристики материалов

Материал	Модель упругости 1-го рода, ГПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м ³
Стекло	76	0,3	2500
Сталь AISI1020	200	0,3	7850
Пеноалюминий	16,76	0,3	800

Для оценки соответствия требованиям правил пассивной безопасности легковых автомобилей были проведены расчеты удара кузова автомобиля о столб диаметром 254 мм со скоростью 32 км/ч и удар сминаемым деформируемым барьером на скорости 50 км/ч. В результате расчёта были получены картины деформированного состояния, представленные на рис. 3–9.

Time = 0.2

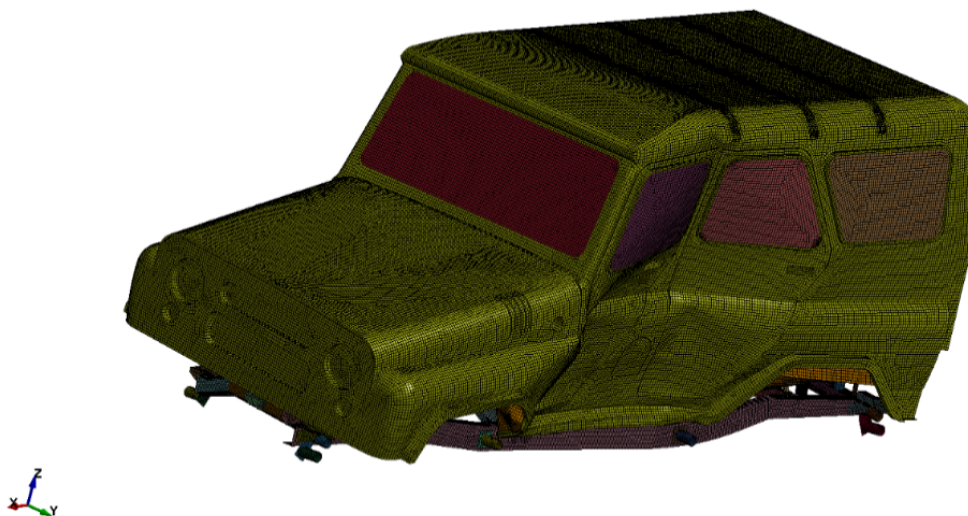


Рис. 3. Картина деформированного состояния (удар сминаемым барьером)

