

# ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КРЫШИ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРИ БОКОВОМ УДАРЕ

Сулегин Д.А., д.т.н. Зузов В.Н.

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)», Москва, Россия  
d\_sulegin@mail.ru

*В данной статье рассматривались основные вопросы поиска оптимальных вариантов усиления крыши кузова автомобиля на базе топологической оптимизации с целью обеспечения требований пассивной безопасности при минимуме массы. Методом достижения поставленной цели являлось математическое моделирование с использованием модулей топологической оптимизации (Topology Optimization) программного комплекса ANSYS и явной динамики LS-Dyna. Для проверки эффективности усиления в качестве режима нагружения был выбран боковой удар о столб, регламентированный ЕЭК ООН 135 «Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении их характеристик при боковом ударе о столб». Критерием эффективности принималась энергоемкость кузова, определяемая как отношение энергии системы к остаточной (пластической) деформации на уровне центра двери. На основании топологической оптимизации были получены два практически равнозначных по эффективности варианта расположения усиливающих элементов. Для наиболее полной оценки влияния параметров были рассмотрены несколько вариантов усиления крыши: расстановка стальных усиливающих элементов; размещение пеноалюминия под крышу; комбинация стальных элементов с заполнением их полостей пеноалюминием. По результатам моделирования была выполнена сравнительная оценка эффективности рассмотренных вариантов усиления. Наиболее эффективными оказались варианты усиления крыши балками швеллерообразного сечения и заполнения их пеной и вариант усиления крыши балками швеллерообразного сечения и диагональными перемычками в них, обуславливающие ее повышение по сравнению с оригинальной конструкцией на 20,88 и 19,94 % соответственно, но при этом масса первого варианта на 42 кг меньше массы второго.*

**Ключевые слова:** пассивная безопасность, топологическая оптимизация, боковой удар, кузов, энергоемкость, крыша.

**Для цитирования:** Сулегин Д.А., Зузов В.Н. Топологическая оптимизация конструкции крыши легкового автомобиля с целью повышения энергоемкости при боковом ударе // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 1 (47). С. 81–88. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-47-1-81-88.

## Введение

Автомобильные аварии являются одной из основных причин роста смертности людей во всем мире. В частности боковой удар является одним из самых серьезных видов аварии в связи с непосредственной близостью водителя и пассажира к месту столкновения. По данным мировой статистики ДТП, почти 60 % смертей в результате бокового столкновения происходят из-за травм головного мозга. Травма головного мозга в основном возникала из-за проникновения элементов кузова внутрь пассажирского салона. При боковом ударе автомобиля с другим транспортным средством или узким объектом (дерево, столб) ударный объект за-

медляется за счет пластического деформирования и поглощения энергии таких силовых элементов, как двери, пороги, центральная стойка и крыша. Крыша, несмотря на то, что подключается не сначала процесса деформирования, так как не является наиболее выступающим в сторону препятствия элементом, оказывает существенное влияние на деформирование кузова и, как следствие, на величину проникновения внутренней панели двери в салон [1]. Вследствие этого повышение ее жесткости является важной задачей, решение которой позволит повысить уровень пассивной безопасности автомобиля. Крыша, которая усилена только пеноалюминием повышает энергоемкость кузова автомо-

бия на 10 %, но при этом масса автомобиля возрастает на 97 кг, поэтому усиление крыши необходимо проводить с помощью топологической оптимизации [1]. В работе Р.Б. Гончарова, В.Н. Зузова [2] с помощью топологической оптимизации было реализовано оптимальное расположение силовых элементов на задней стенке кабины при ударе маятником и при этом масса кабины увеличилась незначительно. В работе А.А. Французова и других [3] благодаря применению топологической оптимизации была снижена масса звеньев захвата в 1,5 раза по сравнению с первоначальной. Zhaokai Li [4] с помощью топологической оптимизации исследовал способы рационального распределения пеноалюминия в бампере автомобиля для повышения его ударопрочности при фронтальном ударе.

### **Цель исследования**

Цель работы заключается в повышении энергоемкости кузова за счет разработки усиления крыши автомобиля на базе топологической оптимизации с целью удовлетворения требований пассивной безопасности.

