

На правах рукописи

УДК 629.33

Лю И

**МЕТОДИКА УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КУЗОВОВ ЛЕГКОВЫХ
АВТОМОБИЛЕЙ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗА СЧЕТ
ПРИМЕНЕНИЯ В НИХ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ЗАДАННЫМИ
СВОЙСТВАМИ**

Специальность 2.5.11. – Наземные
транспортно-технологические средства и
КОМПЛЕКСЫ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022 г.

Работа выполнена на кафедре колесных машин федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э.Баумана)

Научный руководитель: **Зузов Валерий Николаевич,**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры колесных машин МГТУ им. Н.Э.Баумана

Официальные оппоненты: **Орлов Лев Николаевич,**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО
«Нижегородский государственный технический
университет им. Р. Е. Алексеева»

Русанов Олег Александрович,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры наземных транспортных средств ФГАОУ
ВО «Московский политехнический университет»

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской Федерации Федеральное государственное унитарное предприятие «НАМИ»

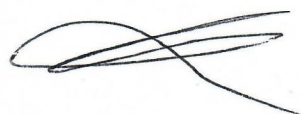
Защита состоится «16» января 2023 г. в ____ : ____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.13 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.Баумана и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 202_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., доцент



Косицын Б.Б

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При постоянном расширении видов материалов, применяемых в автомобилестроении, традиционные методы сварки не всегда могут быть применены для соединений кузовных деталей легковых автомобилей (л/а). Клеи позволяют надежно соединять детали, обладают хорошими структурными и герметизирующими свойствами, что обуславливает все более широкое их применение в автомобильной промышленности.

При разработке автомобильных конструкций с клеевыми соединениями необходимо решить проблемы обеспечения их прочности, жёсткости при минимальной массе и стоимости. Помимо этого, для автомобилей важно обеспечить пассивную безопасность, а это требует изучения взаимодействия элементов конструкций и их соединений в том числе при ударном воздействии.

Как показывают исследования, разрушение таких соединений (как точечных сварных, так и клеевых), существенно влияет на поведение всей конструкции при аварии. Поэтому необходимо иметь модели, позволяющие прогнозировать разрушение клеевых соединений с гарантированной точностью.

Однако до настоящего времени было проведено ограниченное количество исследований по разработке эффективных конечно-элементных моделей (КЭМ) клеевых соединений, способных удовлетворять требованиям анализа транспортных средств, в том числе при ударном нагружении.

Цель диссертационной работы состоит в улучшении параметров кузовов автомобилей (прочность, жесткость, минимальная масса и энергоемкость) на стадии проектирования за счет применения в них клеевых соединений с заданными свойствами, а также методов оптимального проектирования.

Для достижения цели в работе были поставлены и решены **следующие задачи:** 1) провести анализ типовых конструкций л/а, в том числе с клеевым соединением, и выбрать объекты исследования; 2) провести анализ методов исследования прочности, жесткости конструкций л/а; 3) разработать рациональные КЭМ клеевых соединений с учетом факторов, влияющих на прочность и жесткость конструкций автомобилей при статическом, квазистатическом и ударном нагружениях; 4) разработать метод калибровки свойств клея при моделировании с учетом изменений фактической и моделированной толщины клеевого слоя и скорости деформации; 5) разработать методику задания требуемых свойств клеевого соединения (параметров клея, толщины клеевого слоя) для л/а применительно к оптимизационной задаче для достижения необходимой энергоемкости, снижения массы и обеспечения требуемой прочности и жесткости; 6) разработать методики улучшения параметров склеенных конструкций (по прочности, жесткости и энергоёмкости при минимальной массе) за счет использования клеевого соединения с заданными параметрами, а также проведения параметрической и топологической оптимизации.

Научная новизна работы заключается в разработке методики совершенствования параметров навесных деталей кузовов и крыш автомобилей на стадии проектирования за счет применения клеевых соединений с заданными свойствами с целью обеспечения требований пассивной безопасности

автомобиля, а также прочности и жесткости при минимальной массе, включающей в себя: - разработку модифицированного метода калибровки свойств клеевого соединения, ориентированного на многовариантные исследования при квазистатическом и ударном нагружениях, отличающегося тем, что помимо корректирования модуля Юнга, предела текучести и модуля упрочнения клеевого материала учитывается влияние толщины клеевого соединения и скорости деформации; - разработку рациональных КЭМ конструкций кузовов автомобилей и клеевых соединений в них, отличающиеся, обоснованно выбранными размерами и типами конечных элементов, обеспечивающими получение требуемой точности результатов расчета при квазистатическом, динамическом и ударном нагружениях с минимальными трудозатратами на подготовку и решение задач с помощью программных комплексов (ANSYS и LS-Dyna); - прогнозирование механических свойств клеевых соединений, применяемых в элементах конструкций транспортных средств при ударных нагрузках, и их подверженность растрескиванию и разрушению в сравнении с разрушением точечных сварных соединений, что позволяет определить границы применимости клея для кузовов; - разработку метода задания требуемых свойств клеевого соединения (параметров клея, толщины клеевого слоя) для навесных деталей и крыши л/а применительно к оптимизационной задаче для достижения необходимой энергоемкости, снижения массы и обеспечения требуемой прочности и жесткости.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждались сопоставлением с известными теоретическими и экспериментальными исследованиями, а также сравнениями теоретических результатов с экспериментальными данными.

Практическая ценность результатов работы состоит в том, что:

1. Разработанная методика может быть применена при проектировании и доводке кузовов и навесных деталей легковых автомобилей с использованием клеевых соединений для удовлетворения требованиям прочности, жесткости и пассивной безопасности, а также уменьшения массы;

2. Реализованы предложения (по результатам теоретических исследований) по применению клеевого соединения с выбранными свойствами в капоте, крышке багажника, двери и крыше автомобилей Honda Accord и Nissan Rogue и по изменению этих конструкций, позволившие улучшить их основные параметры.

Личный вклад автора состоит в том, что представленные результаты получены автором или при его непосредственном участии. Автором лично разработаны модели клеевого соединения для применения в автомобильных конструкциях и выполнены экспериментальные исследования для верификации КЭМ клеевого соединения и оценки её эффективности.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся: методика проектирования конструкций л/а, с применением клеевого соединения с заданными свойствами, позволяющая улучшить параметры кузовов автомобилей на стадии проектирования за счет совершенствования технологии изготовления кузовов и связей конструктивных элементов с целью обеспечения требований

пассивной безопасности, сокращения времени разработки и стоимости нового изделия с использованием методов оптимального проектирования, а также результаты исследований.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались на: 1) Научных семинарах кафедры колесных машин МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, 2018-2022 г.); 2) XIII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2020 г.); 3) XIV Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2021 г.); 4) XV Международной научно-практической конференции «Перспективные Направления Развития Автотранспортного Комплекса» (Пенза, 2021 г.); 5) 112-ой Международной научно-технической конференции «Конструктивная Безопасность Автотранспортных Средств» (Москва, 2022 г.).