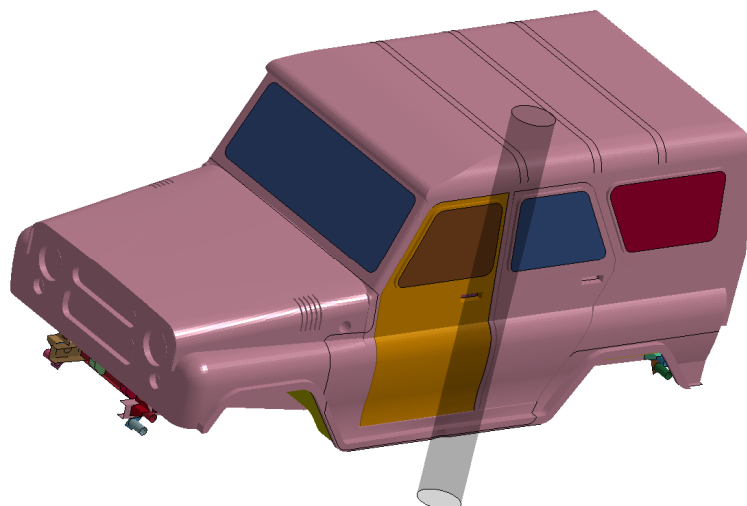


Рис. 4. Фаза 1 – деформирование порога

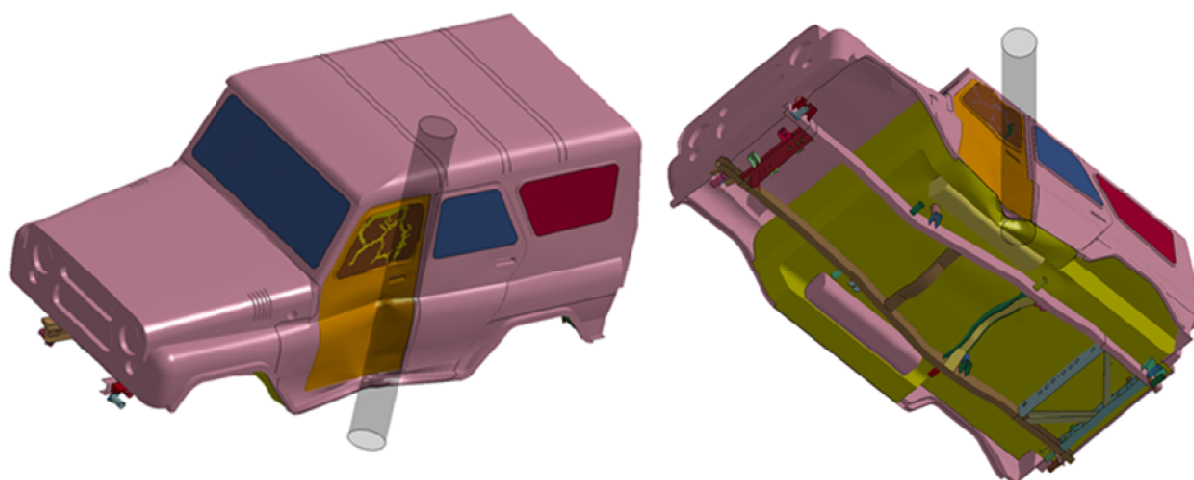


Рис. 5. Фаза 2 – деформирование двери и днища кузова

Time = 0.067999

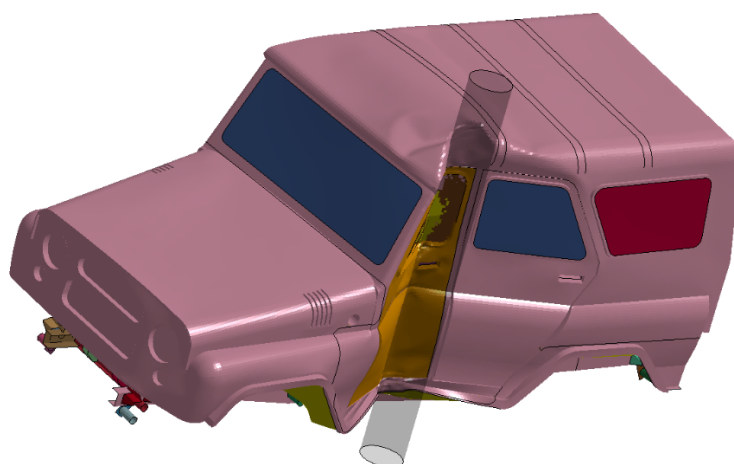


Рис. 6. Фаза 3 – деформирование крыши



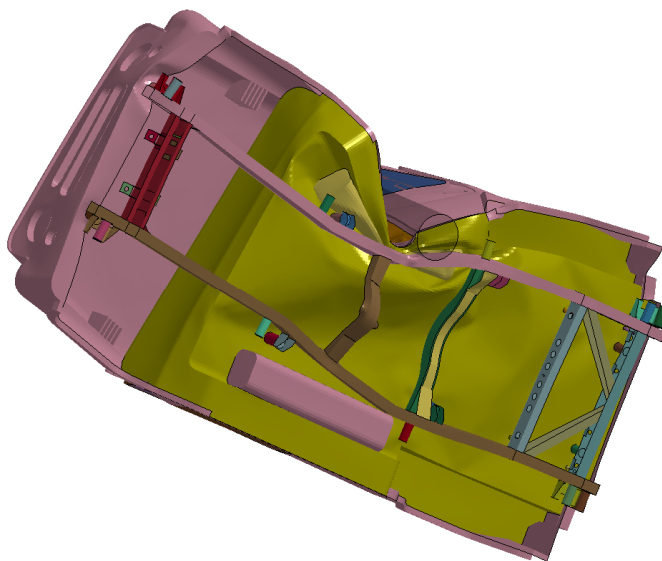


Рис. 7. Фаза 4 – деформирование лонжерона рамы

Time = 0.3

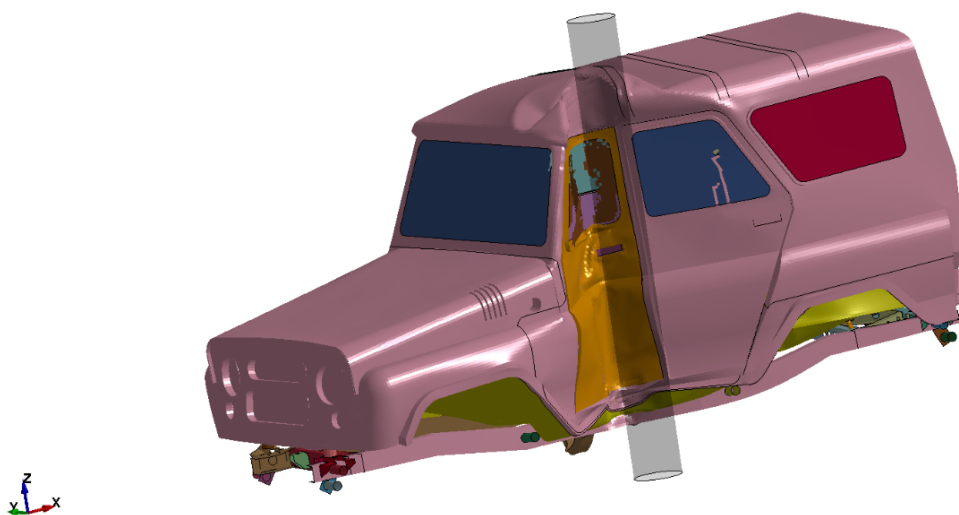


Рис. 8. Фаза 5 – упругий отскок

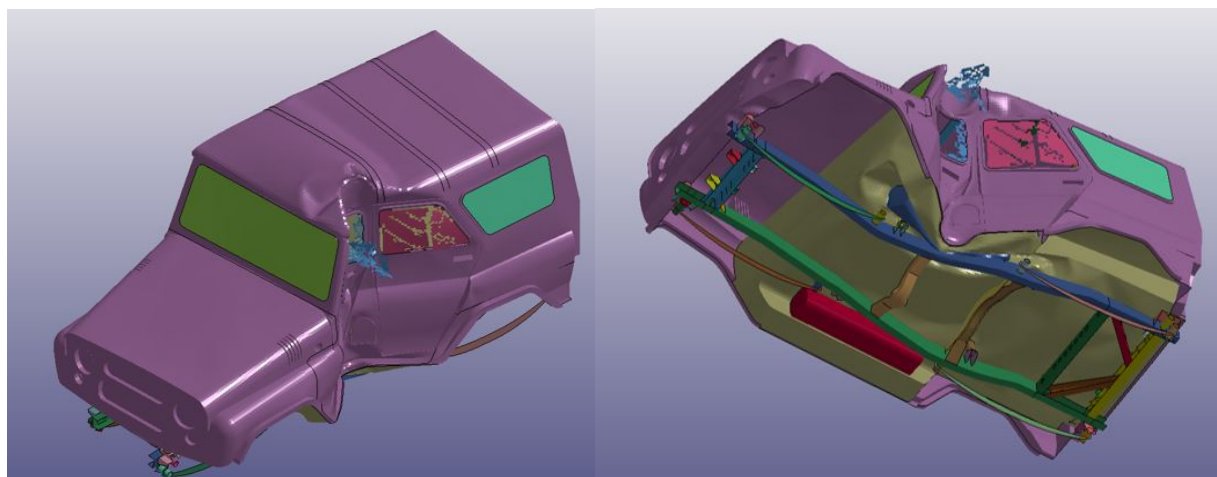


Рис. 9. Деформированное состояние исходного варианта кузова

Расчет и конструирование

Деформирование кузова происходит в основном в области порога и нижних частей передней и задней дверей.

Ввиду существенных деформаций кузова при ударе о столб рассмотрим процесс деформирования подробнее и выделим 5 последовательных фаз:

1. Контакт порога как наиболее выступающего по отношению к столбу элемента (интервал времени 0...0,004 с, см. рис. 4).

2. Фаза деформирования двери и днища кузова (интервал 0,004...0,02 с, см. рис. 5).

3. Фаза подключения крыши (интервал 0,02...0,068 с, см. рис. 6).

4. Фаза подключения лонжерона рамы (интервал 0,068...0,132 с, см. рис. 7).