### **Методы и средства проведения исследований Топологическая оптимизация крыши**

На первый взгляд может показаться, что крыша в режиме бокового столкновения автомобиля с препятствием типа столб является лишь опорой для двери и принимает косвенное участие в деформировании боковой части кузова. Однако, как это было показано в статье [1], в фазе 3 (рис. 1) крыша подключается в непосредственное восприятие воздействия столба и, следовательно, влияет на общую энергоемкость кузова и проникновения различных элементов кузова в салон. Ввиду того, что пассивная безопасность включает в себя минимизацию продавливания элементов во внутреннее пространство салона, поэтому в данной статье производится оценка влияния различных вариантов усиления крыши на величину продавливания при боковом ударе.

В базовом варианте крыша усилена 3 поперечными лонжеронами корытообразного типа (рис. 2). Вариантами усиления крыши были рассмотрены:

- рациональная расстановка стальных усиливающих элементов;
- размещение пеноалюминия под крышу;

– комбинация стальных элементов с заполнением их полостей пеноалюминием.

Рациональная расстановка усиливающих элементов может быть найдена с использованием оптимизационных подходов [2–7].

Крыша представляет собой листовое штампованное тело, для которого может быть применима топографическая оптимизация, позволяющая получить расположение выштамповок, пуклей и зигов на ней. Альтернативным вариантом является топологическая оптимизация, которая позволяет получить карты псевдоплотностей материала, трактовка которых ведет к формированию расстановки усиливающих элементов.

Существует ряд программных продуктов, реализующих методы оптимизации, наиболее популярными из которых являются Ansys и Altair Inspire. Altair Inspire реализует

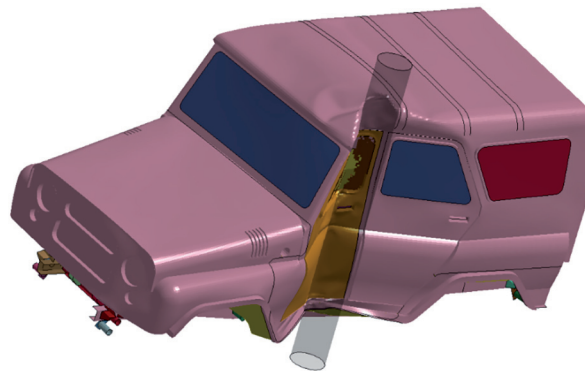


Рис. 1. Фаза 3. Деформирование крыши

*Fig. 1. Phase 3. Roofing deformation*

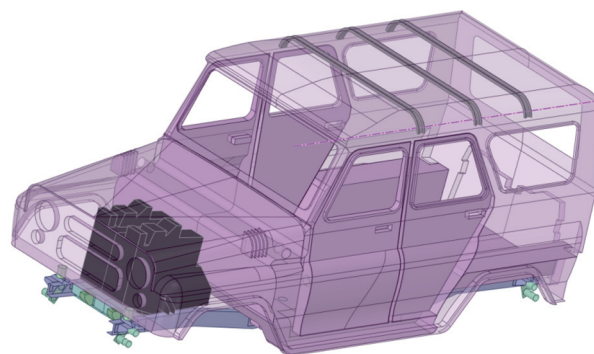


Рис. 2. Усиление крыши в базовом варианте

*Fig. 2. Roofing reinforcement in basic version*

как метод топологической оптимизации, так и топографической, Ansys – только метод топологической оптимизации. Однако формирование выштамповок в Altair Inspire возможно лишь в трех вариантах: двух ортогональных и круговом. Крыша выбранного нами автомобиля (рис. 1) находится при ударе в сложном напряженно-деформированном состоянии, это позволяет предположить, что расположение усиливающих элементов не будет ортогональным, поэтому целесообразно использовать ПК Ansys. Идея метода топологической оптимизации приведена в работе [3], в которой выполнялась оптимизация звеньев захвата тубингов тоннельного экскаватора. Это показывает на универсальность метода топологической оптимизации.

Для выполнения топологической оптимизации необходимо:

- задание массива материала для оптимизации и определение оптимизируемой части;
- формирование расчетной модели;
- определение целевой функции;
- задание ограничений.

Массив материала для оптимизации представлял собой крышу с частями стоек (рис. 3) в двух вариантах: без базовых усиливающих лонжеронов и с ними.