Реализация работы: материалы диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке инженеров на кафедре колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, из них 3 работы в рецензируемых журналах, рекомендуемых перечнем ВАК РФ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения, а также списка литературы. Работа выполнена на 158 листах машинописного текста, включает 142 рисунка и 22 таблицы. Список литературы насчитывает 103 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, кратко изложено содержание глав диссертации, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов.

В Главе 1 проведены обзор и анализ литературы по состоянию проблемы прочности, жесткости и ударопрочности конструкций автомобиля, а также представлены примеры применения клеевого соединения и методы его оценки, на основе которых можно судить о важности поставленной задачи. Установлено, что исследование клеевого соединения в настоящее время имеет практическое значение в автомобильной промышленности. Также рассмотрены возможности применения методов топологической и параметрической оптимизации для решения задач улучшения параметров, и в том числе пассивной безопасности автомобиля.

Проанализированы существующие и разрабатываемые методы исследования пассивной безопасности автомобилей и факторов, влияющих на прочность, жесткость, а также ударопрочность конструкций с клеевыми соединениями. Среди работ российских и зарубежных ученых особенно отмечены труды: В. Н. Зузова, Д. С. Вдовина, Р. Б. Гончарова, Д. А. Сулегина, Л.Н. Орлова, Сухао Се, Ян Синь, Т. Дж. Редди, Xu W., Zhang G, Gao X., Herzl C., Xin Y., Xia Y., Chew H B, Guo T F, Cheng L., Anders Biel, Michael M., N.D.D. Silva R., Avendaño, D. Shan и др.

В настоящее время ограниченно представлен анализ по применению клея в соединениях автомобильных конструкций, а также факторов, влияющих на свойства клеевого соединения (скорость деформации, толщина клеевого соединения и др.) и на прочность этих соединений. Предлагаемые модели клеевого соединения не в полной мере применимы к расчету автомобильных конструкций при статическом, динамическом и ударном нагружениях, поскольку не учитывают влияние скорости деформации и толщины клеевого соединения.

На основании проведенного анализа сделан вывод, что: 1) клеевые соединения в настоящее время достаточно широко используются в автомобилестроении благодаря их хорошему поглощению энергии, амортизации, электрохимической стойкости и возможности соединения разных материалов. 2) основными параметрами, влияющими на прочность клеевого соединения, являются их модуль Юнга, предел текучести, модуль упрочнения и скорость выделения энергии, а также характеристики удлинения, которые необходимо учитывать при расчетных и экспериментальных исследованиях. 3) проведено ограниченное количество исследований по разработке эффективных КЭМ клеевых соединений, способных удовлетворять требованиям анализа транспортных средств, в том числе при ударном нагружении. 4) необходимо решение научной задачи по разработке методики улучшения параметров кузовов легковых автомобилей за счет применения клеевых соединений с заданными свойствами.

В Главе 2 разработаны оригинальные модели клеевых соединений в кузовах л/а и проведено исследование их поведения при квазистатическом и ударном нагружениях.

Условие разрушения клеевого материала описывается известной формулой:

$$\left(\frac{\sigma_{rr}}{\sigma_{rr}^F}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau^F}\right)^2 = 1,$$

где σ_{rr}^F - нормальное напряжение разрушения, τ^F - напряжение сдвига при разрушении, σ_{rr} и τ - нормальное напряжение и напряжение сдвига клеевого слоя соответственно.

Деформация по направлению толщины клеевого слоя:

$$\begin{cases} \delta_e = \frac{\sigma}{E} t & (\sigma < \sigma_0); \\ \overline{\delta_e} = \frac{\sigma}{E} t = \frac{\sigma_0}{E} t & (\sigma = \sigma_0); \\ \delta_p = (\sigma - \sigma_0) \left(\frac{1}{E_t} - \frac{1}{E} \right) t & (\sigma > \sigma_0), \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{где } \delta_e, \overline{\delta_e} \text{ и } \delta_p \text{ — это упругая деформация,} \\ \text{деформация по текущему моменту и} \\ \text{пластическая деформация материала} \\ \text{соответственно; } \sigma \text{ - напряжение элемента} \\ \text{клеявого материала; } t \text{ - толщина элемента.} \end{array}$$

Для исследования влияния толщины клеевого соединения и сравнения прочности клеевого и сварного соединений были подготовлены и проведены эксперименты. Испытательный стенд состоит из направляющих высотой 3 м, прямоугольного груза массой 22,3 кг и горизонтальной испытательной стойки для зажима и размещения образца.

Образцы для испытаний представляют собой прямоугольные трубы омега-образной формы с толщиной стенки 1 мм из стали 08пс. Соединение листов в

одном случае осуществлено точечной сваркой, во втором - с помощью клея. Исследовались клеевые соединения с толщиной клеевого слоя 0,5 мм и 1 мм. Внешний вид образцов после испытаний показан на Рис. 1. Экспериментально определены механические свойства клеев на базе Henkel EP5055, применяемых для соединения элементов конструкции транспортных средств.



Рис. 1. Образцы после испытаний при осевой и боковой ударных нагрузках

Поскольку фактическая толщина клеевого слоя не соответствует его толщине в КЭМ, а также необходимо учитывать влияние скорости деформации на прочность соединения, то требуется выполнить корректировку в конечных элементах (КЭ) свойств клеевого материала. Уравнения метода корректировки:

$$\begin{cases} E_a = E_b \frac{H}{h} \\ \sigma_{0a} = \sigma_{0b} \frac{\lg(\varepsilon)}{\lg(\varepsilon_0)} \\ E_{ta} = E_{tb} \frac{H}{h} \end{cases} ; \begin{cases} \text{где } E_a, E_b - \text{смоделированный(а) и фактический (б)} \\ \text{модули Юнга клея; } H, h - \text{смоделированная и} \\ \text{фактическая толщина клея; } \sigma_{0a}, \sigma_{0b} - \\ \text{смоделированный и фактический предел текучести;} \\ E_{ta}, E_{tb} - \text{смоделированный(а) и фактический (б)} \\ \text{модули упрочнения, } \varepsilon - \text{фактическая скорость} \end{cases}$$

деформации, ε_0 – нормальная скорость деформации.

Для оценки влияния толщины клеевого соединения были разработаны КЭМ клеевых соединений «внахлест» и «встык». Конечно-элементное моделирование проводилось в программе LS-Dyna (Рис. 2).

