

РАЗРАБОТКА НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ АВТОМОБИЛЯ КЛАССА РОДСТЕР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Басов А.О., к.т.н. Смирнов А.А.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,

Москва, Россия

a.basov@bmstu.ru, asmirnov@bmstu.ru

В настоящее время актуальной задачей является снижение массы автомобиля. Это продиктовано повышающимися требованиями к экономичности и динамике автомобиля. С другой стороны, постоянно растущие требования к комфорту и безопасности автомобиля, а также степени автоматизации труда водителя приводят к применению большого количества дополнительных систем, что увеличивает массу автомобиля в целом. Кроме того, применение альтернативных силовых установок приводит к появлению нестандартных компоновочных схем. Также увеличивается количество выпускаемых моделей для удовлетворения всех групп потребителей. Одновременно с этим сокращаются сроки, отводимые на разработку. В данных условиях эффективны методы топологической оптимизации несущей системы на этапе выбора силовой схемы и концепции несущей системы. В статье рассматривается процесс топологической оптимизации несущей системы автомобиля класса родстер. Автомобиль разработан в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Описан процесс разработки компоновки автомобиля, а также проработки посадки при помощи виртуального манекена и посадочного макета. Рассмотрен процесс подготовки пространства проектирования расчетной модели для проведения оптимизации. Приведено описание конечно-элементной модели для проведения оптимизации несущей системы. Рассматриваются две группы расчетных случаев: эксплуатационные и аварийные. Сформулирована оптимизационная задача, задана целевая функция и ограничения. При проведении расчетов используется решатель OptiStruct. Представлены результаты оптимизации несущей системы отдельно для нескольких нагрузочных режимов. Проведен анализ полученной топологии.

Ключевые слова: пассивная безопасность, топологическая оптимизация, несущие системы, родстер, кабриолет.

Введение

В настоящее время к несущим системам автомобилей предъявляются противоречивые требования. С одной стороны, требуется снижать массу несущей системы автомобиля, что продиктовано постоянно повышающимися требованиями экономичности и экологичности, а также повышением динамических характеристик транспортного средства. С другой стороны, постоянное стремление производителей повысить пассивную безопасность автомобиля ведет к увеличению массы несущей системы. Кроме того, постоянно повышающиеся требования к комфорту и безопасности автомобиля, а также степени автоматизации труда водителя приводят к применению большого количества дополнительных систем, что увеличивает массу автомобиля в целом.

Приведенная тенденция хорошо прослеживается на рис. 1, где показано изменение сна-

ряженной массы автомобилей одного класса (пятидверные хэтчбэки), сгруппированных по годам выхода на рынок.

Данное противоречие в настоящее время устраняется несколькими путями. Снижение массы автомобиля возможно за счет применения новых материалов, например, алюминиевых сплавов, сплавов магния и композиционных материалов [1, 2]. Такой подход позволяет добиваться хороших результатов, однако, как правило, приводит к заметному удорожанию автомобиля. Вторым направлением является проектирование конструкций с оптимальным распределением материала. При таком подходе возможно применение традиционных материалов и технологий изготовления несущей системы без повышения стоимости.

Помимо повышения качества автомобилей увеличивается количество моделей для удовлетворения всех групп потребителей. Разра-

ботка автомобилей с гибридными, электрическими и водородными силовыми установками приводит к созданию нетипичных компоновочных схем. Одновременно сокращается время, отводимое на разработку. Данное противоречие требует создания методов, позволяющих разрабатывать оптимальные силовые схемы в сжатые сроки.

Задача получения конструкции несущей системы с оптимальным распределением материала может решаться путем последовательных приближений, при котором разработчик использует свой предыдущий опыт, экспериментальные данные и анализ прочности многих вариантов несущей системы методом конечных элементов. Однако такой подход требует выполнения большого количества трудоемких операций, плохо поддающихся автоматизации. Кроме того, успех применения данного метода во многом зависит от опыта и инженерной интуиции исполнителя.