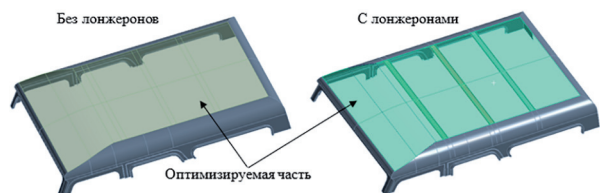


Рис. 3. Массив материала для оптимизации

Fig. 3. Array of material for optimization

Расчетная модель разрабатывалась преимущественно с использованием оболочечных конечных элементов, граничными условиями (ГУ) для которой являлись: закрепление по стойкам и усилие вдоль борта (рис. 4). При проведении оптимизации стойки кузова не учитывались, потому что они могут исказить результаты оптимизации. Нагрузка бралась неполной, так как часть энергии в процессе деформирования была уже затрачена на порог и дверь, потому что эти два силовых элемента первыми вступают в контакт со столбом. Кроме того, единственный краш-тест не позволяет оценить приложение нагрузки

не в месте размещения препятствия, столба, поэтому потребуется ряд расчетов и оптимизации на основании совокупности результатов. Значение нагрузки определялось по графикам распределения энергий, которые представлены в работе [1]. При больших деформациях жесткость и размеры конструкции меняются существенно, что влияет на расчетную схему, однако задачей является минимизация деформаций, поэтому справедливо рассматривать действие произвольной силы, приложенной к недеформированной геометрии.

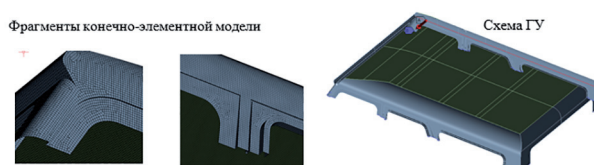


Рис. 4. Конечно-элементная модель и схема граничных условий

Fig. 4. Finite element model and boundary conditions scheme

Целевой функцией являлась максимизация жесткости, ограничением – остаточная масса, равная 50 % от исходной. На рис. 5 представлены результаты оптимизации по вариантам «без лонжеронов» и «с лонжеронами».

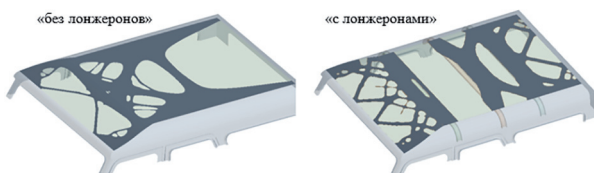


Рис. 5. Результаты топологической оптимизации

Fig. 5. Topological optimization results

В процессе удара автомобиля о столб столб может находиться в любой точке, соответственно, целесообразно усиливать всю крышу, поэтому усилие от столба может прилагаться вдоль всего борта, закрепление выполнено по стойкам в местах их отделения от остальной части.

В результате трактовки карт псевдоплотностей (рис. 6) были разработаны следующие варианты усиления с толщиной стенки 3 мм и высотой 24 мм (размеры соответствуют толщине и высоте базовых лонжеронов). В дальнейшем данные размеры уточнялись с помощью параметрической оптимизации.

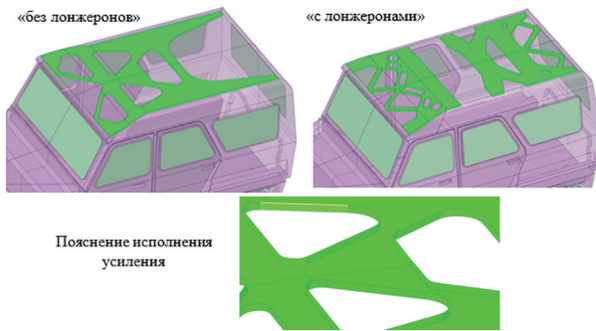


Рис. 6. Варианты усиления по результатам оптимизации

Fig. 6. Reinforcement options based on optimization results

Интерпретация результатов проводилась с учетом технологических возможностей, но это не является основной целью статьи, поэтому способ изготовления и установки усилителей в кузов не рассматривается.