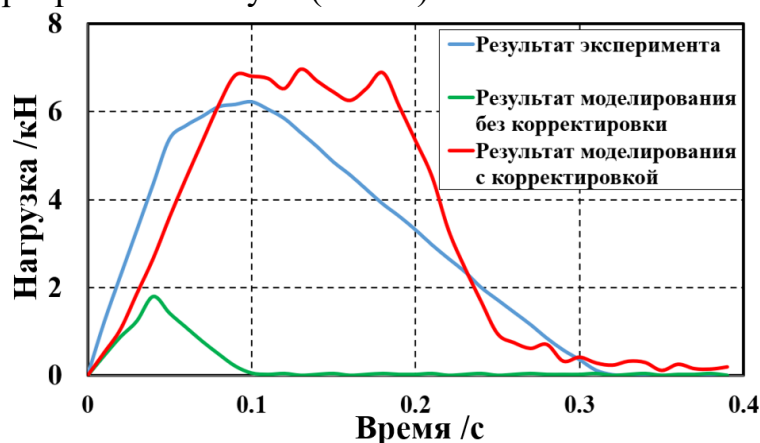


Рис. 2. Результаты эксперимента и моделирования без корректировки и с корректировкой свойства клея для соединения «внахлест»

При квазистатической нагрузке вычислительные погрешности с корректировкой и без корректировки составляют 12% и 54% соответственно для КЭМ клеевого соединения «внахлест», а для КЭМ клеевого соединения «встык» погрешности моделирования с корректировкой и без корректировки составляют

12% и 84% соответственно. При ударной нагрузке погрешность результатов моделирования с корректировкой свойств материала клея по сравнению с экспериментальными данными уменьшена с 84% до 5,9% («внахлест») и с 20,7% до 8,6% («встык»).

На основе результата эксперимента по исследованию ударного нагружения оценено влияние толщины клеевого соединения и скорости деформации на прочность склеенной конструкции. В том числе получено, что клеевое соединение на базе клея Henkel EP5055 при ударных нагрузках со скоростью 6,66м/с (при осевом ударе) и 6,87м/с (при боковом ударе) подвержено растрескиванию и разрушению, при этом в аналогичном сварном соединении не происходит разрушения точек сварки, что позволяет определить границы применимости клея. Чтобы прочность склеенной конструкции при ударе была не хуже, чем у сварной параметры клея σ_{rr}^F и τ^F должны быть равными 290 МПа и 310 МПа для соединения стальных элементов (08пс с толщиной листа 1мм) этим клеем. Поэтому далее исследования проводятся для навесных деталей и крыши.

Зоны разрушения клеевого соединения при осевом ударе в эксперименте показаны на Рис.3,а. Для расчетного определения мест разрушения соединения было выполнено моделирование с предлагаемой калибровкой (Рис. 3,б) и без неё калибровки (Рис. 3,в). Для оценки влияния толщины клеевого слоя и скорости деформации было проведено также моделирование только с учетом одного фактора: (Рис. 3,г) скорости деформации и (Рис. 3, д) толщины клеевого соединения.

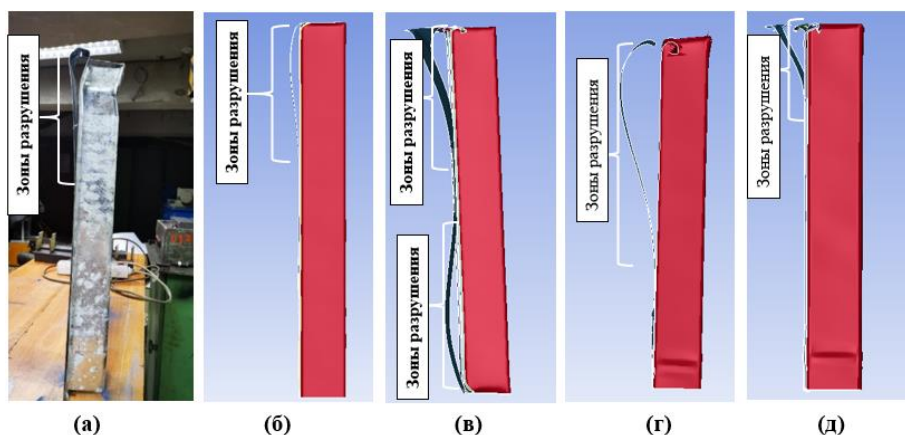


Рис. 3. Зоны разрушения клеевого соединения

Анализ представленных результатов показывает, что комбинированный учет влияния толщины клеевого соединения и скорости деформации при корректировке дает наилучший результат по точности моделирования (с учетом одного фактора погрешность моделирования больше на 15%). Использование корректировки материала клеевого соединения с учетом двух факторов позволяет с хорошей точностью (1 - 10%) моделировать разрушение клеевого слоя и деформацию конструкции при ударной нагрузке.

Сравнение представленных результатов с данными моделирования сварной трубы позволяет сделать вывод, что при осевом ударе энергия поглощения сварной конструкции на 3,32% меньше, чем клеевого соединения с толщиной 0,2мм, а при боковом ударе на 14,2% меньше. При большей толщине клеевого слоя разница ещё выше. Общая деформация при боковой ударной нагрузке

склеенной конструкции с толщиной клеевого слоя 1 мм на 5,5% меньше, чем у сварной (клеевой слой поглощает часть энергии).

Из анализа Рис. 4 следует, что при боковом ударе поглощение энергии клеевого соединения наиболее интенсивное в диапазоне толщин 0,2-0,5 мм, а при толщинах 0,5-1 мм существенно снижается структурная деформация. При этом толщина клея 0,2 – 0,5 мм (для клея Henkel EP5055) является рекомендуемой (наилучшей) для склеивания панелей автомобиля.

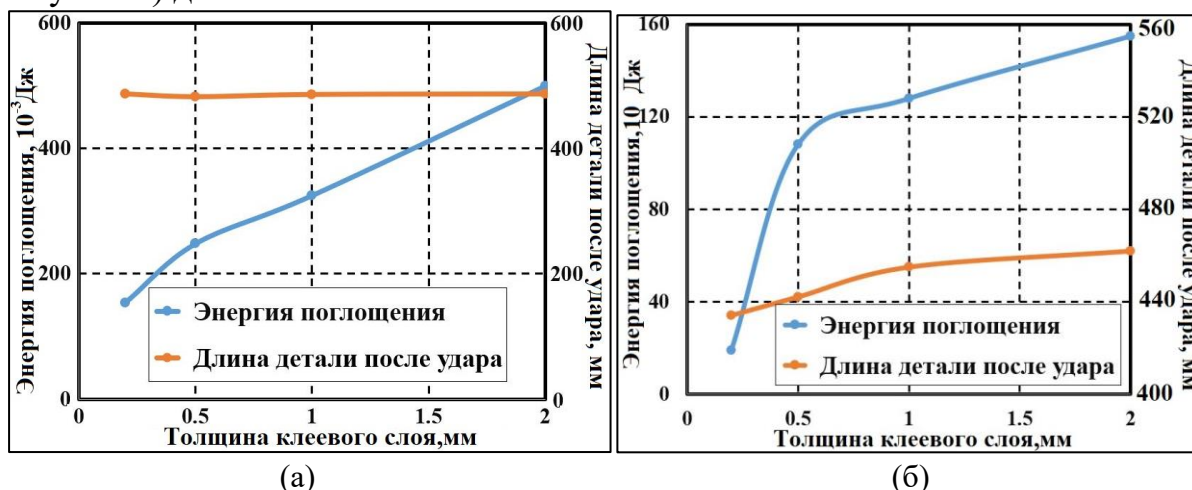


Рис. 4. Зависимость энергопоглощения детали и её длины от толщины клеевого слоя после осевого (а) и бокового (б) ударов

Для клеевого соединения с толщинами 0,5 мм и 1 мм было создано и исследовано 12 вариантов КЭМ. Сравнивая экспериментальные и расчетные результаты, можно оценить погрешность моделирования и время, затрачиваемое на решение задачи (Таблица 1).