5. Фаза упругого отскока (интервал 0,132...0,3 с, см. рис. 8).

Элементы кузова, деформирующиеся при ударе по основной составляющей деформации, можно условно разделить на две группы по ориентации к вертикальной оси столба:

I) элементы, ориентированные вдоль оси;

II) элементы, ориентированные ортогонально к оси столба.

Если рассматривать элементы кузова: порог, дверь, потолок, днище и раму, то их разделение по группам приведено в табл. 4.

Ориентация элементов кузова по группам

Таблица 4

Группа	Порог	Дверь	Потолок	Пол	Рама
I	X	X	X		X
II			X	X	

Анализируя картины деформированного состояния и величины деформаций, видим, что наиболее опасным режимом нагружения является удар о столб, поэтому дальнейшие исследования будут посвящены именно данному режиму нагружения.

Порог представляет собой тонкостенную оболочку, усиленную внутри зигзагообразной пластиной, подкрепленную снизу днищем, характер деформирования порога меняется от изгиба в фазе I до смятия на всех последующих фазах. Дверь работает в большей степени на изгиб на протяжении всего соударения. Потолок имеет боковую часть, подвергающуюся изгибу, и верхнюю часть, теряющую устойчивость от внецентренного сжатия и сминаемую в гофр. Пол работает аналогично верхней части потолка, теряет устойчивость от внецентренного сжатия и сминается в гофр. У рамы работает один продольный лонжерон, ближайший к столбу, и поперечина, оба элемента подвергаются изгибу.

Картина деформированного состояния кузова автомобиля после удара о столб и график распределения энергии представлены на рис. 9, 10.

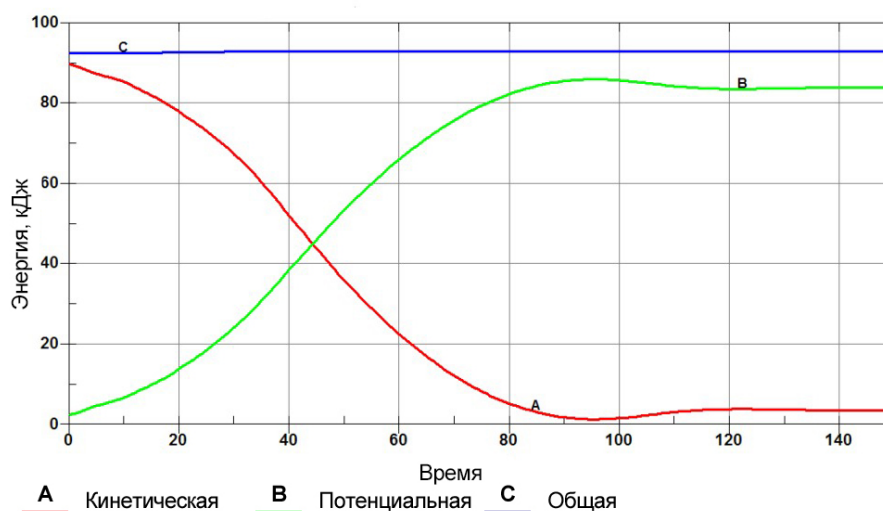


Рис. 10. График распределения энергий исходной конструкции

Анализ результатов показал, что кузов легкового автомобиля деформировался значительно и жизненное пространство нарушено. Дверь и порог автомобиля существенно деформировались и претерпели излом, а также дверь автомобиля существенно внедряется в салон. Порог изгибается внутрь, собирая при этом пол в складки, и из-за этого передняя и задняя части автомобиля стягиваются навстречу друг другу. Листы крыши значительно изогнулись и потеряли устойчивость. Лонжерон рамы входит в контакт со столбом и начинает изгибаться. На основании анализа можно сделать вывод о том, что в дополнительном исследовании и усилении нуждаются порог, дверь, крыша, рама и пол.

На основании проведённого обзора выявлено, что одним из наиболее эффективных способов повышения жёсткости и энергоёмкости является использование пенонаполнителей, поэтому в данной работе будет проведено исследование усиления основных силовых элементов кузова автомобиля с помощью пеноалюминия.

Исследование влияния заполнения пеной порога автомобиля на энергоёмкость конструкции

Анализ деформированного состояния кузова автомобиля показал, что порог – один из первых силовых элементов конструкции, который начинает взаимодействовать со столбом и при этом сильно деформируется. Графики распределения (рис. 11) энергий показывают, что в момент контакта порога со столбом происходит падение кинетической и возрастание потенциальной энергий. Это говорит о том, что порог оказывает существенное влияние на энергоёмкость кузова и нуждается в дополнительном усилении.

В качестве пенонаполнения используется пеноалюминий плотностью 800 кг/м^3 с описанием моделью Дешпенда–Флека.

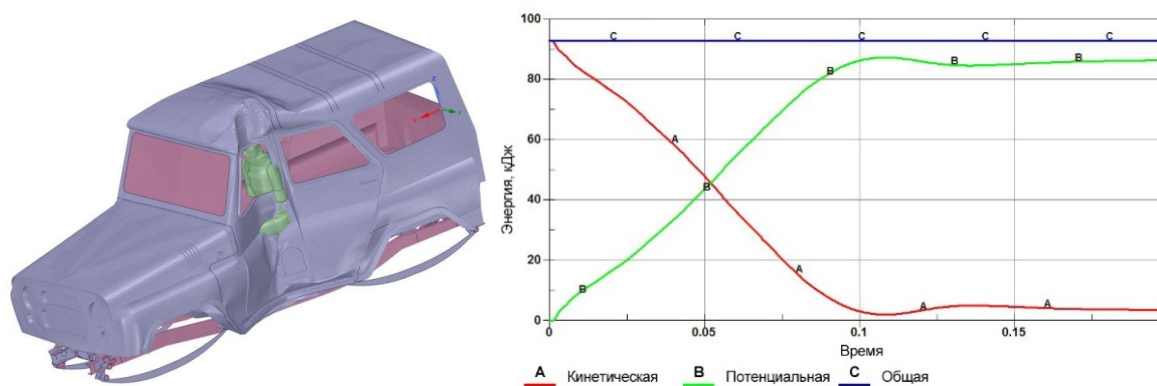


Рис. 11. Результаты расчёта: а – деформированное состояние кузова с пеноалюминием в пороге; б – график распределения энергий конструкции

Анализ деформированного состояния показывает, что кузов деформируется и необходимое остаточное жизненное пространство не обеспечивается. Но при этом видно, что усиление порога с использованием пеноалюминия позволяет повысить энергоёмкость кузова на 20 %. Масса автомобиля при этом возрастает на 3,2 кг. Следовательно, можно сделать вывод о том, что порог оказывает значительное влияние на энергоёмкость кузова автомобиля.