Для проверки эффективности усиления была выполнена проверка в условиях виртуального краш-теста, регламентированных правилами ЕЭК ООН 135 «Единые предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении их характеристик при боковом ударе о столб». Примем следующие обозначения (рис. 7):

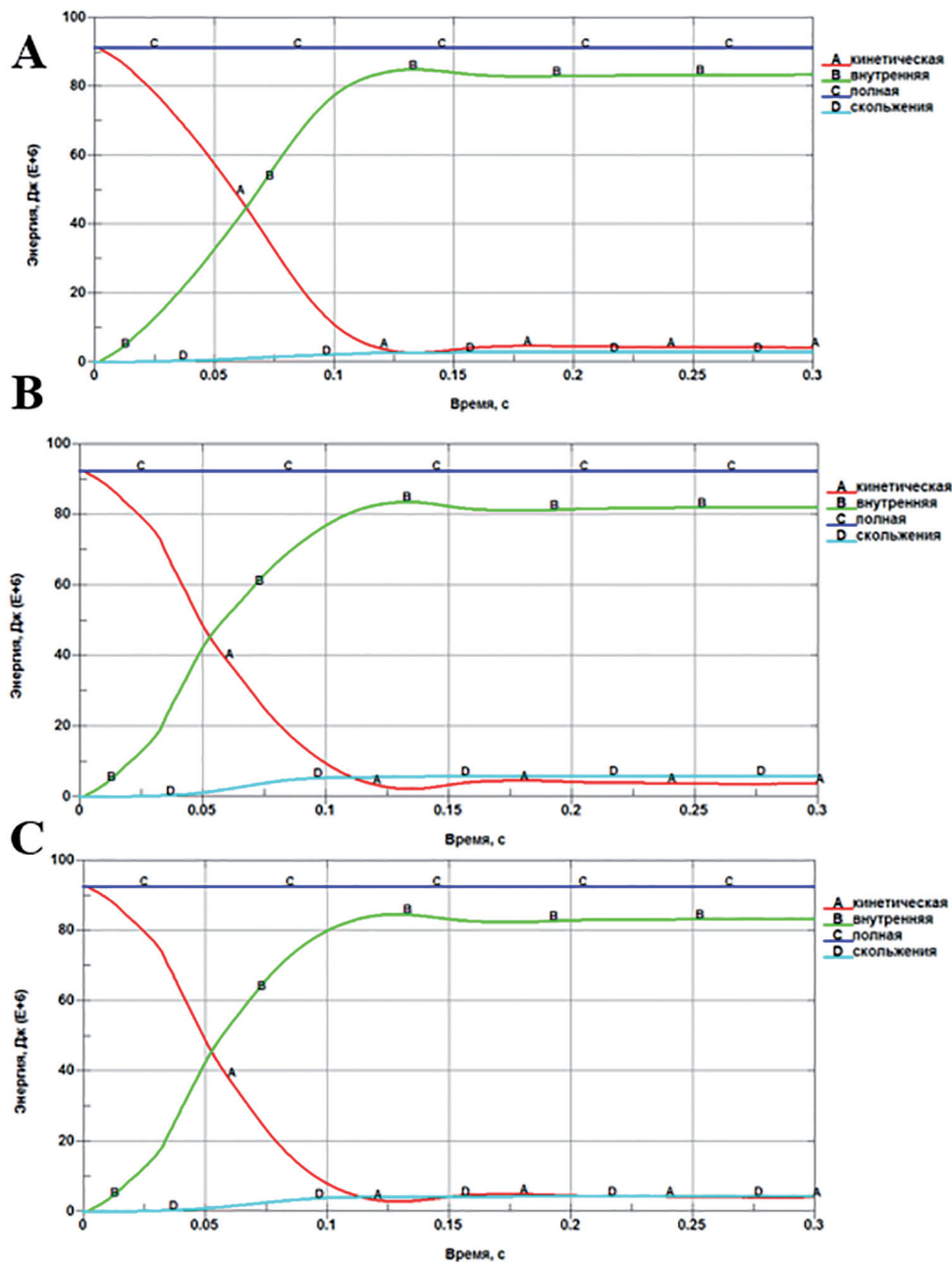


Рис. 7. Энергии процесса удара о столб

Fig. 7. The energies of the process of hitting the pillar

А – кузов в исходном исполнении, без усилителей;

В – вариант после оптимизации без лонжеронов;

С – вариант после оптимизации с лонжеронами.

Корректность решения поставленной задачи проверяется контролем энергий процесса (рис. 7).