Таблица 1.

Погрешность моделирования и время расчета				
Толщина клея, мм	Количество рядов КЭ по толщине клея	Размер КЭ клея, мм²	Средняя погрешность, %	Время расчета
0,5	1	2x2	3,5	8 ч 52 мин
	2	2x2	16	5 ч 37 мин
1	1	2x2	2,5	9 ч 23 мин
	2	2x2	15	5 ч 27 мин

Из приведенной выше таблицы видно, что на этапе проектирования при квазистатической и ударной нагрузках рекомендуется использовать объемный КЭ с размером граней 2x2 мм², и в зависимости от толщины клеевого слоя не менее двух КЭ по толщине клея.

За счет соединения наружных и внутренних панелей в навесных деталях и крыше л/а клеём увеличивается жесткость и прочность этих конструкций. При этом можно уменьшить массу конструкций. Такое исследование представлено в **3-ей Главе**. В качестве объектов выбраны двери, капот, крышка багажника и крыша л/а Honda Accord и Nissan Rogue. Эффект старения клея (для практического применения его в соединениях) учитывается коэффициентами

запаса.

КЭМ были разработаны для двери с клеевым и традиционным видами соединений. Результаты решений представлены для двух наиболее тяжелых режимов нагружения (принудительное открывание двери с нагрузкой 1000Н, и прижатие двери нагрузкой 2000Н). При этом получено, что максимальная деформация с клеевыми соединениями соответственно на 2,07% и 1,8% ниже, чем без клеевых соединений (при этих статических нагружениях). Зоны высоких напряжений в основном сосредоточены в местах нагружения и фиксации, их площадь уменьшается. При этом максимальное напряжение снижается на 4,89% (для наиболее тяжелого режима).

Для исследования влияния применения клеевого соединения в двери на прочность конструкции при боковом ударе выбран режим нагружения в соответствии с стандартом IHS (удар со скоростью 50 км/ч). Расчеты проводились в программном комплексе LS-Dyna для КЭМ конструкций, соединенных клеем и соединенных традиционным способом (Рис. 5).

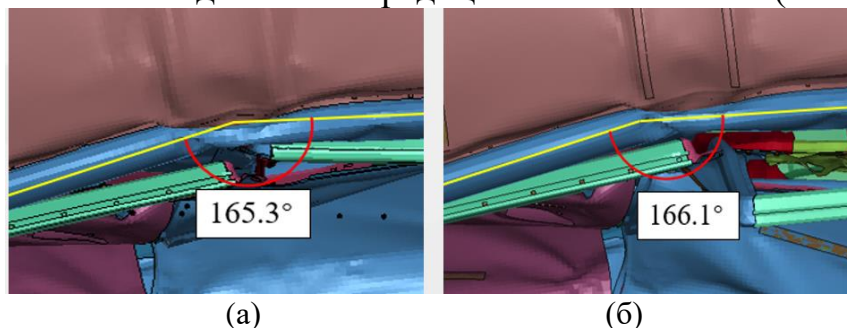


Рис. 5. Угол изгиба порога автомобиля с применением (а) клеевого соединения и без (б) клеевого соединения

Анализ результатов расчетов позволил сделать вывод, что использование клеевых соединений в дверях Honda Accord позволяет незначительно (на 0,91%) снизить контактную силу при боковом ударе (согласно критериям стандарта IHS) и повысить жесткость в зоне порога (угол изгиба на 0,8° меньше), увеличить потенциальную энергию склеенной конструкции автомобиля на 5,3% по сравнению с автомобилем, у которого двери изготовлены традиционно.

Аналогичный анализ был выполнен для крышки багажника. Характерные статические и ударные режимы нагружения крышки багажника автомобиля показаны на Рис. 6.

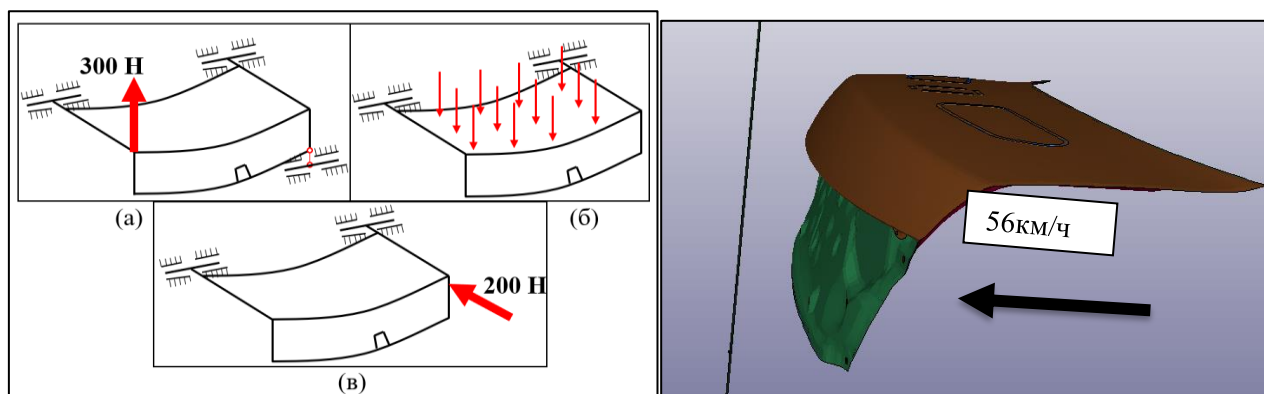


Рис. 6. Статические и ударное нагружения крышки багажника

Анализ результатов моделирования показывает, что при применении клеевого соединения можно уменьшить максимальное перемещение на 10,32%, максимальное напряжение на 8,94% (при наиболее тяжелом статическом нагружении), а при ударе сзади деформация конструкции крышки багажника снижается на 6,49% (Рис. 7). При этом энергия поглощения удара примерно одинаковая.