Исследование влияния заполнения пеной стойки кузова на энергоёмкость конструкции

Боковая стойка имеет важное значение в защите пассажира при боковом столкновении. Обычно стойка содержит усилители для повышения жесткости и прочности, чтобы противостоять деформациям при боковом ударе или разрушению крыши. Боковая стойка – это элемент, расположенный между передней и задней дверями кузова. Она содержит электропроводку и точки крепления ремней безопасности, а также является связующим элементом крыши и порога автомобиля и участвует в процессе удара. Предметом исследования в данной части статьи является боковая стойка, для которой будет выполнено усиление с использованием пенонаполнения и оценена энергоёмкость.

Расчет и конструирование

На рис. 12 представлены картины деформированного состояния и графики энергий.

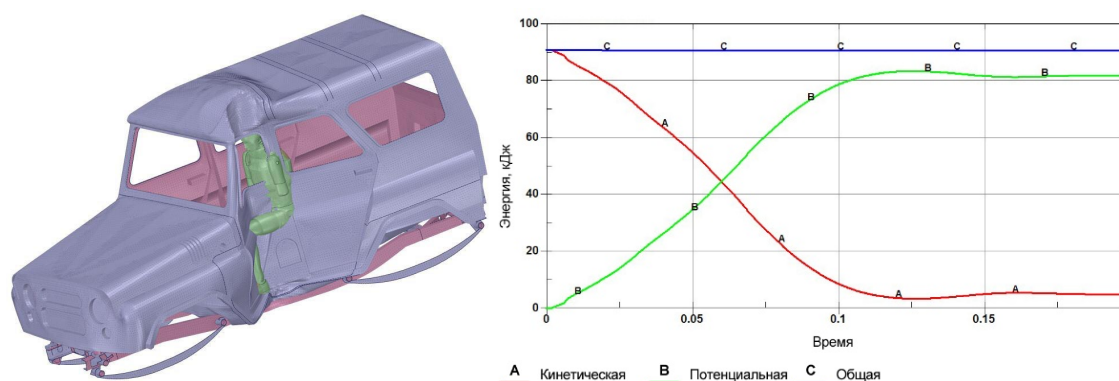


Рис. 12. Результаты расчёта: а – деформированное состояние кузова; б – график распределения энергий конструкции

Кузов автомобиля сильно деформировался, жизненное пространство не обеспечивается, а энергоёмкость конструкции с использованием пенонаполнения увеличилась всего на 1 % по сравнению с исходным вариантом конструкции. Масса конструкции увеличилась на 10 кг. Можно сделать вывод о том, что боковая стойка практически не оказывает влияние на энергоёмкость конструкции при боковом ударе о столб.

Исследование влияния заполнения пеной крыши автомобиля на энергоёмкость конструкции

Анализ картины деформированного состояния кузова автомобиля показал, что крыша, как и порог, является одним из первых силовых элементов конструкции, который начинает взаимодействовать со столбом, а также оказывает значительное влияние на снижение кинетической энергии и при этом сильно деформируется. Из анализа видно, что крыша складывается и теряет устойчивость, поэтому её энергоёмкость резко уменьшается.

На рис. 13 представлены картины деформированного состояния и графики распределения энергий кузова автомобиля с пеноалюминием в крыше.

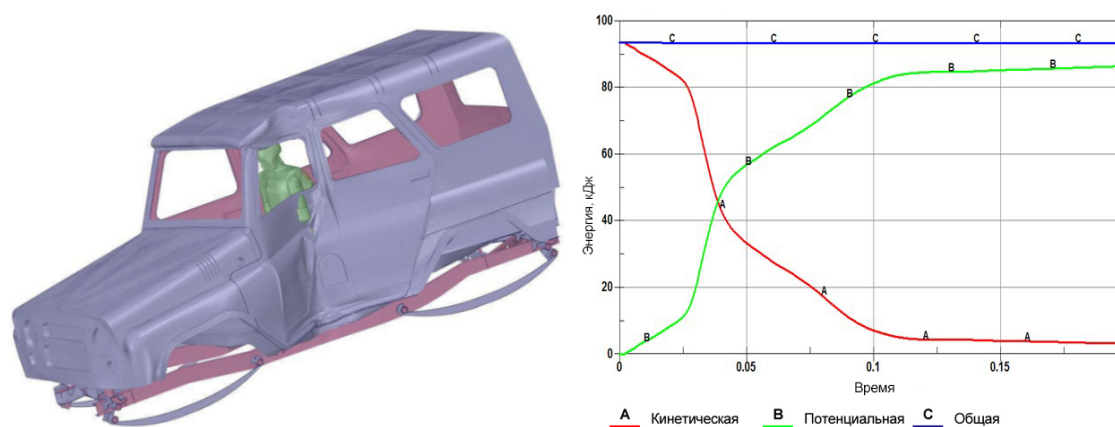


Рис. 13. Результаты расчёта: а – деформированное состояние кузова с запененной крышей; б – график распределения энергий конструкции

Анализируя результаты расчёта, видим, что кузов автомобиля сильно деформировался, жизненное пространство не обеспечивается, но при этом энергоёмкость конструкции с использованием пенонаполнения увеличилась на 10 % по сравнению с исходным вариантом конструкции. Усиление крыши помогло предотвратить такие эффекты, как ее складывание и потеря устойчивости. Масса конструкции увеличилась на 94 кг. Следовательно, усиление крыши оказывает существенное влияние на энергоёмкость при боковом ударе о столб и правильное усиление крыши

позволит уменьшить энергию, поглощаемую боковой стойкой и дверью, и тем самым уменьшить их внедрение в салон. Но помимо этого необходимо будет провести оптимизацию крыши с целью уменьшения её массы.

Исследование влияния заполнения пеной двери автомобиля на энергоёмкость конструкции

Обзор исследований показал, что дверь автомобиля является одним из ключевых элементов кузова, который оказывает существенное влияние на общую жёсткость конструкции при боковом ударе барьером [17, 18].

