

11463427

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ имени Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи
УДК 629.11.011

КИРИЛЛОВ Андрей Порфирьевич

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ДЕТАЛЕЙ КУЗОВА
ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ИХ МАССЫ

05.05.03 - Автомобили и тракторы

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1987

Работа выполнена в Московском Ордена Ленина, Ордена
Октябрьской Революции и Ордена Трудового Красного Знамени
Высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Н.Ф.БОЧАРОВ

Научный консультант - кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
В.Н.ЗУЗОВ

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор В.С.СТРЕЛЯЕВ
кандидат технических наук
С.П.КОНТАНИСТОВ

Ведущее предприятие - Производственное объединение
Ижевский машиностроительный
завод (ПО Ижмаш)

Защита состоится 5 октября 1987г. на заседании специали-
зированной совета К 053.15.10 МВТУ имени Н.Э.Баумана по
транспортному транспорту, ва,
2-я Бауманская

С диссертацией
Н.Э.Баумана

Автор

Отзыв

высылать

Ученый совет
Специализированный
доктор технических наук

Объем I
Л-74333

М 463427

Актуальность темы. В "Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года" указывается на необходимость "... в автомобильной промышленности ... уменьшить на 15-25 процентов удельную металлоемкость ... автомобилей". Наиболее металлоемкой частью легкового автомобиля является его кузов, масса и себестоимость которого превышает 50% в общей массе и себестоимости всего автомобиля. При этом одним из наиболее важных направлений снижения массы автомобильного кузова является снижение металлоемкости его навесных деталей, масса которых составляет от 25 до 35% от массы "черного" кузова легкового автомобиля.

Однако снижение металлоемкости деталей и узлов автомобилей неразрывно связано с решением вопросов обеспечения их жесткости, прочности. При этом создание новых конструкций минимальной массы невозможно без разработки достаточно совершенной методики оптимального проектирования автомобильных конструкций, базирующейся на многовариантном расчетном исследовании их напряженно-деформированного состояния (НДС).

Цель работы - разработка методики определения НДС кузова легкового автомобиля и его навесных деталей и поиска минимума массы навесных деталей при сохранении требуемой жесткости и прочности.

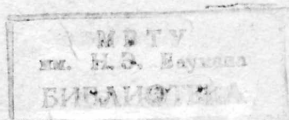
Объект исследования - несущий кузов легкового автомобиля и его навесные детали.

Методы исследования. Теоретические и экспериментальные исследования кузова легкового автомобиля и его деталей проведены в статической постановке (так как определяющими являются жесткостные характеристики) на базе метода конечных элементов, методов математической оптимизации и методов электротензометрирования.

Научная новизна. Разработаны принципы построения рациональных конечно-элементных моделей (КЭМ) кузова легкового автомобиля и его навесных деталей и сделаны выводы о границах их применения.

Исследованы вопросы совместности усилий и деформаций кузова легкового автомобиля и его деталей, проведена оценка НДС навесных деталей автомобильного кузова.

Разработан и реализован алгоритм оптимального проектирования деталей кузова легкового автомобиля по критерию минимума



1463427

массы при условии выполнения геометрических, технологических, жесткостных и прочностных ограничений.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением научно-обоснованных положений и допущений теории упругости с проведением оценки погрешности допущений. Достоверность расчетных величин, полученных в работе, устанавливалась путем сравнения с экспериментальными данными, полученными автором, а также с известными решениями других исследователей.

Практическая ценность. Разработанная методика оценки НДС и поиска оптимальных решений деталей кузова легкового автомобиля позволит на стадии проектирования и доводки конструкции кузова получить требуемые жесткостные и прочностные характеристики деталей при минимальной металлоемкости. Это ускоряет проектирование и повышает качество новых моделей автомобилей.

Проведен многовариантный анализ конструкций деталей кузова легкового автомобиля и разработаны рекомендации по снижению их массы.