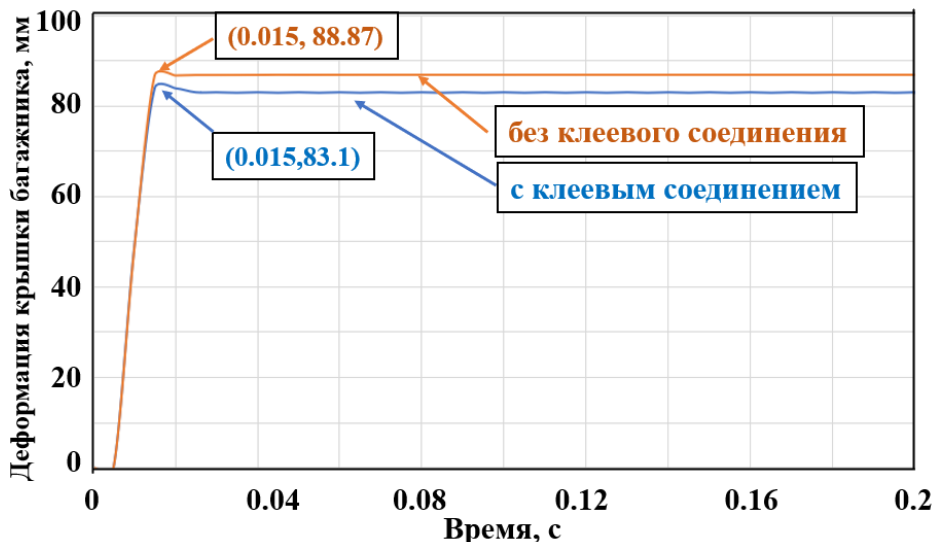


Рис. 7. График изменения деформации крышки багажника с клеевым соединением и без клеевого соединения при столкновении

Чтобы имитировать сценарий зимнего толкания застрявшего л/а и накопления снега прикладываются горизонтальная и распределенная вертикальные нагрузки к капоту автомобиля (на Рис. 8).

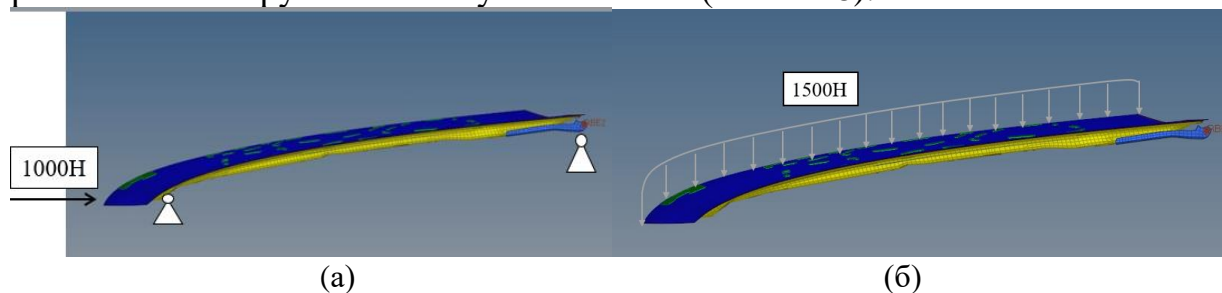


Рис. 8. Место приложения горизонтальной (а) и распределенной вертикальной (б) нагрузок к капоту автомобиля

Расчет проводился в программном обеспечении OptiStruct. Из результатов анализа следует, что при действии горизонтальной нагрузки в передней части капота деформации и напряжения в серийной конструкции и с клеевым соединением существенно не отличаются. При действии вертикальной распределённой нагрузки деформация склеенной конструкции снижается на 78,6%. Напряжения конструкции с клеевым соединением тоже снижаются, что говорит о решении проблемы концентрации напряжения по сравнению с серийной.

Ударные нагрузки задавались в соответствии со стандартом ПHS (смоделирован фронтальный удар л/а о жесткую стену на скорости 56 км/ч). Полученные результаты моделирования использовались для сравнительной оценки поглощенной энергии капота, изготовленного традиционно и с

применением клея (Рис. 9). Деформация оценивалась путем измерения расстояния между передней и задней конечными точками на осевой линии.

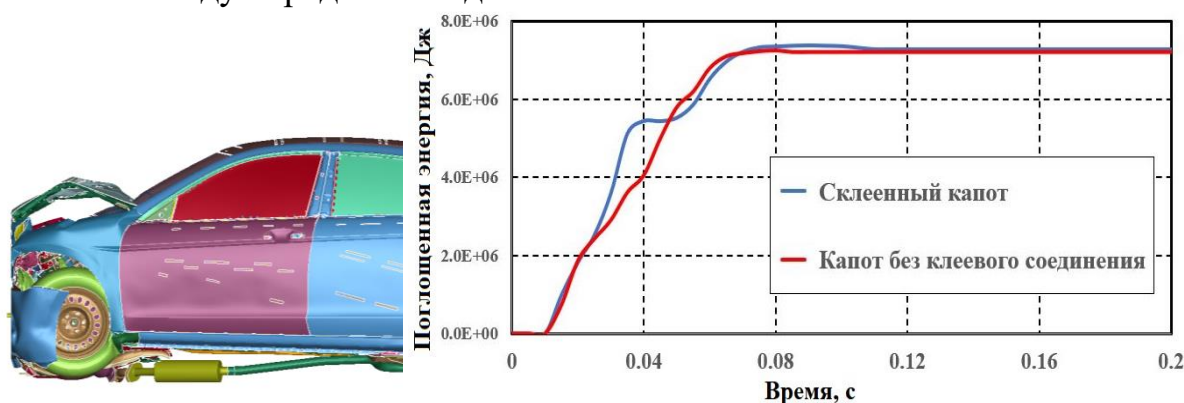


Рис. 9. Деформация автомобиля и изменение поглощенной энергии капота при фронтальном ударе

Анализ результатов показал, что продольные перемещения при двух рассматриваемых вариантах капота незначительно отличаются друг от друга (влияние капотов на пассивную безопасность относительно мало). Поглощенная энергия склеенного капота на 1,5% выше, чем у капота без клеевого соединения. Деформация при фронтальном ударе непосредственно капота на 20,9% меньше у склеенного, чем у серийного.

С целью снижения массы (при сохранении других параметров), выполнена оптимизация капота в программных обеспечениях OptiStruct и LS-TASC, в результате чего получена оптимизированная конструкция. Моделировался фронтальный удар автомобиля со скоростью 56 км/ч о жесткую стену. Параметры оптимизированного капота улучшились по сравнению с базовым вариантом, в частности, деформация уменьшилась на 8,66%, а масса уменьшилась на 5,73%.

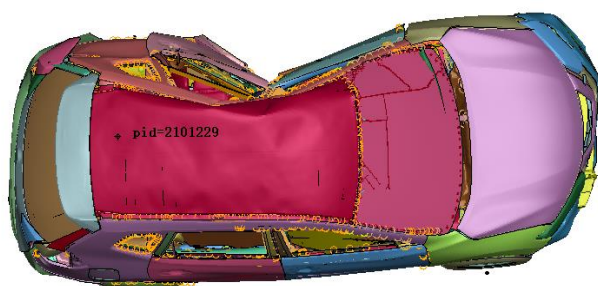


Рис. 10. Результат моделирования автомобиля при боковом ударе

Для исследования влияния применения клеевого соединения в крыше был выбран автомобиль Nissan Rogue. Боковое столкновение было проведено в соответствии со стандартом Euro NCAP (автомобиль ударился о жесткий брус под углом 80° в боковом направлении при скорости 32 км/ч). Результаты моделирования показаны на Рис. 10.