Анализ зарубежной литературы показал, что дверь автомобиля усиливают различными способами, а именно с использованием пенонаполнения, усилением балками различной формы и изготовленными из разных материалов [19, 20]. Выбор типа усиления зависит от конструктивных особенностей конструкции кузова автомобиля.

Анализ картин деформированного состояния кузова автомобиля при ударе о столб показал, что дверь является вторым по счету силовым элементом, который входит в контакт со столбом, но при этом изменений на графике энергий практически не происходит, соответственно, это говорит о том, что исходная конструкция двери не оказывает значительного влияния на энергоёмкость кузова в целом, поэтому необходимо усилить конструкцию двери пенонаполнителем и исследовать его влияние на энергоёмкость.

На рис. 14 представлены картины деформированного состояния и графики распределения энергий кузова автомобиля с пеноалюминием в крыше.

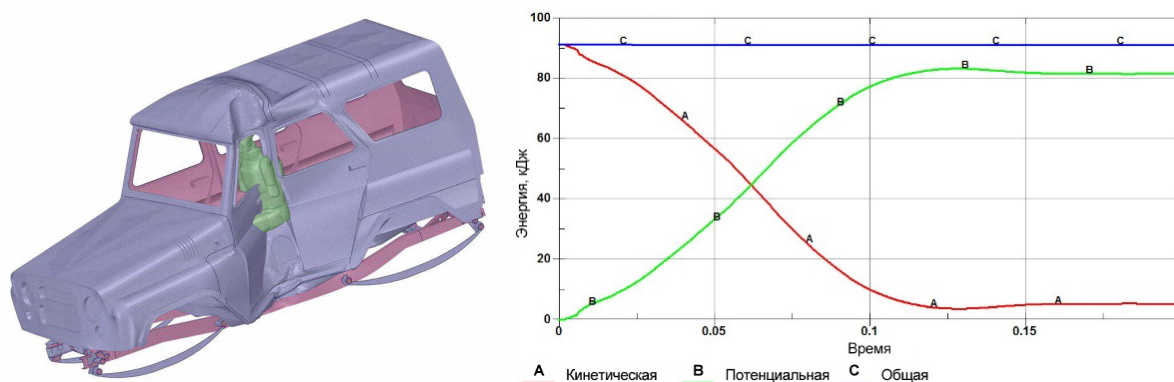


Рис. 14. Результаты расчёта: а – деформированное состояние кузова с запененной дверью; б – график распределения энергий конструкции

Кузов автомобиля сильно деформировался, жизненное пространство не обеспечивается и энергоёмкость конструкции с использованием пенонаполнения в двери увеличилась на 2 %, по сравнению с исходным вариантом конструкции. Дверь, крыша и порог автомобиля существенно изогнулись и проникли в салон автомобиля. Масса конструкции увеличилась на 24 кг. Следовательно, усиление двери пеноалюминием практически не оказывает влияния на энергоёмкость при боковом ударе о столб, но большое количество исследований показывают, что дверь оказывает существенное влияние на энергоёмкость кузова при боковом ударе, поэтому необходимы дополнительные исследования вариантов усиления двери.

Исследование влияния рамы автомобиля на энергоёмкость конструкции

В настоящее время концепция кузова на раме активно используется в грузопассажирских автомобилях. Рама представляет собой два лонжерона, которые соединены между собой поперечинами различной формы. Силовые элементы рамы помогают обеспечивать конструкции кузова автомобиля сопротивлением боковым воздействиям и увеличивают жёсткость рамы при кручении. При моделировании необходимо обратить внимание на элементы крепления кузова к раме. Исследования показали, что опоры воспринимают малую часть поглощённой энергии при ударных нагрузках, поэтому их следует моделировать как жёсткие [14].

Расчет и конструирование

В данном разделе статьи проведём оценку влияния усиления лонжеронов рамы автомобиля, которые были расширены до максимально возможного приближения к порогу, пенонаполнителем, на энергоёмкость конструкции в целом (рис. 15).

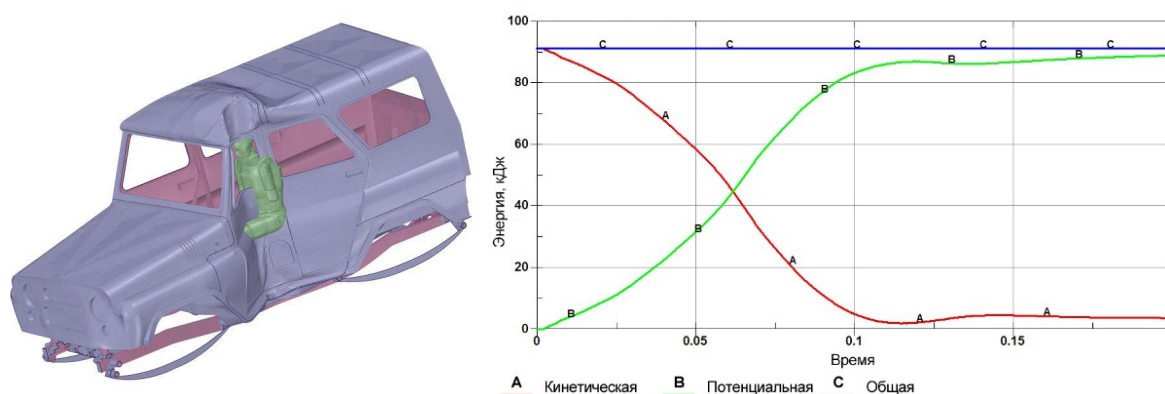


Рис. 15. Результаты расчёта: а – деформированное состояние кузова с запененной рамой; б – график распределения энергий конструкции

Результаты расчета показали, что кузов автомобиля сильно деформировался, жизненное пространство не обеспечивается, но при этом энергоёмкость конструкции с использованием пенонаполнения в лонжеронах рамы увеличилась на 11 % по сравнению с исходным вариантом конструкции. Следовательно, усиление лонжеронов рамы оказывает влияние на энергоёмкость при боковом ударе о столб, но это приводит к увеличению массы всей конструкции на 34 кг.

Анализируя влияние усиления каждого элемента конструкции в отдельности, можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на энергоёмкость конструкции кузова автомобиля оказывают порог, крыша и рама автомобиля, но при этом обеспечить необходимое жизненное пространство не удалось, следовательно, необходимо выполнить исследование по совместному усилению двух элементов конструкции.