Реализация результатов работы. Использование разработанной методики оптимизального проектирования кузовных деталей позволило на 10% снизить металлоемкость крышки багажника автомобиля "Москвич". В действующее производство АЗЛК внедрена конструкция крышки багажника сниженной массы, при этом получена экономия 101 т стального листа в год.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры "Колесные машины" МВТУ им. Н.Э.Баумана ежегодно (1983 ... 1987гг.); на Всесоюзной конференции "Научно-техническое сотрудничество" Предприятие-ВУЗ" (на примере автомобильной промышленности) (Москва, 1980г.); на Всесоюзной конференции "Методы снижения шума и вибраций автомобилей и двигателей" (Москва, 1983г.); на I и II Всесоюзных научно-технических совещаниях "Динамика и прочность автомобиля" (Москва, 1984 и 1986гг.); на заседаниях НТС УССР АЗЛК (Москва, 1984г.); на Всесоюзном семинаре "Проблемы совершенствования автомобильной техники" (Москва, 1986г.); на заседании НТС УССР ПО-Ижмаш (Ижевск, 1987г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в шести научных работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов работы, выводов, списка литературы,

приложения и содержит 106 страниц машинописного текста, 1 таблицу, 39 рисунков, 9 страниц приложения, список литературы из 70 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Создание несущих кузовов легковых автомобилей уменьшенной металлоемкости, обеспечивающих длительную и надежную работу автомобиля, требует совершенствования их конструктивных параметров, а также разработки эффективной методики оценки НДС и минимизации массы деталей автомобильного кузова.

Одним из основных факторов, определяющих формы и конструкцию кузова легкового автомобиля и его деталей, являются нагрузки, возникающие в процессе эксплуатации. В общем случае они носят случайный характер. Поскольку оптимальное проектирование кузовных конструкций, базирующееся на исследовании их НДС при случайном нагружении, представляет слишком большую проблему, то в данной работе рассматриваются вопросы оценки прочности и жесткости кузова легкового автомобиля и его деталей в статической постановке при действии максимальных нагрузок, возникающих в наиболее тяжелых режимах работы автомобиля. Метод расчета на статические нагрузки позволяет рационально распределить металл в конструкции деталей кузова, с достаточной точностью оценить их жесткость и прочность, снизить металлоемкость путем преобразования несущей конструкции в соответствии с действующими силовыми потоками.

В настоящее время для исследования НДС сложных нерегулярных кузовных конструкций наибольшее распространение получил вариационно-разностный метод конечных элементов (МКЭ). Применительно к исследованию несущих систем автомобилей он использовался в работах Зузова В.Н., Мажлумяна Р.А., Синильникова О.В. и др. МКЭ дает возможность описать конечными элементами любой по форме объект при любых граничных условиях независимо от закона изменения внешней нагрузки, и позволяет получить с наперед заданной точностью оценку НДС конструкции, что особенно важно при проведении оптимизационных расчетов деталей кузова. В то же время необходимо исследовать особенности построения рациональных КЭМ кузова и его деталей, обеспечивающих получение заданной точности при минимуме затрат труда и времени на подготовку исходных данных, решение задачи и обработку результатов счета.

Анализ имеющихся в литературе сведений показал, что при оптимальном проектировании деталей автомобильных кузовов целесообразно в качестве критерия оптимальности принимать минимум массы деталей при наложении геометрических, технологических, жесткостных и прочностных ограничений (по сравнению с критерием равнопрочности конструкций). При этом выбор метода поиска оптимальных решений, формы учета ограничений тесно связан с характером НДС деталей кузова, выбранным методом анализа НДС, сложностью используемых расчетных моделей и требует специального исследования для групп деталей автомобильного кузова, обладающих сходными конструктивными элементами.

Задачи диссертационной работы:

- разработать методику расчетного исследования НДС навесных деталей кузова легкового автомобиля и исследовать совместность усилий и деформаций кузова и его деталей;
- разработать принципы построения рациональных КЭМ кузовов легковых автомобилей, навесных деталей автомобильного кузова, в том числе с целью проведения их оптимального проектирования;
- разработать методику оптимального проектирования навесных деталей кузова легкового автомобиля по критерию минимума массы;
- выработать рекомендации по изменению конструкции деталей автомобильного кузова с целью снижения его массы.