Сумма внутренней, кинетической и энергии скольжения должна быть равна полной энергии с величиной погрешности определяемой

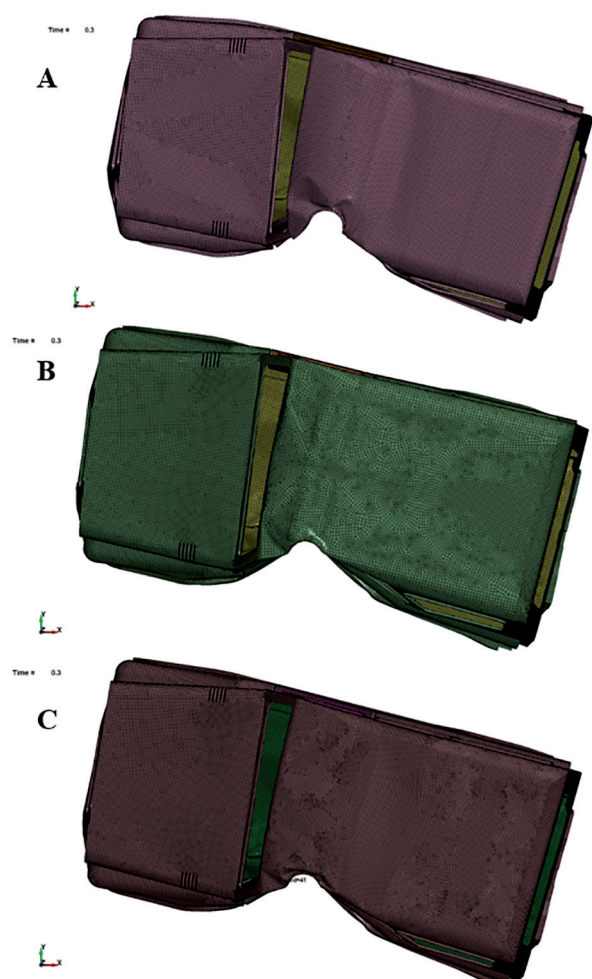


Рис. 8. Деформированное состояние после удара

Fig. 8. Deformed state after impact

энергией песочных часов [8]. На рис. 8 приведены деформированные состояния кузова после удара о столб.

Эффективность вариантов оцениваем по энергоемкости. Энергоемкость определялась как отношение начальной энергии к разности между начальным (при недеформированном состоянии кузова) и конечным (при деформированном состоянии кузова), результаты приведены в таблице 1 и на рис. 9 и 10.

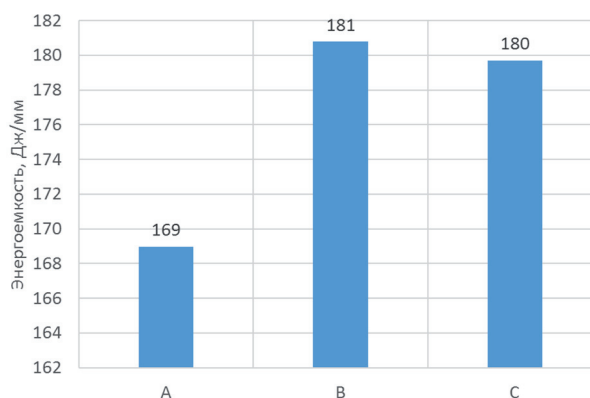


Рис. 9. Энергоемкость различных вариантов кузова

Fig. 9. Energy intensity of different body options

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что вариант усиления В является более эффективным, вследствие чего дальнейшее рассмотрение вариантов усиления будем выполнять на его основе, в качестве дополнительного рассмотрим также вариант размещения усиления из пеноалюминия под крышей.

Такими вариантами являются (рис. 11):

В1 – усиливающий элемент собран из балок швеллерообразного сечения;

В2 – вариант В1 с заполнением полостей усиливающего элемента пеноалюминием;

В3 – вариант В1 с установленными в балках диагональными перемычками;

Д – пеноалюминий под крышей без стальных балок с исходными усиливающими лонжеронами.