В модели были введены клеевые соединения в местах между внутренними и внешними панелями дверей и крыши автомобиля соответственно. Расчеты проводились в программе LS-Dyna. Поглощенная энергия дверей, каркаса, крыши и клеевых соединений показана на Рис. 11.

Снижение общей кинетической энергии составляет $4,33 \times 10^7$ Дж. При этом крыша поглощает 3,87% энергии столкновения, каркас поглощает 7,97%, двери поглощают 3,45%, а клеевое соединение поглощает 0,05%.

Для определения деформации автомобиля используется расстояния между

левой и правой боковыми дверями автомобиля. За счет применения клея максимальная деформация автомобиля уменьшилась на 9 мм.

Из приведенных результатов Рис.11 следует, что крыша автомобиля также участвует в поглощении энергии столкновения при боковом ударе, а клеевые соединения поглощают незначительную часть энергии удара. Использование клеевых соединений в дверях и крыше позволяет уменьшить перемещение автомобиля при боковом ударе на 9 мм (1,4 %) при увеличении массы изделия за счет клея на 0,35 кг.

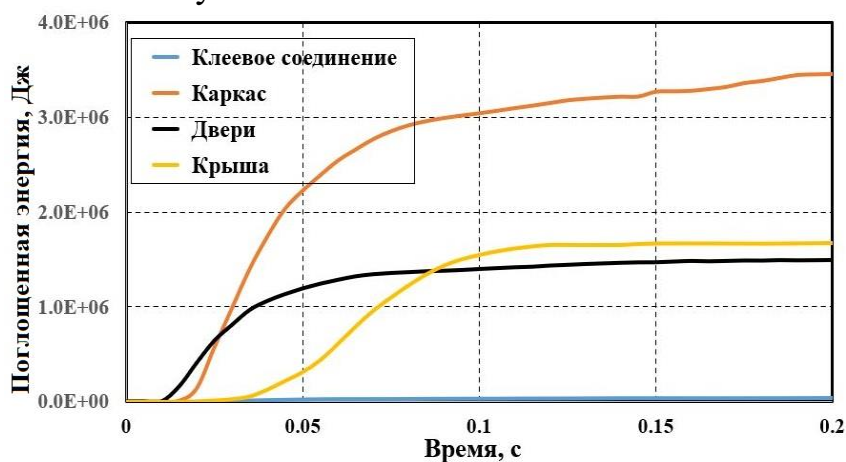


Рис. 11. Поглощенная энергия крыши, каркаса, дверей и клея

Глава 4 посвящена разработке методики совершенствования конструкции автомобиля на стадии проектирования за счет применения в ней клеевых соединений с заданными свойствами для удовлетворения требованиям по прочности, жесткости, снижению массы, ударопрочности, а также пассивной безопасности. В предлагаемой методике выделены следующие основные этапы (Рис. 12).

Перед началом процесса проектирования, необходимо сформировать набор требований для кузова легкового автомобиля в соответствии со стандартами Euro NCAP, IIHS, NHTSA и т. д. После этого создается исходная геометрическая модель кузова автомобиля и КЭМ с рекомендуемыми размерами КЭ и введенными клеевыми соединениями в местах между внутренними и внешними поверхностями панелей капота, дверей, крышки багажника и крыши автомобиля.

Далее предлагается провести комплекс предварительных расчетов на пассивную безопасность (в соответствии со стандартами Euro NCAP, IIHS, NHTSA и др.) для определения параметров, требующих улучшений. При этом следует учитывать влияние толщины клеевого слоя и скорости деформации.

Затем следует сравнить результаты расчетов по моделям с применением клея и без него при статическом и динамическом анализе для оценки прочности, жесткости автомобиля в соответствии с требованиями. Если требования не удовлетворяются, то необходимо провести коррекцию КЭМ, введя изменения параметров конструкций и клеевого соединения.

На следующем этапе выбираются целевые функции и ограничения для проведения оптимизации конструкций с клеевыми соединениями. Чаще всего в качестве целевой функции выбирается масса или потенциальная энергия деформации. Ограничениями могут служить данные, полученные на этапе статических и динамических расчетов. При разных нагрузочных режимах выявляются зоны с наибольшими перемещениями и напряжениями.