Исследование навесных деталей невозможно без учета их взаимодействия с кузовом. Особенности конструкции кузова легкового автомобиля, действующих на него нагрузок и специфика применения МКЭ к расчету тонкостенных конструкций легли в основу построения расчетных КЭМ кузова. На основании анализа работы элементов конструкции кузова для исследования его НДС рекомендуется три КЭМ различной сложности: "упрощенная", "базовая" и "уточненная".

Так, упрощенная оболочечно-стержневая КЭМ кузова была использована для предварительного качественного анализа жесткостных характеристик кузова от действия внешних нагрузок, оценки влияния конструктивных особенностей автомобиля на деформированное состояние кузова. При этом в качестве конечных элементов использовались: стержневой элемент с 12-тью степенями свободы, учитывающий эффект поперечного сдвига, и плоские 4- и 3-угловые элементы пластины согласованного типа, имеющие по 6 степеней свободы в каждом узле. Узловые точки стержней располагались в местах конструктивных соединений элементов каркаса и в местах

приложения сосредоточенных нагрузок. В случае большого разброса жесткостных характеристик стержневых элементов в пределах их длины (более 10%), элементы дробились на более короткие введением дополнительных узлов. Моделирование различных стержневых элементов автомобильного кузова в разрабатываемых КЭМ осуществлялось с учетом величины вклада этих элементов в НДС кузова.

Для количественной оценки деформированного и качественной оценки напряженного состояния кузова, исходя из предварительного анализа работы элементов конструкции с использованием упрощенной КЭМ, была разработана базовая оболочечно-стержневая КЭМ автомобильного кузова с более высокой степенью дискретизации зон с особенностями, мест резкого изменения геометрии и жесткостных характеристик, высоких градиентов напряжений. Величина относительного размера элементов на различных участках базовой КЭМ выбиралась исходя из топологии конструкции, вида нагружения, граничных условий и ожидаемой точности решений, с учетом накопленного автором и другими исследователями опыта. При разбиении каркаса на стержневые элементы обеспечивалось соотношение высоты поперечного сечения к длине стержней не более чем 1:5. Разбиение обшивки на плоские элементы осуществлялось исходя из предварительного анализа распределения силовых факторов по группам деталей кузова, а также с учетом совместности деформаций с несущим каркасом. Так, для моделирования КЭ деталей пола и крыши автомобильного кузова с целью учета изгибного напряженного состояния необходимо использование конечно-элементной сетки порядка не менее чем 3х3. Для получения высокой точности при аппроксимации пологих оболочек, имеющих изгибное напряженное состояние, плоскими КЭ необходимо такое разбиение, которое обеспечивает неплоскостность между соседними элементами не более 5^0 . В зонах с большими градиентами напряжений (опоры пружин подвески) использовалась более мелкая КЭ сетка, причем размер элемента сетки определялся исходя из ожидаемой точности решения. Для уменьшения разброса жесткостей соседних плоских элементов измельчение КЭ сетки при переходе к колесным нишам осуществлялось постепенно с учетом требований к углам и соотношениям сторон плоских конечных элементов.

Для уточнения уровня деформаций и характера распределения напряжений по кузову легкового автомобиля и его деталям, а также для окончательной проверки предлагаемых мероприятий по изменению

конструкции кузова была построена уточненная КЭМ кузова, в которой практически все стержни смоделированы оболочечными конечными элементами. Моделирование тонкостенных стержней плоскими конечными элементами осуществлялось в соответствии с особенностями их конструкции, а также характером распределения изгибающих и крутящих моментов по длине балок каркаса кузова. Так как в конструкции кузова легкового автомобиля используются тонкостенные стержни, то стенки стержней (работающие, в основном, в условиях сдвига и растяжения-сжатия) могут быть смоделированы одним или двумя рядами оболочечных элементов. При этом с целью уменьшения ожидаемых ошибок округления для аппроксимации балочных элементов кузова использовались в основном прямоугольные плоские элементы, имеющие соотношение сторон не менее 1:5. Применение только оболочечных элементов позволило более точно аппроксимировать сложные конструктивные стыки отдельных стержневых элементов (например место соединения порога пола с боковой дверной стойкой, боковой, аркой заднего колеса и лонжероном пола в кузове легкового автомобиля), а также позволило учесть деформацию поперечных сечений.