В качестве двух усиливающих элементов выберем порог и крышу автомобиля, так как эти два элемента первыми вступают в контакт со столбом при ударе и оказывают существенное влияние на энергоёмкость при их усилении отдельно друг от друга (рис. 16).

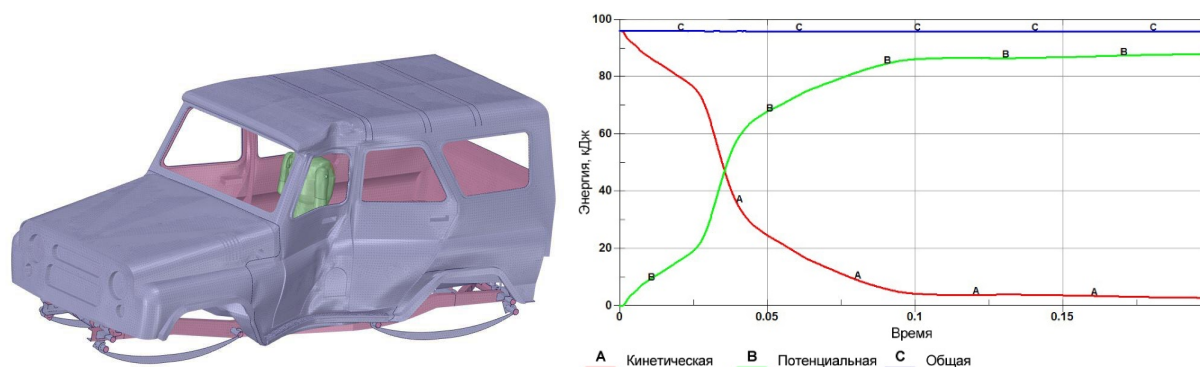


Рис. 16. Результаты расчёта: а – деформированное состояние кузова с запененными порогом и крышей; б – график распределения энергий конструкции

Анализируя результаты расчёта, можно сделать выводы о том, что кузов автомобиля уже в меньшей мере деформируется и удаётся обеспечить необходимое жизненное пространство с минимальным запасом. При совместном усилении порога и крыши автомобиля энергоёмкость конструкции увеличилась на 37 %. Масса автомобиля возрастает на 97,5 кг, следовательно, необходимы дополнительные исследования по оптимизации крыши и порога автомобиля с целью сохранения жёсткости и уменьшения их массы. На рис. 17 для наглядности представлены графики распределения энергий исходной и усиленной конструкций.

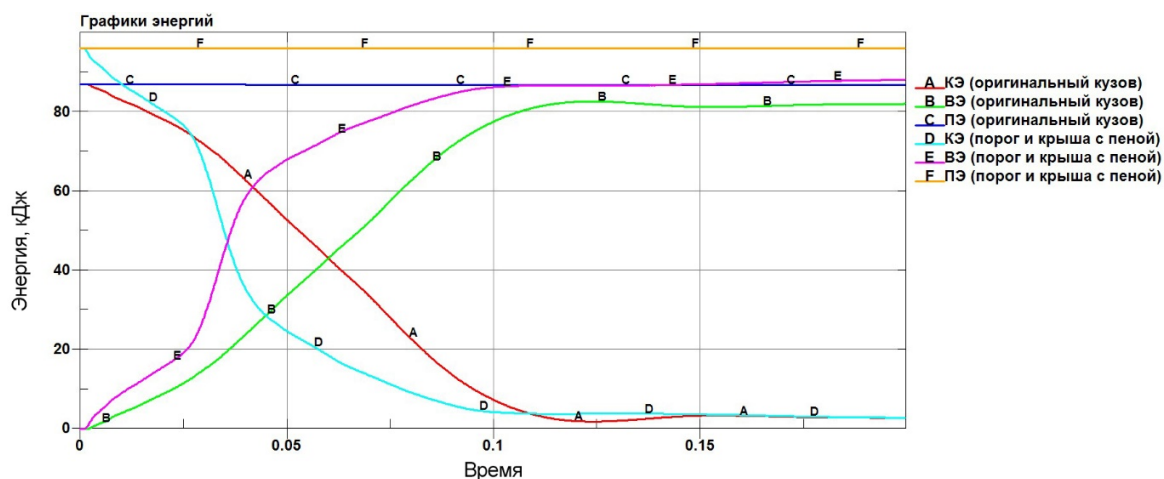


Рис. 17. График распределения энергий исходной и усиленной конструкций

Момент удара о столб (время около 0,002 с) определяет четко выраженное падение кинетической и возрастание потенциальной энергий, второй момент – подключение в контакт двери (время около 0,01 с) практически не отражается на энергиях, что свидетельствует о незначительном, по сравнению с порогом, влиянии двери. Третий момент, подключение в контакт усиленной крыши (0,024 с), вызывает значительное изменение углов наклона кривых кинетической и потенциальной энергий, что является признаком значительной жесткости усиленной пеной крыши. Подключения лонжерона рамы не происходит.

Выводы

1. Деформации элементов конструкции кузова автомобиля при боковом ударе о столб являются значительными и нуждаются в детальном исследовании, так как они существенно отличаются от обычных столкновений с барьером (деформация больше практически в 2 раза).

2. Порог автомобиля является важным силовым элементом кузова при боковом ударе, и его усиление пеной позволяет повысить энергоёмкость кузова на 20 %, и при этом масса увеличилась на 3,2 кг.

3. Усиление пеноалюминием двери и боковой стойки почти не оказывает влияния на энергоёмкость конструкции при боковом ударе о столб (до 2 %), но большое количество исследований показывают, что дверь оказывает существенное влияние на энергоёмкость кузова при боковом ударе, поэтому необходимо дополнительное исследование вариантов усиления двери.

4. Расширение и усиление лонжеронов рамы с помощью пеноалюминия увеличивает энергоёмкость конструкции на 11 %, но при этом масса автомобиля увеличивается на 34 кг.

5. Усиление пеноалюминием крыши автомобиля оказало влияние на энергоёмкость конструкции (увеличение на 10 %), но при этом масса автомобиля возросла на 94 кг.

