



ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЕЙ

Долговечность системы подвески и ее отдельных элементов является ключевым компонентом процесса разработки транспортного средства, поскольку она последовательно, постоянно и непосредственно выдерживает большие динамические нагрузки, когда транспортное средство находится в движении. В процессе длительной эксплуатации в сложных дорожных и климатических условиях на первое место выходят показатели усталостной прочности и сопротивления старению материала. Как показало статистическое исследование причин отказа в продолжении эксплуатации автомобилей на долю неисправностей, напрямую связанных с эластичными элементами ходовой части, приходится свыше 16 %, а для автомобилей старше 10 лет – порядка 35 %. Прочность и долговечность этих элементов напрямую влияет на безопасность движения транспортных средств. При этом исследованы основные причины повреждений эластичных элементов подвески. В статье приведен обзор основных направлений и путей улучшения этих показателей. В большинстве случаев исследователи пытаются повысить долговечность систем подвески транспортных средств, изменяя форму деталей и конструктивные параметры подвески, однако наилучшим способом является комбинация модернизации конструктивных характеристик узла с применением современных материалов-эластомеров с предварительным компьютерным моделированием характеристик готового изделия на основе применения численных методов решения нелинейных краевых задач.

Эластомеры, напряжение при кручении, вязкоупругость, эластомерная втулка, элементы подвески.

Эластомерные втулки (сайлентблоки) – это конструктивные элементы, которые используются в системах подвески автомобилей и других транспортных средств для поглощения колебаний и уменьшения передаваемых вибраций с одновременной возможностью передачи усилий в нужных направлениях. Втулка представляет собой полый цилиндр из эластомера, прикрепленный к металлической втулке по его внутренней поверхности и металлической втулке (корпусу) по внешней поверхности. Стальная втулка и корпус соединены с элементами подвески автомобиля и используются для передачи усилий и крутящих моментов от колес через эластомерный материал к шасси. Эластомерная подушка также гасит колебания в соединении, когда оно деформируется из-за относительного движения вала и втулки. При этом соотношение между силой или моментом, приложенным к валу или втулке, и относительными смещениями или вращению нелинейно и демонстрирует вязкоупругие свойства эластомера.

При анализе систем подвески, содержащих втулки, инженеры используют отработанные практические решения, инструменты автоматизированного проектирования, используемые во многих отраслях машиностроения и обрабатывающей промышленности, и особенно стандартный подход, используемый в прикладной механике для определения соотношения сила-смещение резинометаллических шарниров.

Модель, используемая для определения поведения эластомерного материала втулки в ответ на

нагружение, основанная на уравнениях равновесия и уравнениях деформационного смещения для определения соответствующей краевой задачи дает приемлемый результат. Однако из-за нелинейности деформации и реакции эластомера эта процедура обычно не приводит к установлению явной взаимосвязи между силой и смещением. Если сила или смещение изначально заданы, то другое значение определяется путем решения численной краевой задачи. Соотношение «сила-смещение» определяется при этом неявно. Использование этой модели требует многократных численных решений краевой задачи. Это требует значительное количество вычислительных ресурсов, и поэтому нежелательно включать в моделирование динамики нескольких сайлентблоков одновременно. Было обнаружено ограниченное число работ по исследованию определения соотношений «сила-перемещение» для эластомерных втулок в открытом доступе. Эластомерные втулки, представляющие интерес для данного исследования, используются в автомобильных подвесках и относятся к прессованному типу. Из-за природы эластомерного материала соотношение между силами и моментами и их соответствующими перемещениями, и вращениями составляет нелинейный и зависящий от времени. Было также обнаружено, что существуют и другие нелинейности из-за связи между различными режимами деформации. В работе Kadlowec, J et al. [1] продемонстрирован экспериментальный подход к испытаниям эластомеров по отклику системы сайлентблока по одиночным и свя-

занным режимам деформации, а также сравнение упругой деформации втулки с результатами метода конечных элементов для изучения поведения эластомерной втулки. Экспериментальная программа проводилась с целью определения характера силового отклика на радиальные, крутильные и комбинированные деформации. В исследовании [2] Wineman et al. рассматривали это представление как реакцию на соотношение сила-смещение для одинарного отклика эластичной втулки.

Этот подход сочетает в себе нелинейные зависимости от смещения с зависимостью вязкоэластичности от времени и выражается через силу как функцию от релаксации – свойство втулки, представляющее силу, которая возникает, когда втулка подвергается внешнему воздействию. Представлен метод определения функции релаксации силы в экспериментальной программе, в которой втулка подвергается последовательной серии нагружений. В работе [4] развили указанные теоретические модели и предложили метод анализа долговечности для компонентов подвески из вулканизированной резины, применимый для прогнозного установления долговечности изделий на начальной стадии производства. При этом параметры ресурса изделий (деформации, усталостные показатели) определяются методом FEA (конечного элементного анализа). В работе приведена методика отбора показателей, необходимых для моделирования для конкретных автомобильных компонентов, подвески и приведены результаты экспериментального определения усталостных свойств этих деталей.