Основные характеристики рассмотренных КЭМ и их погрешности по деформациям и напряжениям, оцениваемые путем сравнения результатов расчетного и экспериментального исследований, приведены в таблице I.

Таблица I

Основные характеристики конечно-элементных моделей кузова

Наименование КЭМ кузова	Тип конечного элемента	Число узлов Число элементов	Относи- тельное время счета	Погреш- ность по деформа- циям	Погреш- ность по напряже- ниям
"Упрощенная"	стержневой	$\frac{123}{180}$	0,15	50%	100%
"Базовая"	плоский элемент пластины, стержневой	$\frac{405}{537}$	1,0	30%	60%
"Уточненная"	плоский элемент пластины	$\frac{1310}{1350}$	6,1	15%	30%

Расчеты автомобильного кузова выполнялись на ЕС-1033 и ЕС-1055 по программе "АРЕМАС", разработанной на кафедре "Колесные машины" МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Теоретический анализ НДС кузова легкового автомобиля и его элементов позволил определить распределение деформаций и напряжений по элементам конструкции, выявить места пониженной жесткости и концентрации напряжений, оценить нагруженность деталей кузова.

В результате проведенных исследований установлено, что рассматриваемый кузов легкового автомобиля обладает достаточно высокой жесткостью. При кручении передняя и задняя части кузова имеют относительно небольшие перемещения по сравнению со средней частью и закручиваются почти как жесткое целое, что говорит об их более высокой крутильной жесткости по отношению к средней части кузова. Наибольших величин достигают деформации проемов боковых дверей (до 2.0 мм) и лобового стекла (до 1.2 мм).

Исследование напряженного состояния элементов кузова показало, что уровень напряжений при нагружении изгибом относительно невелик и не превышает 50.0 МПа, в то же время уровень напряжений при нагружении кручением существенно выше. При этом наиболее высокие значения напряжений имеют место в опорах пружин передней (до 62.0 МПа) и задней подвесок (до 174.0 МПа). Уровень напряжений в зоне нижнего крепления передней оконной стойки достигает 124.0 МПа, в зоне дверного проема — до 66.0 МПа, в зоне крепления задней стойки к крыше — до 140.0 МПа, в зоне соединения лонжерона с четвертой поперечиной — до 84.0 МПа.

В связи с тем, что несущий каркас автомобильного кузова сильно напряжен, возможности снижения массы самого кузова сильно ограничены. Поэтому одним из наиболее важных направлений снижения металлоемкости автомобильных кузовов является снижение массы его навесных деталей, которые имеют жесткую связь с кузовом только через петли навески и защелку замка, а также взаимодействуют с ним через резиновые уплотнители. В связи с этим была исследована совместность усилий и деформаций кузова легкового автомобиля и его деталей. Проведенный анализ показал, что навесные детали воспринимают ограниченную долю внешних нагрузок, действующих на автомобильный кузов, и имеют вследствие этого низкий уровень напряженного состояния. Это обстоятельство накладывает отпечаток на мероприятия по снижению массы конструкции.

Для определения влияния конструкции передней и задней подвесок на НДС кузова были разработаны стержневые КЭМ передней независимой подвески автомобиля совместно со стабилизатором и КЭМ задней зависимой подвески автомобиля, которые были объединены с КЭМ кузова с целью дальнейшего совместного анализа. Результаты расчета при кососимметричном нагружении свидетельствуют о том, что большая доля скручивающего момента (до 35%) воспринимается кронштейнами крепления стабилизатора к кузову (нагрузки здесь достигают значений 4800,0 Н). Соответственно от скручивающего момента разгружаются детали передней части кузова и уменьшается угол закручивания в базе на $10 \pm 15\%$. Вследствие зависимого характера работы задней подвески также до 30% скручивающего момента перераспределяется на кронштейны крепления задней подвески к кузову, где возникают большие нормальные усилия (до 700,0 Н).

Большие сдвиговые деформации проемов боковых дверей при кручении (до 2,0 мм), а также практически беззазорная конструкция дверных замков определили необходимость исследования совместности усилий и деформаций кузова и его дверей. С этой целью была разработана оболочечно-стержневая КЭМ боковой двери. Совместный анализ КЭМ кузова и КЭМ боковых дверей показал, что при кососимметричном нагружении учет влияния боковых дверей приводит к увеличению расчетной крутильной жесткости автомобильного кузова на 20% и существенному изменению картины его НДС, при этом точность расчетов улучшается на 15%, сдвиговая нагрузка в защелке замка достигает величины 700,0 Н.