Таблица 1

#### Энергоемкость различных вариантов кузова

Table 1. Energy intensity of different body options

Вариант	Начальный размер	Масса, кг	Размер после деформации, мм	Энергоемкость, Дж/мм	Прирост, %
A	1843	–	1302	169	–
B		+26	1332,62	181	6,99
C		+34	1328,2	180	6,36

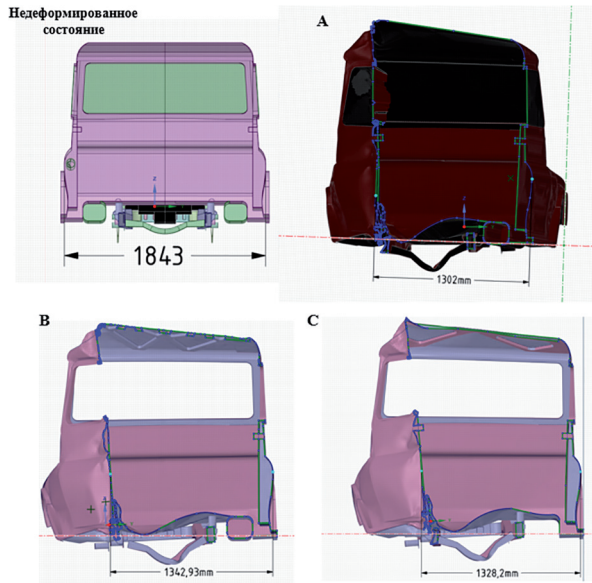


Рис. 10. Пояснение к расчету размера в деформированном состоянии

Fig. 10. Explanation of the calculation of the size in the deformed state

Для описанного ранее краш-теста были выполнены расчеты, в таблице 2 и на рис. 12 приведены расчетные величины энергоемкости, которая определялась как отношение начальной энергии к разности между начальным (при недеформированном состоянии кузова) и конечным (при деформированном состоянии кузова). Деформированное состояние кузова для рассмотренных вариантов представлено на рис. 13.

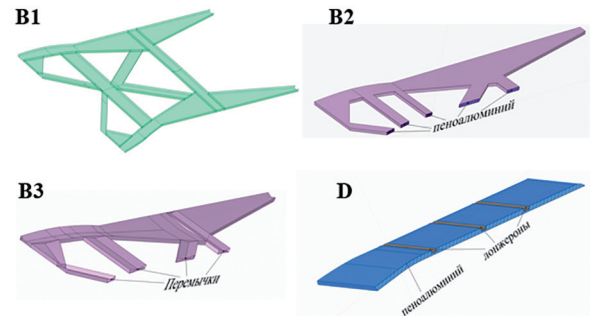


Рис. 11. Варианты усиления крыши (варианты B2, B3 и D в рассеченном состоянии)

Fig. 11. Roofing reinforcement options (options B2, B3 and D in the dissected state)

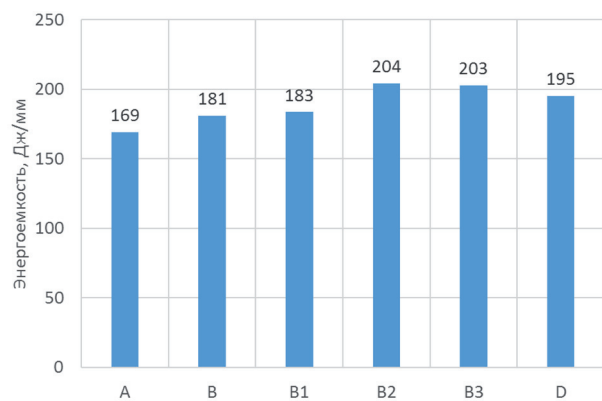


Рис. 12. Энергоемкости вариантов с усиленными крышами

Fig. 12. Energy intensity options with reinforced roofings

Таблица 2

Сравнение эффективности усиления крыши по энергоемкости

Table 2. Comparison of the efficiency of roofing reinforcement in terms of energy intensity

Вариант	Исполнение	Начальный размер	Масса, кг	Размер после деформации, мм	Энергоемкость, Дж/мм	Прирост, %
A	Оригинальная конструкция	1843	–	1302	169	–
B	Усиление по результатам оптимизации		+26	1332,62	181	6,99
B1	По варианту B с балками швеллерообразного сечения		+25	1330,11	180	6,76
B2	По варианту B1 с пеноалюминием		+39	1389,21	204	20,88
B3	По варианту B1 в диагональными перемычками		+81	1379	203	19,94
D	Пеноалюминий по крышей с исходными лонжеронами		+52	1365,3	195	15,36