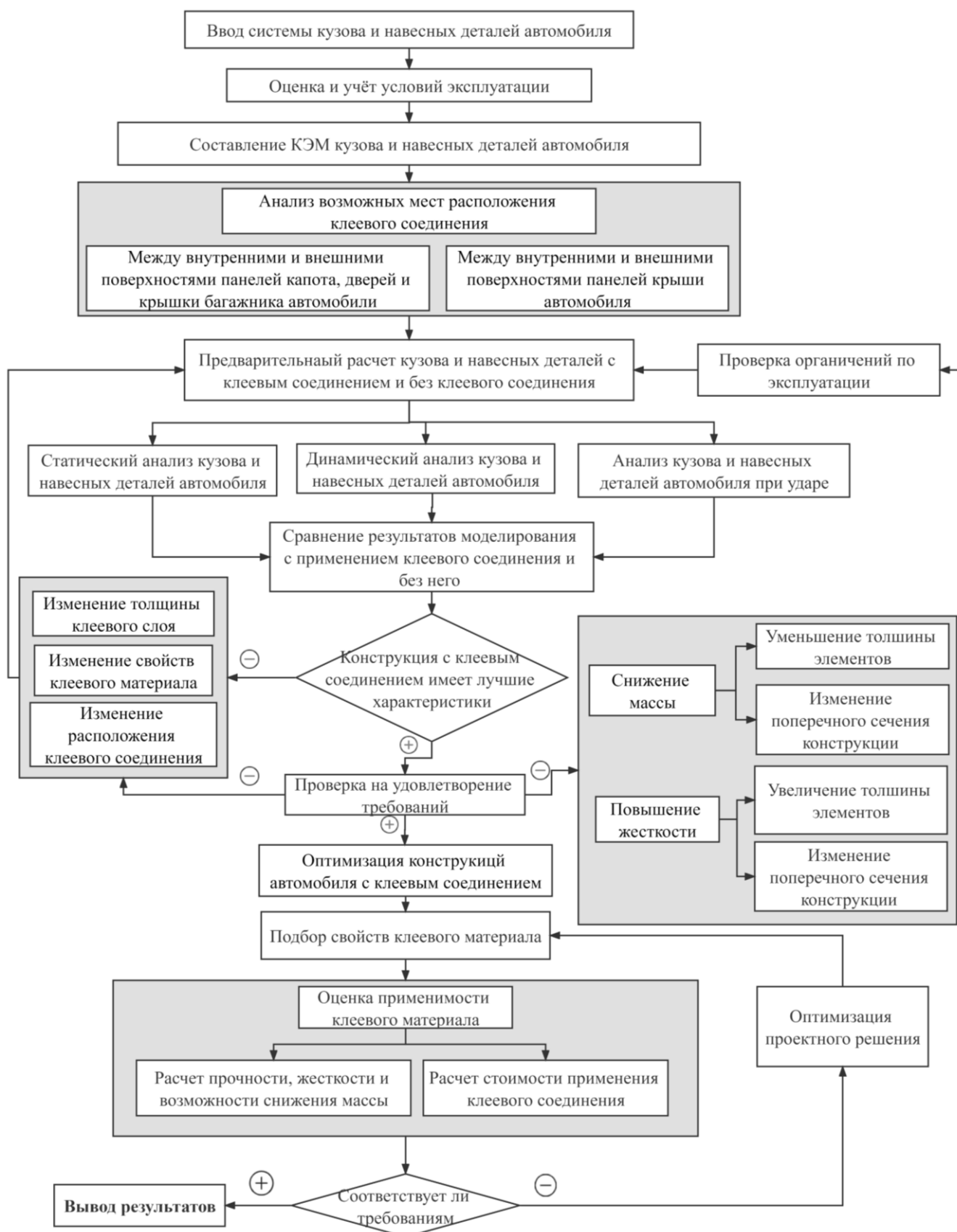


Рис. 12. Блок-схема методики совершенствования конструкций автомобиля за счет применения в них клеевых соединений и оптимизации

Далее требуется интерпретация оптимизированной КЭМ конструкции и проведение проверочных расчетов в соответствии всем требованиям. Если разработанная конструкция отвечает всем требованиям, то необходимо

подобрать существующий клей с требуемыми параметрами. При удовлетворении всем требованиям создаются: итоговые геометрические модели, финальная конструкторская документация и т.д. Теперь автомобиль с клеевыми соединениями можно изготовить и подвергнуть натурным испытаниям, по результатам которых следует валидировать КЭМ.

Для иллюстрации эффективности разработанной методики был выбран л/а Honda Accord. Для него имеются результаты экспериментов при фронтальном, боковом ударе и ударе сзади по требованиям Euro NCAP, по которым можно сделать вывод, что автомобиль представляет интерес для изучения пассивной безопасности.

На основании анализа конструкции в КЭМ автомобиля были введены клеевые соединения в местах между внутренними и внешними поверхностями панелей дверей, капота и крышки багажника соответственно.

При моделировании воздействия снега на капот использовалась распределенная нагрузка (5000Н), действующая на верхнюю поверхность.

Согласно результатам моделирования, максимальное смещение крыши составляет 12,67 мм для модели серийного автомобиля и 5,91 мм для КЭМ с клеевым соединением. В целом картина распределения деформаций в склеенном варианте также лучше, чем у серийного.

Результаты модального анализа кузова показывают, что у сварного кузова автомобиля Honda Accord модальная изгибная частота первого порядка составляет 27,8 Гц, а крутильная модальная частота первого порядка - 34,0 Гц. При использовании клеевого соединения в кузове частота изгибной моды первого порядка составляет 56,4 Гц, а частота крутильной моды первого порядка - 33,8 Гц, что свидетельствует о более высокой жесткости склеенного кузова л/а. Отсюда можно сделать вывод, что увеличение жесткости автомобиля за счет использования клеевых соединений позволяет эффективно повысить его собственные частоты и в ряде случаев улучшить вибрационные характеристики.

Результаты расчетов автомобиля Honda Accord при фронтальном, боковом столкновениях и ударе сзади по стандартам NHTSA, IIHS в программном обеспечении LS-Dyna приведены ниже (Рис.13).



Рис. 13. Результаты расчетов автомобиля Honda Accord при фронтальном, боковом столкновениях и ударе сзади

Деформация КЭМ автомобиля с клеевым соединением при фронтальном ударе получена на 2,5% меньше, чем в КЭМ без клеевого соединения. Также деформация автомобиля с клеевым соединением при заднем столкновении меньше на 3,2%. Угол изгиба порога автомобиля с клеевым соединением при боковом ударе на 0,8° меньше, чем у автомобиля без клеевого соединения (Рис.5).

Максимальное значение замедления меньше у автомобиля с клеевым

соединением, чем у автомобиля без клеевого соединения: при фронтальном столкновении на 6,3%, при боковом ударе на 4,38%, и при ударе сзади на 26,8%.

Следует также отметить, что использование клеевых соединений увеличивает общую массу автомобиля на 1,37 кг (масса клея).

Топологическая и параметрическая оптимизация были использованы для получения более совершенной конструкции автомобиля, в том числе с меньшей массой и отвечающей требованиям прочности, жесткости и пассивной безопасности. Панели крышки багажника и капота автомобиля после проведения топологической и параметрической оптимизаций показаны на Рис.14.

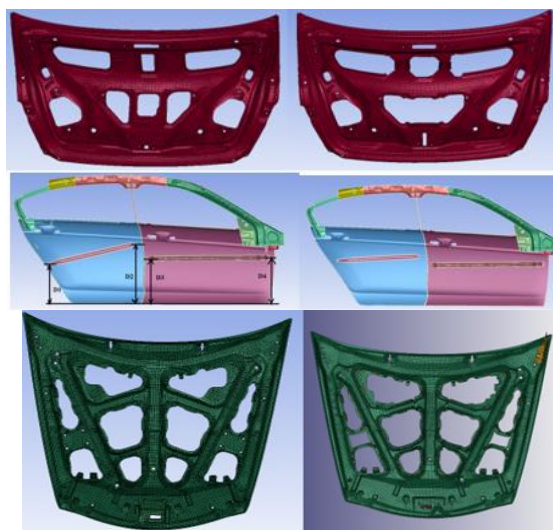


Рис. 14. Начальная и оптимизированная конструкции

Результаты модального анализа кузова показывают, что модальная частота первого порядка изгиба кузова автомобиля Honda Accord с оптимизированными конструкциями составляет 58,76 Гц, а модальная частота первого порядка кручения - 31,35 Гц. Угол изгиба при боковом ударе в пороге кузова со склеенными конструкциями после оптимизации равен 162,3°, что на 2,28% меньше, чем в пороге базового кузова, и на 1,8% меньше, чем в пороге кузова со склеенными конструкциями без оптимизации.

Оценка массы до и после оптимизации показывает, что масса капота автомобиля снижена на 5,73%, крышки багажника на 8,45%, а дверей на 2,68%.

Разработанная методика также была апробирована на автомобиле Nissan Rogue. При использовании клеевых соединений в кузове автомобиля общая масса клеевого соединения составляет 0,35 кг, из которых масса клея, используемого в крыше, составляет 0,11 кг. При боковом ударе в соответствии со стандартом Euro NCAP перемещение автомобиля уменьшается на 1,4%. С целью снижения массы параметры склеенных панелей автомобиля были оптимизированы. Полученные результаты параметров показаны на Рис. 15.