Проведенные исследования показали также, что вклейка ветрового стекла практически исключает деформации проема ветрового стекла, и благодаря этому жесткость кузова при нагружении кручением возрастает на 10%.

Одновременно показано, что вследствие небольших деформаций проема задней двери и применения податливой в боковом направлении защелки замка нагрузки, определяемые совместными деформациями кузова и задней двери (или крышки багажника), оказываются пренебрежимо малыми. Поэтому необходим учет деформированного состояния кузова при исследовании НДС боковых дверей и, с другой стороны, возможно самостоятельное исследование НДС капота, крышки багажника (задней двери) при упрощенных граничных условиях.

В работе принимается условное деление максимальных квазистатических нагрузок, действующих на навесные детали автомоби-

ного кузова, на нагрузки, возникающие вследствие деформаций проемов кузова, и на внешние нагрузки. Одновременно нагрузки можно подразделить по группам типовых деталей, обладающих общностью конструкции и сочетаний нагрузочных режимов: группе боковых дверей и группе капота, крышки багажника. Для указанных групп навесных деталей на основе проведенного анализа вопросов эксплуатации кузовов и обзора литературных источников автором выделены возможные случаи нагружения деталей автомобильного кузова.

При разработке методики расчета НДС навесных деталей так же как и для кузова одной из основных задач является построение их рациональных КЭМ. С целью обоснования принципов построения рациональных КЭМ навесных деталей предлагается ряд расчетных моделей: "упрощенная" КЭМ (30 узлов, 56 элементов), "базовая" КЭМ (224 узла, 292 элемента) и "уточненная" КЭМ (1050 узлов, 1051 элемент). При построении указанных КЭМ использовался тот же подход, что и при разработке моделей кузова. Уровень дискретизации зон с особенностями неавансовой детали, а также число узлов и элементов, образующих КЭМ, определялись в соответствии с целями. Расчеты исходили из предварительного анализа работы элементов конструкции.

Сравнение результатов расчетного и экспериментального исследований показало, что для качественного анализа жесткостных характеристик навесных деталей автомобильного кузова, а также для определения влияния конфигурации и геометрических характеристик подкрепляющего каркаса на жесткостные свойства навесной детали, целесообразно использовать упрощенную оболочечно-стержневую КЭ модель детали с упрощенным описанием зон, моделируемых оболочечными элементами, и насчитывающую 20 + 50 узлов. Погрешность по перемещениям упрощенной КЭМ составляет в среднем 50%.

Для проведения многовариантных исследований НДС навесной детали автомобильного кузова при разработке предложений по повышению жесткостных характеристик или снижению металлоемкости детали необходимо использовать оболочечно-стержневую КЭ модель детали с невысокой степенью дискретизации зон, моделируемых оболочечными элементами, и насчитывающую от 100 до 300 узлов. При этом для точного моделирования жесткостных свойств необходимо включение в КЭ модель детали элементов, моделирующих петли навески, в этом случае погрешность по перемещениям не превышает 30%, по напряжениям - 50%.

Для уточненного анализа НДС навесной детали и с целью окон-

чательной оценки эффективности предложенных конструктивных изменений, направленных на снижение массы, целесообразно применять уточненную КЭМ навесной детали, использующую в основном оболочечные элементы и насчитывающую около 1000 узлов. В уточненной КЭМ необходимо моделировать соединение завальцовкой наружной и внутренней панелей таким образом, чтобы оно воспринимало усилия, но не моменты. При этом погрешность по перемещениям не превышает 10%, по напряжениям 30% соответственно.

Ввиду того, что навесные детали имеют связь с кузовом автомобиля как через петли навески, замок, так и через резиновое уплотнение, то отдельно исследовался вопрос учета работы уплотнителя и его влияния на НДС системы "кузов-навесная деталь". Проведенными исследованиями установлено, что моделирование работы резинового уплотнителя навесной детали стержневыми элементами, работающими на растяжение-сжатие, с полученными из эксперимента характеристиками, необходимо только в случае использования жестких ("баллонных") уплотнителей. В случае использования податливых ("губчатых") уплотнителей возможно упрощенное описание граничных условий.