6. Порог и крыша автомобиля являются наиболее важными компонентами кузова автомобиля в случае бокового удара о столб. Совместное усиление данных силовых элементов позволило обеспечить необходимое жизненное пространство с минимальным запасом и увеличить энергоёмкость конструкции на 37 %. При этом масса автомобиля увеличилась на 97,5 кг. Это говорит о том, что в дальнейшем необходимо провести оптимизацию данных элементов конструкции с целью уменьшения их массы, но с сохранением необходимой прочности.

7. Стоит отметить, что полная энергия складывается из кинетической, потенциальной, энергии «песочных часов» и энергии скольжения. На графиках не приведены энергии «песочных часов» и энергии скольжения, поэтому суммарная энергия при деформировании автомобиля не остается постоянной. Погрешность составляет 5 %, что вполне приемлемо.

Литература

1. Side structure sensitivity to passenger car crashworthiness during pole side impact analysis of passenger car side / D. Guang, W. Dazhi, Z. Jinhuan, H. Shilin // *Tsinghua Sci Technol.* – 2007. – Vol. 12 – P. 290–295.

2. Njuguna, J. *The Application of Energy Absorbing Structures on Side Impact Protection Systems* / J. Njuguna // *International Journal of Computer Applications in Technology (IJCAT)*. – 2011. – Vol. 40, no. 4. – P. 208–217.
3. *Crashworthiness and lightweight optimization to applied multiple materials and foam-filled front end structure of auto-body* / Zhaokai Li, Qiang Yu, Xuan Zhao et al. // *Adv. Mech. Eng.* – 2017. – № 9 (8). – P. 1–21. DOI: 10.1177/1687814017702806.
4. *A study of occupant ejection mitigation in side impact crashes* / J. Dix, K. Sagawa, L. Sahare et al. // *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems*. – 2011. – Vol. 4 (1). – P. 91–99.
5. Cernicchi, A. *Virtual modeling of safety helmets: Practical problems* / A. Cernicchi, U. Galvanetto, L. Lannucci // *Int. J. Crashworthiness*. – 2008. – Vol. 13(4). – P. 451–467. DOI:10.180/13588260802055460.
6. Cazzola, G.J. *Study of the bending response of metal foam-filled beams applied to enhance the rollover behavior of coach structures* / G.J. Cazzola, E.A. Fazio, F. Aparicio Izquierdo // *Int. J. Crashworthiness*. – 2013. – Vol. 18(6) – P. 620–632. DOI:10.1080/13588265.2013.831516.
7. Gupta, S. *Using CAE to evaluate a structural foam design for increasing roof strength* / S. Gupta. – *European LS-DYNA Users Conference*. – Strasbourg, 2011. – 12 p.
8. Droste, A. *Crash performance increase with structural BETAFOAM* / A. Droste, J. Rottger // *LS-DYNA Anwenderforum*. – Frankenthal, 2007.
9. Paulino, M. *An energy absorption performance index for cellular materials – development of a side-impact cork padding* / M. Paulino, F. Teixeira-Dias // *Int. J. Crashworthiness*. – 2011. – Vol. 16(2) – P. 135–153. DOI:10.1080/13588265.2010.536688.
10. Goncharov, R.B. *On criteria of selecting filler material parameters in supporting thin-walled frame-type structures in relation to the tasks of cars and tractors passive safety* / R.B. Goncharov, V.N. Zuzov // *Engineering Journal: Science and Innovation*. – 2019. – Iss. 4. – <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-4-1865>.
11. Правила ЕЭК ООН № 95 (документ E/ECE/324/Rev.1/Add.94/Rev.2 – E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.94/Rev.2). *Единообразные требования, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении защиты водителя и пассажиров в случае бокового столкновения*. ООН, 2011. – 99 с.
12. Правила ЕЭК ООН № 135 (документ E/ECE/324/Rev.2/Add.134/Rev.1 – E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.134/Rev.1). *Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении их характеристик при боковом ударе о столб (БВС)*. ООН, 2016. – 48 с.
13. Шабан, Б.А. *Особенности моделирования каркасных элементов кузовов и кабин автомобилей при исследовании пассивной безопасности* / Б.А. Шабан, В.Н. Зузов // *Наука и образование: научное издание*. – 2012. – № 11. – С. 7–31 DOI: 10.7463/1112.0486675.
14. Шабан, Б.А. *Особенности построения конечно-элементных моделей кабин для исследования пассивной безопасности при ударе в соответствии с правилами ЕЭК ООН № 29* / Б.А. Шабан, В.Н. Зузов // *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.* – 2013. – № 3. – С. 129–156. DOI: 10.7463/0313.0542301.
15. *Основы разработки конечно-элементных моделей кузовных конструкций автотранспортных средств. Расчеты на безопасность и прочность.* / Л.Н. Орлов [и др.]. – Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т. им. П.Е. Алексеева, 2014. – 143 с.
16. Deshpande, V.S. *Isotropic models for metallic foams* / V.S. Deshpande, N.A. Fleck // *J. Mech. Phys. Solids*. – 2000. – No. 48. – P. 1253–1283.
17. Vijayan, P. *Design and impact analysis of light weight door panel of the car* / P. Vijayan // *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences And Engineering (IJRRASE)*. – 2016. – Vol 8, no.1. – P. 164–169.
18. Long, C.R. *Analysis of a car door subjected to side pole impact* / C.R. Long, S. Chung Kim Yuen, G.N. Nurick // *Lat. Am. j. solids struct.* – 2019. – Vol. 16, no. 8. DOI: 10.1590/1679-78255753.
19. Ghadianlou, A. *Crashworthiness design of vehicle side door beams under low-speed pole side impacts* / A. Ghadianlou, S. Abdullah // *Thin-Walled Struct.* – 2013. – Vol. 6. – P. 25–33.
20. Djojodihardjo, H. *Modeling, Analysis and Comparative Study of Side Impact Beam* / H. Djojodihardjo, Soo Lin Khai // *International Journal of Engineering and Innovative Technology (JEIT)*. – 2013. – Vol. 3, iss. 5.

Зузов Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Колесные машины», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва, zuzvalery@rambler.ru.

Сулегин Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры «Колесные машины», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва, d_sulegin@mail.ru.

Поступила в редакцию 3 декабря 2020 г.