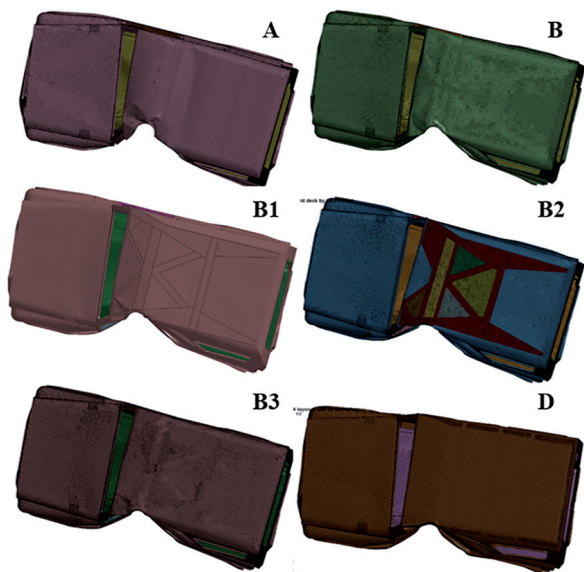


Рис. 13. Деформированное состояние кузова для вариантов А, В1,2,3 и D

Fig. 13. Deformed state of the body for options A, B1,2,3 and D

Анализ результатов позволяет сделать вывод о том, что наиболее эффективными являются варианты В2 и В3, один из них, В2, содержит балочную конструкцию на основе топологической оптимизации с запененными ее полостями, второй, В3, реализован также на основе результатов оптимизации, но доработан установкой диагональных перемычек в балки усиления.

### Выводы

1. В результате моделирования бокового удара о столб кузова с двумя вариантами конструкции крыши (с лонжеронами и без) на основе интерпретации результатов топологической оптимизации получено, что их эффективность практически одинакова и приводит к увеличению энергоемкости на 6,36 и 6,99 % соответственно (таблица 1).

2. Проведенные исследования показали, что наиболее эффективными, с позиции повышения энергоемкости, оказались вариант усиления крыши балками швеллерообразного сечения и заполнения их пеной и вариант усиления крыши балками швеллерообразного сечения и диагональными перемычками в них, обуславливающие ее повышение по сравнению с оригинальной конструкцией на 20,88 и 19,94 % соответственно, но при этом масса первого варианта на 42 кг меньше массы второго.

### Литература

1. Зузов В.Н., Сулегин Д.А. Исследование влияния на энергоемкость основных силовых элементов кузова автомобиля в зоне бокового удара // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2020. Т. 20, № 4. С. 20–34.
2. Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Особенности поиска оптимальных параметров усилителей задней части кабины грузового автомобиля на базе параметрической и топологической оптимизации с целью обеспечения требований по пассивной безопасности по международным правилам получения ее минимальной массы // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2019. № 2 (125). С. 163–170.
3. Французов А.А., Шаповалов Я.И., Вдовин Д.С. Применение метода топологической оптимизации в задачах проектирования грузоподъемной техники // Технические науки. Машиностроение и машиноведение. 2017. № 2(42). С. 99–108.
4. Zhaokai Li. Crashworthiness and lightweight optimization to applied multiple materials and foam-filled front-end structure of auto-body / Li Zhaokai, Yu Qiang, Zhao Xuan, Yu Man, Shi Peilong, Yan Cilei // Adv. Mech. Eng. 2017. № 9 (8). P. 1–21. DOI: 10.1177/1687814017702806.
5. Гончаров Р.Б. Исследование эффективности алгоритмов параметрической оптимизации применительно к процессам ударного воздействия на примере бампера и кабины автомобиля // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. № 4 (709). С. 28–40.
6. Новокшенов А.Д., Марченко П.А., Немов А.С., Боровков А.И. Топологическая и параметрическая оптимизации кронштейна под установку звездного датчика // Вестник Машиностроения. 2017. № 10. С. 22–27.
7. Goel T. A topology optimization tool for LS-DYNA users: LS-OPT/ Topology / T. Goel, W. Roux, N. Stander // 7-th European LS-DYNA Conference, 2009.
8. R. Ouadday, A. Marouene, G. Morada, A. Kaabi, R. Boukhili, A. Vadean Experimental and numerical investigation on the impact behavior of dual-core composite sandwich panels designed for hydraulic turbine applications // Composite Structures. 2018. № 185. С. 254–263.