Проведенный анализ возможных случаев нагружения навесных деталей автомобильного кузова выявил случаи нагружения, характеризующиеся максимальными деформациями и уровнем напряжений. Так, максимальные деформации крышки багажника (капота) появляются в случаях нагружения "изгиб и кручение навесной детали вследствие заклинивания петель навески", а максимальные напряжения (до 40.0 МПа) возникают в случае нагружения "кручение детали при поднятии одного из углов". Соответственно максимальные деформации и напряжения (до 100.0 МПа) боковой двери автомобильного кузова возникают в случае нагружения "продольный изгиб двери при кручении кузова". Большие величины (до 140.0 МПа) локальных напряжений в зоне крепления ограничителя боковой двери соответствуют случаю нагружения "срабатывание ограничителя максимального угла открытия двери". Этот и остальные случаи нагружения являются вспомогательными и используются для оценки величин локальных напряжений.

Создание кузова легкового автомобиля минимальной массы неразрывно связано с разработкой методики оптимального проектирования автомобильных кузовов и их деталей. Применительно к специфике оболочечно-стержневых кузовных конструкций возможна реали-

зация следующих направлений оптимизации: параметрической оптимизации толщин тонколистовых панелей или площадей и моментов инерции сечений подкрепляющего каркаса; оптимизации структуры (возможной совокупности связей между узловыми точками конструкции); оптимизации формы конструкции; оптимизации топологии несущей структуры (координат узлов). Но возможности практического использования указанных направлений оптимизации неравноценны. Так, форма наружных деталей кузова в значительной мере определена функциональными и стилистическими ограничениями. С другой стороны, для сложных основных сечений автомобильного кузова и его навесных деталей, для описания которых требуется использование десятков проектных параметров и наложение большого количества трудноформализуемых технологических ограничений, решение задачи оптимального проектирования сечений приводит к сильному возрастанию затрат машинного времени, в связи с этим целесообразно проводить поиск рациональных решений. Поэтому с учетом необходимости сокращения затрат машинного времени предлагается следующая стратегия оптимального исследования деталей кузова легкового автомобиля.

1. На основе анализа НДС различных конструктивных вариантов навесной детали выбрать рациональную конфигурацию и геометрические характеристики сечений подкрепляющего каркаса.

2. Оптимизировать по критерию минимума массу топологию полученной конфигурации подкрепляющего каркаса и толщины элементов каркаса и панелей. При этом для снижения размерности решаемой задачи необходимо принимать минимальное число наиболее "значимых" узловых точек, для которых осуществляется варьирование глобальными узловыми координатами.

3. Оценить эффективность предложенных конструктивных изменений и характер НДС оптимизированной детали с использованием уточненной КЭМ навесной детали.

В работе проведен анализ НДС навесных деталей с использованием различных конструктивных решений, предлагаемых конструкторами ведущих отечественных и зарубежных автомобильных заводов. В результате выбраны рациональные конфигурации и геометрические характеристики сечений подкрепляющего каркаса, обеспечивающие требуемые жесткость и прочность деталей при одновременном снижении металлоемкости. Так, для крышки багажника (капота) наиболее перспективным оказалось использование конфигурации внутренней

панели в виде двух X-образных или Y-образных раскосов (рис.1).