Кроме того, оценка долговечности эластомерных втулок часто проводилась качественно и производилась путем простой фиксации изменений в стандартных значениях тестовых свойств компонентов и сравнения с более ранними данными [P. M. Lewis, 1980]. Несмотря на то, что этот подход дает определенные результаты, тем не менее он обычно не подходит для критических автомобильных компонентов, требующих количественной оценки срока службы, чтобы прогнозировать ресурс и обеспечить требуемый уровень безопасности. Помимо механических нагрузок и изменения химического состава, экологические проблемы являются еще одним фактором, влияющим на общий срок службы компонентов эластомерных втулок. Воздействие на материалы, работающие в различных средах, может привести к изменению механических свойств, что в конечном итоге повлияет на срок их службы. При оценке общей долговечности эластомерного компонента следует учитывать механические эффекты усталостного разрушения и прочности, а также устойчивость к окружающей среде, связанную с эксплуатационными температурами и давлениями, продемонстрированные Zhang et al.

Продолжение совершенствования имеющихся математических моделей эластомерных втулок связано с активным применением в них интеллектуальных композитных материалов из магнитореологических эластомеров MRE, которые позволяют создавать компоненты подвески с изменяемыми вязкопластичными и

вязкоупругими свойствами. В целом реологические и механические свойства, характерные для эластомеров MRE, были кратко рассмотрены Kwon et al. Главный результат их работы – исследование динамических колебаний с использованием реометра, в установке, использующей регулируемый источник магнитного поля. Характеристики MRE были представлены с изменением развертки амплитуды деформации и развертки угловой частоты. Развертка амплитуды деформации определяла область линейной вязкоупругости (LVE), которая в дальнейшем использовалась в тесте на развертку по частоте. Предел LVE может быть определен на основе теста, а динамическое поведение MRE может быть проанализировано как в линейных, так и в нелинейных условиях. MRE в этом случае представляют из себя вязкоупругие материалы, обладающие способностью накапливать и рассеивать часть энергии во время деформации. Таким образом, динамическое испытание MRE полезно для определения эластичности (модуля упругости) и вязкости (модуля потерь), которые, по сути, описывают реологические свойства MRE. В работе также обсуждалось явление ползучести. Испытание на ползучесть было проведено для анализа зависимости деформации от времени, в течение которого затем была предоставлена информация о поведении материалов при обратном восстановлении после снятия нагрузки. С точки зрения проектирования упругих элементов подвески особенно важен вопрос моделирования их ресурса, а для этого необходимо наличие точных и хорошо согласованных моделей для определения усталостной прочности изделий, эксплуатирующийся в различных условиях. В первую очередь определение результата влияния на долговечность эластомерных материалов изменения температур, влажности, солнечного света, дорожных противогололедных реагентов, воды, масла и прочих эксплуатационных автомобильных материалов. Полученные в таких исследованиях данные представляют из себя ценный результат для практического проектирования упругих втулок из MRE. Также можно исследовать различные воздействия окружающей среды на отказ прочности.

Существующие исследования воздействия на окружающую среду были проведены многими исследователями [1–3], однако они были получены в результате испытаний, проведенных в лабораторных условиях. Экспериментальные условия симулировали различные реальные факторы, способствующие развитию старения материала, однако возможности чрезмерного старения образцов в отличие от реальных действующих факторов являются неоспоримыми. Поэтому интерес представляет получение большого количества репрезентативных данных об изменении свойств эластомеров, применяемых в автомобильных компонентах подвески, с целью получения достоверных методик расчета параметров долговечности и усталостной прочности этих узлов.

С целью определения наиболее часто встречающихся неисправностей подвески легковых автомобилей были обобщены и проанализированы неисправно-

сти, обнаруженные при проведении государственного технического осмотра автомобилей в России за период 2018–2020 год, приведенные в ежегодных отчетах и бюллетенях. Результаты распределения неисправностей, связанных с техническим состоянием упругих втулок и сайлентблоков, приведены в таблице 1.

По результатам обследования было вычислено среднее значение частоты появления неисправностей в зависимости от срока эксплуатации автомобиля. Из таблицы 1 видно, что на автомобилях со сроком эксплуатации до 4 лет самыми слабыми местами являются шаровые шарниры подвески, при этом для автомобилей старше 6 лет и более наибольшая доля неисправностей приходится уже на элементы тормозной системы из эластомеров (пыльники поршня тормозного суппорта, направляющих пальцев тормозной скобы и упругое кольцо поршня), а также на сайлент-блоки и упругие втулки (рычаги, подрамник, крепеж амортизаторов).

Основной интерес представляют собой причины появления указанных неисправностей и выделение

факторов и условий, приводящих к их появлению. Для изучения действующих причин было проведено изучение технического состояния замененных и выбракованных деталей подвески легковых автомобилей класса В и С в научно-исследовательской лаборатории диагностики автомобилей Вологодского государственного университета на материале, предоставленном официальными дилерами Toyota и Nissan, а также независимыми станциями по ремонту автомобилей. Причины выхода из строя деталей определялись визуально путем осмотра, возраст и пробег автомобилей были получены по данным технических центров.