DOI: 10.14529/engin200403

AN INVESTIGATION OF THE EFFECT ON THE ENERGY INTENSITY OF THE MAIN POWER ELEMENTS OF THE CAR BODY IN THE SIDE IMPACT ZONE

V.N. Zuzov, zuzvalery@rambler.ru,

D.A. Sulegin, d_sulegin@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

The urgent problem today is to ensure passive vehicle safety in a side impact. The paper presents the developed rational finite element models (FEM) of the body and pillar, on which the results are obtained with acceptable accuracy and minimum solving time when using the LS-DYNA solver. The behavior of the body and frame material is described using the Johnson–Cook model, which takes into account the nonlinearity of the material and the effect of the rate of loading. The behavior of foam aluminum is described using the Deshpand–Fleck model. The phases of deformation of the body and the nature of deformation of body elements were analyzed. Based on the results of the computations, it was found that the most dangerous loading mode in a side impact is the pole impact. Analysis of the picture of the deformed state during the pole impact showed that threshold, a door, a roof, floor and a frame are significantly deformed during and need additional research and reinforcement. Therefore, it was proposed to reinforce the body structure elements with foam aluminum in this paper. The analysis revealed, that complex reinforcement of body elements is necessary to meet the requirements of passive safety, but it entails a significant increase in body weight. Therefore, it is necessary to carry out with further topological and parametric optimization of the load-bearing elements of the body.

Keywords: a body, a pillar, passive safety, foam aluminum, a finite element model, energy intensity, a side impact.

References

1. Guang D, Dazhi W, Jinhuan Z, Shilin H. Side structure sensitivity to passenger car crashworthiness during pole side impact analysis of passenger car side. *Tsinghua Sci Technol*, 2007, vol. 12, pp. 290–295.
2. Njuguna J. The Application of Energy Absorbing Structures on Side Impact Protection Systems. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 2011, vol. 40, no. 4, pp. 208–217.
3. 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. Mech. Eng.*, 2017, no 9 (8), pp. 1–21, doi: 10.1177/1687814017702806.
4. Dix J., Sagawa K., Sahare L., Hanmound S., Fulk D., Cardinali A. A study of occupant ejection mitigation in side impact crashes. *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems*, 2011, vol. 4 (1), pp. 91–99.
5. Cernicchi A., Galvanetto U., Lannucci L. Virtual Modeling of Safety Helmets: Practical Problems, *Int. J. Crashworthiness*, 2008, vol. 13(4), pp. 451–467, doi:10.180/13588260802055460.
6. Cazzola G.J., Fazio E.A., Izquierdo F. Aparicio Study of the Bending Response of Metal Foam-Filled Beams Applied to Enhance the Rollover Behavior of Coach Structures, *Int. J. Crashworthiness*, 2013, vol. 18(6), pp. 620–632, doi:10.1080/13588265.2013.831516.

7. Gupta S. Using CAE to Evaluate a Structural Foam Design for Increasing Roof Strength, European LS-DYNA Users Conference, Strasbourg, 2011, 12 p.
8. Droste A., Rottger J. Crash Performance Increase with Structural BETAFOAM, LS-DYNA Anwenderforum, Frankenthal, 2007.
9. Paulino M., Teixeira-Dias F. An energy absorption performance index for cellular materials – development of a side-impact cork padding, *Int. J. Crashworthiness*, 2011, vol. 16(2), pp. 135–153, doi:10.1080/13588265.2010.536688.
10. Goncharov R.B., Zuzov V.N. On criteria of selecting filler material parameters in supporting thin-walled frame-type structures in relation to the tasks of cars and tractors passive safety. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 4. – <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-4-1865>
11. UNECE Regulation № 95 (document E/ECE/324/Rev.1/Add.94/Rev.2–E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.94/Rev.2). Uniform requirements for the approval of vehicles regarding the protection of occupants in a side impact. UN, 2011. 99 p.
12. UNECE Regulation No. 135 (document E/ECE/324/Rev.2/Add.134/Rev.1–E/ECE/TRANS/505/Rev.2 / Add.134 / Rev.1). Uniform provisions for the approval of vehicles regarding their characteristics in a pole side impact (PSI). UN, 2016. 48 p.
13. Shaban B.A., Zuzov V.N. [Features of Modeling of Frame Elements of Car Bodies and Cabins in the Study of Passive Safety]. *Science and education: scientific publication*, 2012, no. 11. DOI: 10.7463/1112.0486675 (in Russ.)
14. Shaban B.A., Zuzov V.N. [Features of the Construction of Finite - Element Models of Cabins for the Study of Passive Safety on Impact in Accordance with UNECE Regulation №29]. *Science and Education. Bauman MSTU. Electron. Journal*, 2013. No 3. DOI: 10.7463 / 0313.0542301 (in Russ.)
15. Orlov L.N. [and others] *Osnovy razrabotki konechno-elementnykh modeley kuzovnykh konstruktivnykh avtotransportnykh sredstv. Raschety na bezopasnost' i prochnost'*. [Basis for developing finite element models of vehicle body structures. Calculations for safety and strength]. Nizhny Novgorod, NNSTU, 2014, 143 p.
16. Deshpande V.S., Fleck N.A. Isotropic Models for Metallic Foams. *J. Mech. Phys. Solids*, 2000, no 48, pp. 1253–1283.
17. Vijayan P. Design and impact analysis of light weight door panel of the car. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences And Engineering (IJRRASE)*, 2016, vol. 8., no. 1., pp. 164–169.
18. Long C.R., Yuen S. Chung Kim, Nurick G.N. Analysis of a Car Door Subjected to Side Pole Impact., *Lat. Am. j. solids struct* 2019, vol. 16, n. 8.
19. Ghadianlou A., Abdullah S. Crashworthiness design of vehicle side door beams under low-speed pole side impacts. *Thin-Walled Struct.*, 2013, vol. 67, pp. 25–33.
20. H. Djojodihardjo, S. L. Khai Modeling, Analysis and Comparative Study of Side Impact Beam. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2013, vol. 3, iss. 5.

Received 3 December 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Зузов, В.Н. Исследование влияния на энергоёмкость основных силовых элементов кузова автомобиля в зоне бокового удара / В.Н. Зузов, Д.А. Сулегин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 20–34. DOI: 10.14529/engin200403

FOR CITATION

Zuzov V.N., Sulegin D.A. An Investigation of the Effect on the Energy Intensity of the Main Power Elements of the Car Body In the Side Impact Zone. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 20–34. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin200403