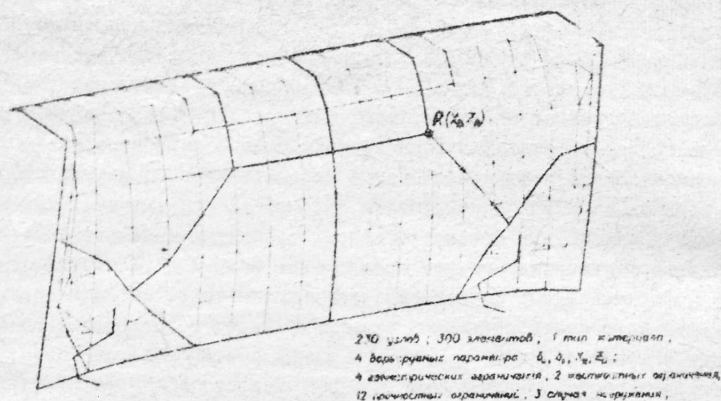


Рис.1 КЭМ навесной детали, используемая в процессе оптимизации

После этого решается задача оптимизации топологии полученной конфигурации подкрепляющего каркаса одновременно с оптимизацией толщины панелей, составляющих деталь. Соответственно в качестве варьируемых параметров выбираем толщины наружной δ_n и внутренней δ_i панелей детали. Кроме того, для варьирования конфигурации несущей внутренней панели необходимо выбирать в качестве варьируемых параметров координаты наиболее "значимых" узловых точек, в которых сходятся основные несущие стержни подкрепляющего каркаса (узел P , рис.1). Таким образом, при формулировке задачи оптимального проектирования навесной детали автомобильного кузова используется не менее четырех варьируемых параметров. На решение задачи наложены геометрические, жесткостные, прочностные и технологические ограничения.

Из-за того, что использовались стандартные программы безусловной минимизации, единственно возможной формой учета ограничений являлось введение штрафных функций, суммируемых с минимизируемой величиной — массой конструкции.

Для учета геометрических ограничений на конфигурацию несущего каркаса внутренней панели достаточно использовать линейные внешние штрафные функции обычного вида.

Учет жесткостных ограничений производился с использованием

известного метода барьерных поверхностей, являющегося разновидностью методов "внутренней точки", при использовании которых создаются сильные барьеры для нарушения принятых ограничений. Метод барьерных поверхностей был модифицирован применительно к специфике решаемой задачи с активными ограничениями по изгибной и крутильной жесткостям детали.

Для учета прочностных ограничений (ненарушения предела текучести материала) целесообразно использовать внешнюю штрафную функцию, являющуюся разновидностью штрафной функции метода пенализирующих констант.

Учет прочностных и технологических ограничений по минимальным значениям толщин панелей, составляющих навесную деталь, осуществлялся с использованием внешних штрафных функций линейного вида. Указанная совокупность ограничений легко может быть расширена в случае необходимости.

Для проведения оптимального проектирования навесных деталей была выбрана оболочечно-стержневая КЭМ, насчитывающая от 200 до 300 узлов (рис.1), что обеспечило приемлемые затраты машинного времени на решение оптимизационной задачи с заданной точностью. Окончательная оценка НДС оптимизированной по массе конструкции и его сравнение с НДС исходного варианта проводились с использованием уточненной оболочечной КЭМ, насчитывающей около 1000 узлов. Ее применение подтвердило сохранение заданных жесткостных свойств и уровня напряжений для оптимизированной по массе конструкции навесной детали.

Так как вопрос сравнения эффективности алгоритмов оптимального проектирования упругих конструкций полностью не исследован, было предпринято сравнение наиболее широко используемых методов математической оптимизации: метода координатного спуска, метода деформируемого многогранника, а также квазиньютоновского метода. Проведенные исследования показали, что для оптимального проектирования кузовных деталей наиболее эффективно применение квазиньютоновского метода с конечно-разностной аппроксимацией производных, при этом используется не более 10-ти итераций.

Процесс оптимизации с применением градиентных методов чувствителен к выбору начальных условий, поэтому с целью выбора рациональной по затратам машинного времени исходной точки проектирования первые две-три итерации были проведены по методу усиления перегруженных и ослабления недогруженных элементов конструк-

ции.

С целью повышения эффективности применяемых алгоритмов, увеличения надежности поиска и получения соответствующей экономии машинного времени перед проведением оптимального исследования были определены рациональные значения управляющих параметров используемых программ оптимизации.

Проведенные исследования показали, что для навесных деталей кузова легкового автомобиля вследствие невысокого уровня действующих в них напряжений активными ограничениями, определяющими ход оптимального проектирования детали, являются жесткостные ограничения на максимальные деформации детали в целом.