Другим путем разработки оптимальной конструкции несущей системы является применение методов топологической оптимизации, позволяющих получать оптимальное распределение материала в конструкции с учетом совокупности нагрузочных режимов и наложенных геометрических и иных ограничений [3, 4].

Цель исследования

Целью данной статьи является описание процесса разработки оптимальной конструкции несущей системы легкового двухместного автомобиля среднеторговой компоновки с открытым верхом, основанного на топологической оптимизации.

Автомобиль имеет поперечное расположение двигателя, независимую переднюю и заднюю подвески типа Мак-Ферсон. Снаряженная масса автомобиля – 1050 кг. Автомобиль разработан в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Методы и средства

Проектированию несущей системы легкового автомобиля предшествует разработка компоновки автомобиля. При разработке компоновки необходимо учитывать требования эргономики к положению водителя и пассажиров. В данной работе разработка посадки производилась при помощи виртуального манекена, входящего в набор инструментов Vehicle Design Automation САПР Siemens NX 10 (рис. 2). Данный инструмент позволяет проводить проверку соответствия параметров посадки требованиям стандартов.

После разработки виртуального манекена был изготовлен посадочный макет (рис. 3) салона автомобиля для проверки людьми разного роста. На основании отзывов были скорректированы некоторые размеры.

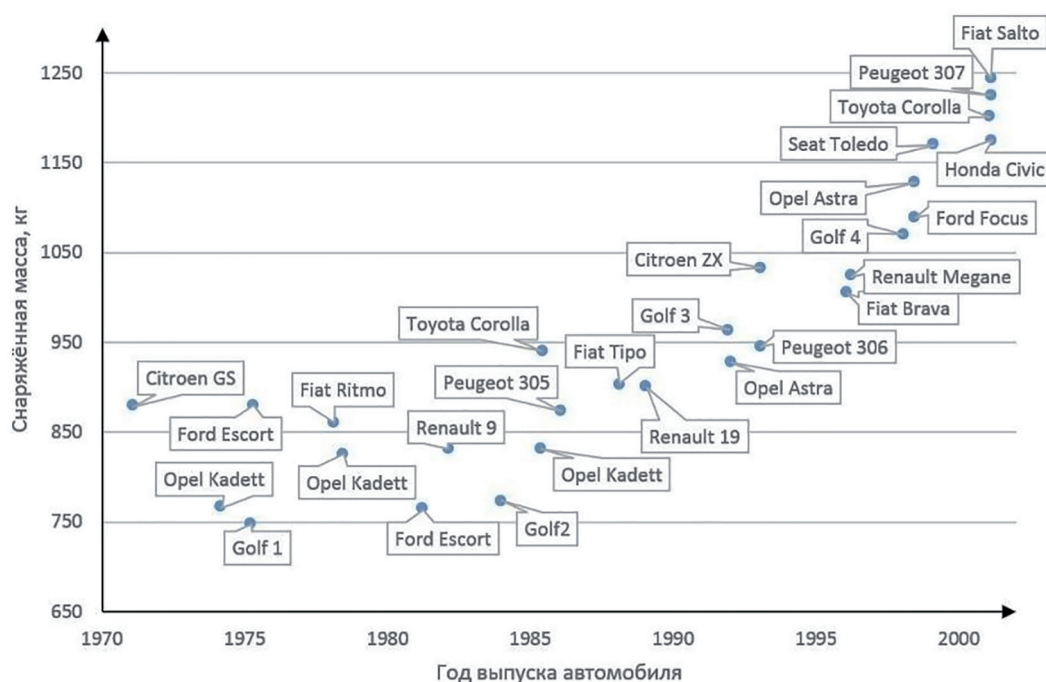