### References

1. Zuzov V.N., Sulegin D.A. Investigation of the influence on the energy intensity of the main power elements of the vehicle body in the side impact zone. Vestnik YUURGU. Seriya «MashinostroyeniYE». 2020. Vol. 20, No 4, pp. 20–34 (in Russ.).

- Goncharov R.B., Zuzov V.N. Features of the search for the optimal parameters of amplifiers for the rear of the truck cab on the basis of parametric and topological optimization in order to meet the requirements for passive safety in accordance with international rules for obtaining its minimum weight. Trudy NGTU im. R.E. Alekseyeva. 2019. No 2 (125), pp. 163–170 (in Russ.).
- Frantsuzov A.A., Shapovalov YA.I., Vdovin D.S. Application of the method of topological optimization in the design problems of lifting equipment. Tekhnicheskiye nauki. Mashinostroyeniye i mashinovedeniye. 2017. No 2 (42), pp. 99–108 (in Russ.).
- Zhaokai Li. Crashworthiness and lightweight optimization to applied multiple materials and foam-filled front-end structure of auto-body / Li Zhaokai, Yu Qiang, Zhao Xuan, Yu Man, Shi Peilong, Yan Cilei // Adv. Mech. Eng. 2017. № 9 (8). P. 1–21. DOI: 10.1177/1687814017702806.
- Goncharov R.B. Investigation of the efficiency of parametric optimization algorithms as applied to impact processes using the example of a bumper and a cabin of the vehicle. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. 2019. No 4 (709), pp. 28–40 (in Russ.).
- Novokshenov A.D., Marchenko P.A., Nemov A.S., Borovkov A.I. Topological and parametric optimization of the carrier for installation of star sensor. Vestnik Mashinostroyeniya. 2017. No 10, pp. 22–27 (in Russ.).
- Goel T. A topology optimization tool for LS-DYNA users: LS-OPT/ Topology / T. Goel, W. Roux, N. Stander // 7-th European LS-DYNA Conference, 2009.
- R. Ouadday, A. Marouene, G. Morada, A. Kaabi, R. Boukhili, A. Vadean Experimental and numerical investigation on the impact behavior of dual-core composite sandwich panels designed for hydraulic turbine applications // Composite Structures. 2018. No 185, pp. 254–263.

## TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF THE ROOF STRUCTURE OF A PASSENGER CAR IN ORDER TO INCREASE ENERGY INTENSITY IN A SIDE IMPACT

**D.A. Sulegin**, DSc in Engineering **V.N. Zuzov**  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
d\_sulegin@mail.ru

*This article considered the main issues of finding options for strengthening the roofing of the vehicle body based on topological optimization in order to meet the requirements of passive safety with a minimum mass. The method for achieving this goal was mathematical modeling using the Topology Optimization modules of the ANSYS software package and the explicit dynamics of LS-Dyna. In order to test the effectiveness of the reinforcements, the pillar side impact according to UNECE 135 “Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to their performance in side impact on a pillar” was selected as the loading mode. The efficiency criterion was the energy intensity of the body, defined as the ratio of the energy of the system to the residual (plastic) deformation at the level of the center of the door. Based on the topological optimization, two variants of the arrangement of the reinforcing elements, practically equivalent in efficiency, were obtained. For the most complete assessment of the influence of the parameters, several options for strengthening the roofing were considered: placement of steel reinforcing elements; placement of foam aluminum under the roof; combination of steel elements with filling their cavities with foam aluminum. Based on the simulation results, a comparative assessment of the effectiveness of the considered amplification options was carried out. The most effective were the options for reinforcing the roofing with channel-shaped beams and filling them with foam and the option for reinforcing the roofing with channel-shaped beams and diagonal bridges in them, causing it to increase compared to the original structure by 20,88 and 19,94 %, respectively, but at the same time the mass of the first option is 42 kg less than the mass of the second.*

**Keywords:** passive safety, topology optimization, a side impact, a body, energy intensity, a roof.

**Cite as:** Sulegin D.A., Zuzov V.N. Topological optimization of the roof structure of a passenger car in order to increase energy intensity in a side impact. Izvestiya MGTU «MAMI». 2021. No 1 (47), pp. 81–88 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-47-1-81-88.