В результате использования предлагаемой методики оптимального проектирования навесных деталей кузова для конструкции крышки багажника, имеющей конфигурацию внутренней панели в виде двух Y-образных расколов, поставленных симметрично, получено 10%-ное снижение массы в сравнении с серийной конструкцией крышки за счет утонения толщины внутренней панели до 0.6 мм при сохранении требуемых жесткостных свойств и уровня действующих напряжений.

Предложенная методика оптимального проектирования, апробированная на исследованиях крышки багажника, применима для проектирования других навесных кузовных деталей, таких как капот, двери и съемные крылья.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании анализа результатов проведенных исследований разработаны принципы построения рациональных конечно-элементных моделей кузова легкового автомобиля, обеспечивающих получение требуемой точности расчетов при минимальных затратах времени на решение задачи и сделаны выводы о границах их применения.

2. Создана методика расчетного исследования напряженно-деформированного состояния навесных деталей кузова легкового автомобиля: разработаны принципы построения рациональных конечно-элементных моделей деталей кузова; выделены наиболее опасные по деформациям и напряжениям режимы нагружения навесных деталей и проведено исследование их НДС.

3. Исследование вопросов совместности усилий и деформаций кузова и его деталей показало, что при анализе общей прочности

и жесткости кузова легкового автомобиля с целью повышения точности получаемых результатов в расчетную модель кузова необходимо включать элементы, моделирующие упругие свойства передней и задней подвесок автомобиля со стабилизаторами, а также элементы, моделирующие боковые двери кузова в закрытом положении и вклеенное ветровое стекло.

4. Сравнительный анализ результатов расчетного и экспериментального исследований показал удовлетворительную сходимость полученных данных и возможность использования разработанной методики в многовариантных статистических расчетах НДС деталей кузова легкового автомобиля. Установлено, что навесные кузовные детали характеризуются невысоким уровнем действующих эквивалентных напряжений, и поэтому имеются возможности снижения их металлоемкости.

5. Разработана методика оптимального проектирования деталей кузова легкового автомобиля по критерию минимума массы при условии выполнения геометрических, технологических, жесткостных и прочностных ограничений.

6. Проведен многовариантный расчетный анализ конструктивных вариантов навесных деталей кузова сниженной массы. В результате использования предлагаемой методики оптимального проектирования кузовных деталей получено 10%-ное снижение металлоемкости крышки багажника легкового автомобиля. В действующее производство АЗЛК внедрена конструкция крышки багажника с утолщенной внутренней панелью и измененными сечениями подкрепляющего каркаса, при этом получена экономия 101 т стального листа в год.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах.

1. Исследования напряженно-деформированного состояния кузова легкового автомобиля с целью снижения его веса/В.Н.Зузов, Н.Ф.Бочаров, А.П.Кириллов и др. // Научно-техническое сотрудничество "Предприятие - ВУЗ" (на примере автомобильной промышленности): Тез. докл. Всесоюз. конф. - М., 1980. - С.31.

2. Бочаров Н.Ф., Зузов В.Н., Кириллов А.П. Исследование напряженно-деформированного состояния кузова легкового автомобиля и его навесных деталей с целью снижения его массы // Динамика и прочность автомобиля: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещания. - М., 1984. - С.39.

3. Кириллов А.П., Зузов В.Н. Исследование навесных деталей кузова легкого автомобиля с целью снижения металлоемкости // Динамика и прочность автомобиля: Тез.докл. Второго Всесоюз. научн.-техн. совещания. - М., 1986. - С.51.

4. Зузов В.Н., Кириллов А.П. Расчет несущих систем автомобилей // Труды МВТУ им.Н.Э.Баумана. - М., 1986. - Вып.463. - С.92-115.

5. Кириллов А.П., Ермаков В.К. Пути снижения материалоемкости навесных деталей автомобильного кузова // Проблемы совершенствования автомобильной техники: Тез.докл. Всесоюз. семинара. - М., 1986. - С.52.

6. Исследования напряженно-деформированного состояния кузова перспективного автомобиля ВАЗ при статическом нагружении: Отчет с НИР/МВТУ им.Н.Э.Баумана; Руководитель Н.Ф.Бочаров. - КС38879; № 79059160; Инв. № 02813000904. - М., 1981. - 152 с.

А.Кириллов