Рис. 1. Снаряженная масса автомобилей в зависимости от года выпуска

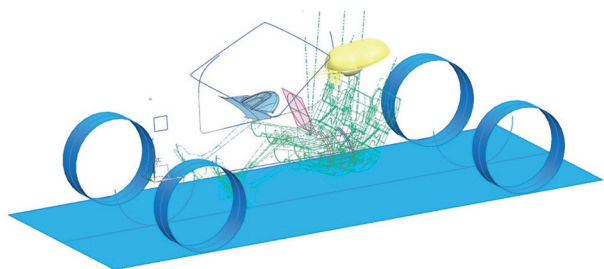


Рис. 2. Проработка эргономики в САПР Siemens NX 10

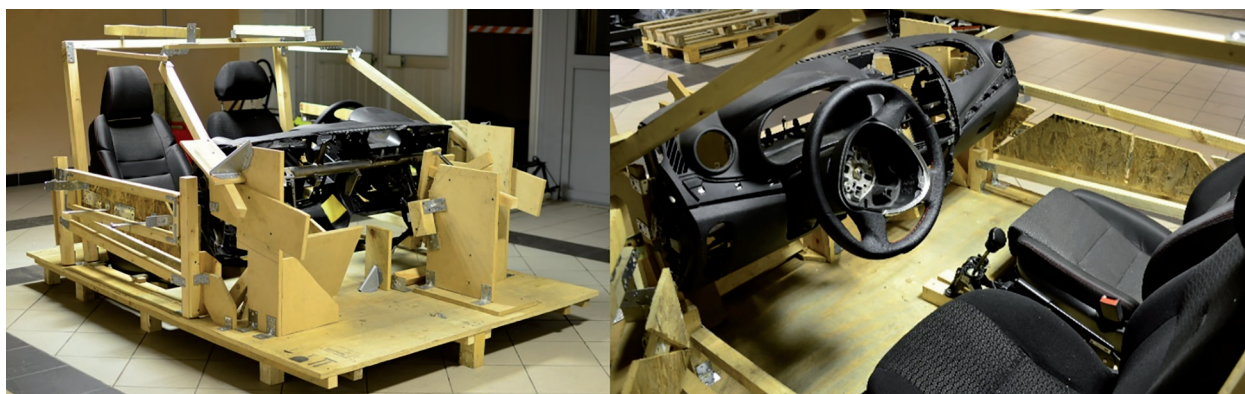


Рис. 3. Посадочный макет

Для определения доступного пространства проектирования несущей системы необходимо определить положение всех основных агрегатов. Для получения 3D-моделей всех агрегатов использовалась координатно-измерительная машина типа «рука».

Для упрощения модели агрегатов были «обернуты» поверхностью. Такой подход позволяет скрыть мелкие элементы агрегатов, а также получить тело, имитирующее агрегат без поднутрений. Таким способом были получены модели двигателя с навесным оборудованием, трансмиссии, панели приборов, отопителя салона, элементов рулевого управления, системы поддрессоривания. Топливный бак, имеющий простые очертания, оставлен без изменений. При определении заемаемого объема подвижных деталей системы поддрессоривания учитывались положения статики, полного сжатия, полного отбоя, крайние положения поворота колес передней оси, а также промежуточные положения. После получения всех возможных положений деталей системы поддрессоривания, а также приводных валов задней оси, полученные тела были «обернуты» поверхностью для создания тела, обозначающего максимальный занимаемый агрегатом объем.

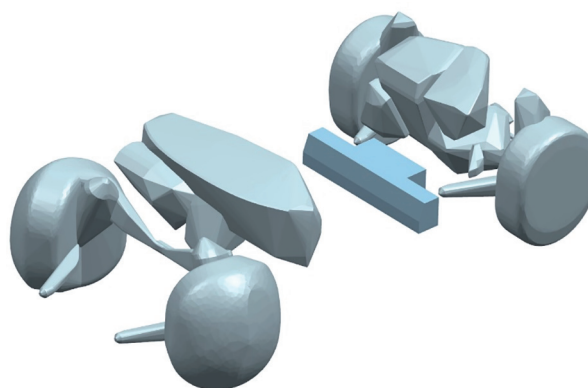


Рис. 4. Заметаемые объемы агрегатов автомобиля

были исключены места водителя и пассажира, дверные проемы и объем отсека для складывания крыши.