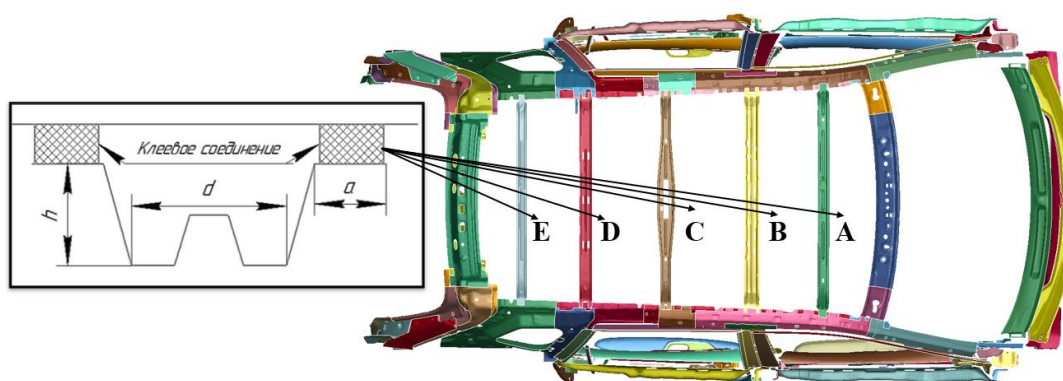


Рис. 15. Оптимизируемые зоны и параметры панелей автомобиля (Nissan)

Параметры панелей крыши автомобиля после оптимизации представлены в Таблице 2. После оптимизации масса конструкций уменьшается на 2,21 кг, что на 11,1% меньше, чем у исходного варианта. Перемещения автомобиля при боковом ударе тоже уменьшаются (на 4 мм).

Таблица 2.

Параметры панелей и крыши после оптимизации

	a, мм	d, мм	h, мм	t, мм	Масса	Боковое перемещение, мм
A	11,21	27,62	9,66	0,73	0,45	640
B	11,96	41,6	11,97	1,19	0,84	
C	10,48	24,96	7,74	0,57	0,33	
D	9,24	38,75	9,18	0,59	0,35	
E	10,76	25,58	7,76	0,83	0,4	
Внешняя панель крыши				0,8	15,4	

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана методика улучшения параметров кузовов легковых автомобилей на стадии проектирования за счет применения в них клеевых соединений с заданными свойствами, позволяющая создавать конструкции с оптимальными параметрами (по прочности, жесткости, ударопрочности и массе);

2. Предложена расчетная зависимость, которая помимо свойств клеевого материала (модуль Юнга, предел текучести, модули упругости и энергоемкости) учитывает толщину клеевого слоя и скорость деформации. Использование предлагаемого метода коррекции материала клеевого соединения с учетом этих двух факторов позволяет с хорошей точностью (в среднем 5%) моделировать разрушение клеевого слоя и деформацию конструкции при ударной нагрузке, в то время как не учет их приводит к большим погрешностям моделирования (более 15%);

3. Проведены экспериментальное и теоретическое исследования влияния толщины клеевого соединения (0,5 мм – 2 мм) для конструкций панелей и элементов каркасного типа автомобиля при ударных нагрузках со скоростью 6,66м/с (при осевом ударе) и 6,87м/с (при боковом ударе) и рекомендованы наилучшие значения толщин для применения (толщина клея 0,2 – 0,5 мм (для клея Henkel EP5055) является рекомендуемой (наилучшей) для склеивания панелей автомобиля);

4. Экспериментально определены механические свойства клеев, применяемых для соединения элементов конструкции транспортных средств и оценено влияние толщины клеевого соединения и скорости деформации на прочность склеенной конструкции. В том числе получено, что клеевое соединение на базе клея Henkel EP5055, применяемого в автомобилестроении, при ударных нагрузках со скоростью 6,66 м/с (при осевом ударе) и 6,87м/с (при боковом ударе) подвержено растрескиванию и разрушению. При этом в аналогичном сварном соединении не происходит разрушения точек сварки, что позволяет определить границы применимости клея (чтобы прочность склеенной конструкции при ударе была не хуже, чем у сварной, параметры клея σ_{rr}^F и τ^F

должны быть не ниже 290 МПа и 310 МПа соответственно для соединения листов из стали 08пс с толщиной листов 1мм);

5. При использовании КЭ с размером грани $2 \times 2 \text{ мм}^2$ и двух слоя КЭ по толщине клея, можно с достаточно высокой точностью вычислить разрушающую силу и оценить разрушение клеевого слоя при квазистатическом и ударном нагружениях (погрешность не более 5%);

6. Применение клеевого соединения и клея с заданными свойствами на базе разработанной методики в конструкциях кузовов автомобилей Honda Accord и Nissan Rogue (в местах, расположенных между внутренними и внешними панелями крыши, дверей, капота и крышки багажника автомобилей), позволило снизить перемещение (на 2,5% при фронтальном ударе и 3,2% при ударе сзади) и повысить энергоемкость конструкций (на 5,3% при боковом ударе и незначительно при фронтальном ударе и ударе сзади);

7. Включение в совместную работу всех элементов конструкции (внешнюю и внутреннюю панели) при использовании клеевого соединения позволило на базе параметрической и топологической оптимизации применительно к крыше и навесным деталям автомобилей Honda Accord и Nissan Rogue уменьшить массу конструкций (до 11,1%) при обеспечении требований по прочности, жесткости, энергоемкости и пассивной безопасности автомобилей по стандартам IIHS, NHTSA и Euro NCAP.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Лю И, Зузов В. Н., Исследование влияния размеров конечных элементов на точность моделирования клеевого соединения в конструкциях // Известия МГТУ МАМИ. 2021. №3 С. 31-41. (1,1 п.л. / 0,36 п.л.);

2. Лю И, Зузов В. Н., Численное моделирование клеевого соединения в автомобильных конструкциях при квазистатическом нагружении с использованием усовершенствованной модели его свойств. // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2022. №3. С. 84-97 (1,4 п.л. / 0,46 п.л.);

3. Лю И, Зузов В. Н., Гончаров Р. Б., Сравнительное исследование напряжено-деформационных состояний склеенных и сварных конструкций автомобиля при ударных нагрузках. // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета Серия «Машиностроение». 2022. №3. С. 64-77 (1,4 п.л. / 0,65 п.л.);

4. Лю И, Зузов В. Н., Моделирование клеевого соединения в автомобильных конструкциях при динамическом и ударном нагружении с использованием модифицирования свойств материала. // Сборник докладов: Будущее машиностроения России: в 2 томах. Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). 2021. С. 117-127. (1,1 п.л. / 0,44 п.л.);

5. Лю И, Зузов В. Н., Исследование влияния применения клеевого соединения в двери на пассивную безопасность автомобиля при боковом ударе. // Сборник статей XV Международной научно-практической конференции «Перспективные направления автотранспортного комплекса» 2021 года Пенза, 2021. С. 38-45. (0,8 п.л. / 0,38 п.л.);

6. Лю И, Зузов В. Н., Улучшение ударопрочных характеристик кузова автомобиля за счет применения клеевых соединений. // Сборник докладов: Будущее машиностроения России: в 2 томах. Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). 2020. С. 36-44. (0,9 п.л. /0,45 п.л.).