Полученное тело пространства проектирования используется для построения конечно-элементной модели. Конечно-элементная модель строится в программном комплексе Siemens NX в режиме Advanced Simulation. Пространство проектирования разбивается тетраэдральной сеткой элементов первого порядка TETRA4. Характерный размер конечных элементов составляет 25 мм и выбирается таким образом, чтобы при оптимизации была возможность получить каркасные конструкции, имеющие относительно малое попереч-

ное сечение. В конечно-элементную модель также включена система поддресоривания. Система поддресоривания моделируется при помощи балочных элементов BAR и стержневых элементов ROD как жесткая, однако имеет согласованные степени свободы в шарнирах для реалистичной передачи реакций на несущую систему. Силовая установка рассматривается как жесткая и моделируется элементом RBE2, опоры силовой установки моделируются элементами CBUSH1D как упругие. Массы агрегатов рассматриваются как точечные и представлены элементами CONM2. В виде точечных масс представлены водитель, пассажир, неподдресоренные массы, силовая установка. Вертикальные перемещения водителя и пассажира ограничены соединенными с полом элементами RBE2, имитирующими сиденье. Продольные перемещения водителя и пассажира ограничены элементами RBE2, имитирующими ремни безопасности. Рамка лобового стекла и дуги безопасности, сохраняющие жизненный объем при перевороте, моделируются балочными элементами. Модель состоит из 530 тысяч конечных элементов (рис. 5).

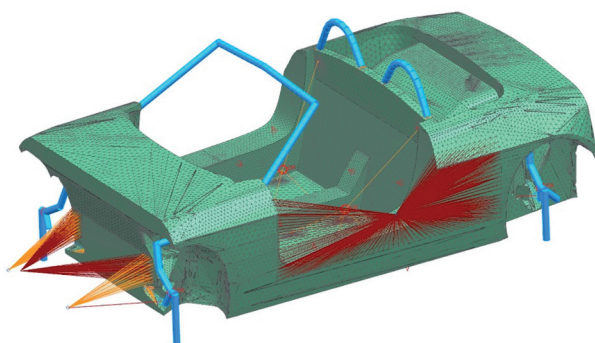


Рис. 5. Конечно-элементная модель автомобиля

После подготовки конечно-элементная модель передается в препроцессор Altair HyperMesh для задания нагрузочных режимов и постановки задачи оптимизации. При проведении расчетов используется решатель OptiStruct. При проведении оптимизации несущей системы рассматриваются две группы расчетных случаев: эксплуатационные и аварийные.

Рассматриваемые эксплуатационные режимы:

- гравитационная нагрузка;
- кручение рамы при вывешивании колеса;
- ускорение автомобиля;
- торможение автомобиля;
- движение с максимальным боковым ускорением;

- наезд передним колесом на препятствие;
 - наезд задним колесом на препятствие.
- Рассматриваемые аварийные режимы:
- фронтальный удар;
 - боковой удар;
 - удар сзади;
 - переворот, нагрузка приложена к рамке стекла;
 - переворот, нагрузка приложена к дуге безопасности.

При расчетах используется метод освобождения инерции (Inertia Relief), позволяющий вести расчет незакрепленных конструкций. Данный подход широко используется при расчете незакрепленных конструкций как статической задачи, например, полет летательного аппарата, удар и т.д. В модели задаются точечные и распределенные массы, затем к модели прикладываются силы и создаются фиктивные закрепления. Далее решатель автоматически прикладывает к узлам модели силы инерции так, чтобы уравновесить модель и реакции в заделках стали равны нулю.

При топологической оптимизации используется метод SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization). В данном методе вводится фиктивная плотность материала ρ которая непрерывно меняется от 0 до 1. Коэффициент ρ влияет на дискретность получаемого результата (должен быть больше 1).

$$K'(\rho) = \rho^p K,$$

где K – матрица жесткости.

Целевой функцией является минимизация податливости конструкции:

$$c = u^T K u,$$

где K – матрица жесткости, u – вектор перемещений.

Задано ограничение на использование исходного объема пространства проектирования:

$$\frac{V}{V_0} = f,$$

где V_0 – исходный объем пространства проектирования, V – объем материала после оптимизации.

Значение параметра $f = 0,15$ подобрано таким образом, чтобы получить наглядную картину рационального распределения материала для используемого пространства проектирования.

Результаты и обсуждение

Ниже приведены результаты оптимизации отдельно для нескольких расчетных случаев.

На рис. 6 показаны результаты оптимизации несущей системы отдельно для нагрузочного режима «Фронтальный удар». Нагрузка приложена к фланцам крепления передних энергопоглощающих элементов. Конечные элементы исходного пространства проектирования, имеющие по результатам оптимизации низкую плотность, не показаны. Для лучшего понимания поведения конструкции конечные элементы окрашены в соответствии со значением напряжений по Мизесу со знаком:

$$\text{sign}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)\sigma_V,$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, σ_V – напряжения по Мизесу.

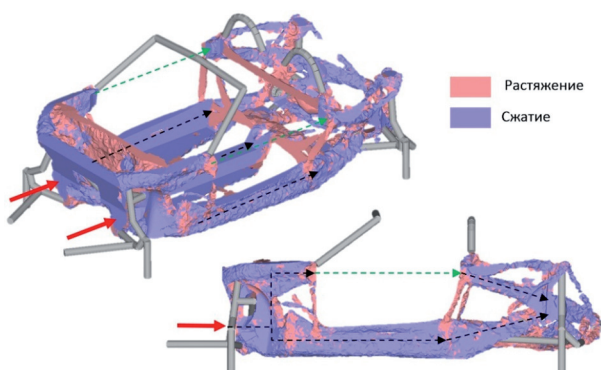


Рис. 6. Результаты оптимизации для фронтального удара

Стрелками показаны траектории передачи нагрузок. Зеленой стрелкой показана траектория передачи нагрузки через силовую балку двери. Так как у автомобиля отсутствует жесткая крыша, продольная балка двери играет важную роль в передаче нагрузок.

При ударе сзади (рис. 7) нагрузка прикладывается к фланцам крепления задних энергопоглощающих элементов (крашбоксов). Основной задачей несущей системы при ударе сзади является обеспечение герметичности топливного бака. Также как и при фронтальном ударе, силовые балки двери участвуют в передаче нагрузки.

Из результатов расчетного случая кручения рамы (рис. 8) ожидаемо следует, что силовые потоки соединяют точки крепления стоек амортизаторов и поперечных рычагов подвески на передней и задней оси. Большое влияние на

крутильную жесткость оказывают пороги, при этом материал трансмиссионного туннеля не используется в силу его небольших габаритов. Для повышения крутильной жесткости также необходимо создать замкнутую конструкцию вокруг силовой установки. При проработке конструкции необходимо обеспечить возможность установки и снятия силовой установки. Часто эта задача решается за счет съемного подрамника.

Заключение

Результаты, полученные для различных расчетных случаев, противоречат друг другу, однако дают полезную информацию о рациональной передаче нагрузок в конструкции при данном виде нагружения. В дальнейшем может быть проведена оптимизация с одновременным учетом нескольких нагрузочных режимов. Полученные результаты отражают оптимальное распределение материала в конструкции, однако требуют интерпретации и должны использоваться разработчиком несущей системы при выборе силовой схемы и определении концепции несущей системы.

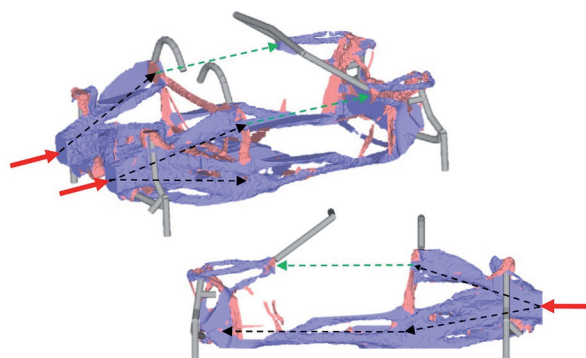


Рис. 7. Результаты оптимизации для удара сзади

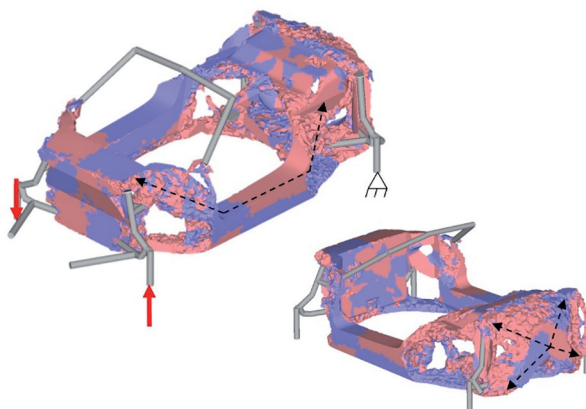


Рис. 8. Результаты оптимизации для кручения несущей системы

Литература

1. Арутюнян Г.А., Карташов А.Б. Анализ истории развития и актуальности применения несущих систем из композиционных материалов // Журнал автомобильных инженеров. 2015. № 5.
2. Арутюнян Г.А., Карташов А.Б. Оценка эффективности применения композиционных материалов для энергопоглощающих зон автомобильных несущих систем // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 2.
3. Вдовин Д.С., Котиев Г.О. Технология проектирования силовых деталей на примере вилки блокировки межосевого дифференциала многоосной колесной машины // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 8.
4. Вдовин Д.С., Котиев Г.О. Топологическая оптимизация рычага подвески грузового автомобиля // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 3.
5. Cavazzuti M., Baldini A., Bertocchi E. High performance automotive chassis design: a topology optimization based approach // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2011. Vol. 44. Issue 1. P. 45–56.

References

1. Arutyunyan G.A., Kartashov A.B. Analysis of the history of development and relevance of the use of undercarriage from composite materials. *Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov*. 2015. No 5. (in Russ.).
2. Arutyunyan G.A., Kartashov A.B. Estimation of efficiency of application of composite materials for energy-absorbing zones of automobile undercarriage. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*. 2018. No 2. (in Russ.).
3. Vdovin D.S., Kotiev G.O. Technology of designing of power parts on an example of a plug of blocking of an interaxial differential of a multiaxial wheeled vehicle. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2014. No 8. (in Russ.).
4. Vdovin D.S., Kotiev G.O. Topological optimization of the lever of a suspension bracket of the lorry. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2014. No 3. (in Russ.).
5. Cavazzuti M., Baldini A., Bertocchi E. High performance automotive chassis design: a topology optimization based approach // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2011. Vol. 44. Issue 1. P. 45–56.

DEVELOPMENT OF VEHICLE UNDERCARRIAGE WITH ROADSTER BODY USING TOPOLOGICAL OPTIMIZATION

A.O. Basov, Ph.D. A.A. Smirnov

Bauman MSTU, Moscow, Russia

a.basov@bmstu.ru, asmirnov@bmstu.ru

Nowadays the key task of designer is to reduce the mass of the automobile. This requirement is dictated by increasing demands for efficiency and dynamics of vehicle. On the other hand, the constantly increasing requirements for comfort and safety of the automobile, as well as the degree of automation of the driver's work lead to the use of a large number of additional systems, which increases the weight of the vehicle. In addition, the use of alternative power plants leads to the appearance of non-standard layout schemes. The number of manufactured models is increasing to satisfy all consumer groups. Simultaneously, the time period for R&D is reduced. In these conditions, we consider that it is effective to use methods of topological optimization of the undercarriage at the stage of the choice of the power circuit and the concept of the undercarriage. The article deals with the process of topological optimization of the vehicle undercarriage with roadster body. The car was developed at the Bauman MSTU. The process of developing of vehicle layout and design of driver position using a virtual manikin are shown. The process of preparing the design space for a computational model for optimizing is considered. A description of the finite element model for optimizing the undercarriage is given. There are considered two groups of calculation cases: operational and emergency. The optimization problem is formulated, the objective function and constraints are given. When performing calculations, the OptiStruct software was used. The results of optimization of the undercarriage for several loading regimes are presented. The analysis of the obtained topology is carried out.

Keywords: passive safety, topological optimization, undercarriage, roadster, cabriolet.