Примеры повреждений сайлентблоков и упругих втулок даны на рисунках 1–3. Распределение причин неисправности сайлентблоков подвески легковых автомобилей дано в таблице 2 и на рисунке 2, а зависимость вероятности неисправности сайлентблоков подвески от возраста и пробега для легковых автомобилей в таблицах 3 и 4.

Таблица 1

Распределение доли легковых автомобилей, у которых обнаружены неисправности шасси (в %)

Неисправность	Описание	Возраст легкового автомобиля, лет						Последствия
		До 2	2–4	4–6	6–8	8–10	Свыше 10	
Углы установки колес	Значения не соответствуют спецификации	0,7	0,9	1,2	3,6	4,2	8,6	Износ шин, ухудшение устойчивости и управляемости
Неисправности подвески	Люфт в шарнирах, трещины чехлов шарниров, повреждения сайлентблоков и упругих втулок	0,4	1,8	4,7	15,3	16,1	18,9	Ухудшение устойчивости и управляемости, вероятность поломки, повышенный износ шин, колебания в рулевом управлении
Шарниры привода и карданные валы	Чехлы негерметичны	0,5	0,9	1,7	1,9	1,4	2,1	Повышенный износ шарниров, опасность внезапной поломки и блокировки колеса
Детали тормозной системы	Повреждены, разгерметизированы, изменили размеры детали из эластомеров	0,2	0,8	2,6	5,8	5,7	6,3	Ухудшение показателей торможения, перерасход топлива, возможность блокировки, увод автомобиля

Таблица 2

Распределение причин неисправности сайлентблоков подвески легковых автомобилей (в %)

Неисправность	Вероятность (%)
Усталостные трещины	87,6
Отрывание внутренней втулки	14,3
Отрывание наружной втулки	0,8
Разрушение эластомера	3,5



Рис. 1. Примеры повреждений упругих опор рычага подвески легкового автомобиля



Рис. 2. Усталостные разрушения опоры рычага подвески (6 лет и 84 тыс. км пробега)



Рис. 3. Старение упругой втулки нижнего крепления амортизатора, приведшее к отрыву эластомера от металла втулки (10 лет и 142 тыс. км пробега)

Таблица 3

Распределение причин неисправности сайлентблоков подвески легковых автомобилей (в %)

Возраст автомобиля, лет	До 2	2–4	4–6	6–8	8–10	Свыше 10
Вероятность возникновения неисправности сайлентблока, %	0,4	1,8	4,7	15,3	16,1	18,9

Таблица 4

Распределение причин неисправности сайлентблоков подвески легковых автомобилей (в %)

Пробег транспортного средства, тыс. км	До 30	30–50	50–70	70–90	90–120	Свыше 120
Вероятность неисправности сайлентблока, %	0,7	3,4	9,8	18,4	26,4	34,6

По итогам проведенных статистических исследований, а также исследования технического состояния сайлентблоков подвески легковых автомобилей можно сделать вывод, что наибольшее значение на вероятность выхода из строя и ограничивает ресурс этих элементов подвески именно возраст автомобиля, влияние пробега более линейно и не дает скачкообразного ухудшения технического состояния указанных выше элементов шасси. При этом рубежным моментом является для исследованных легковых автомобилей достижение пробега в 50–70 тыс. км и возраста 5–6 лет.

Эти данные, наряду с данными визуального осмотра неисправных элементов подвески, подтвер-

ждают факт, что основной причиной выхода из строя является наличие усталостного разрушения материала эластомера упругой втулки или сайлентблоков, при этом для оригинальных деталей подвески этот процесс начинает прогрессировать с 5–6 лет эксплуатации.

При этом данные реальной эксплуатации все же расходятся с результатами лабораторных исследований [4, 5] потому, что в указанных работах практически отсутствовали сведения об отрыве вулканизации эластомера от внутренней или/и внешней втулки и сквозных разрывах, следует также дополнительно исследовать сопоставление данных моделирования изменения виброупругих свойств сайлентблоков и дан-

ных компьютерного моделирования. В этой связи следует развить модель, предложенную в работе [1], на основе данных калибровки ее на практическом материале и введения дополнительных факторов, учитывающих влияние внешних агрессивных явления (влажностно-температурные режимы и влияние дорожных реагентов).

Литература

1. Kadowec, J., Wineman, A. & Hulbert, G. Elastomer bushing response: experiments and finite element modeling. *Acta Mechanica* 163, 25–38 (2003). <https://doi.org/10.1007/s00707-003-1018-1>.
2. Lee, S.B., Wineman, A. A model for nonlinear viscoelastic torsional response of an elastomeric bushing. *Acta Mechanica* 135, 199–218 (1999). <https://doi.org/10.1007/BF01305752>.
3. Pipkin, A. C., & Rogers, T. G. (1968). A nonlinear integral representation for viscoelastic behaviour. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 16(1), 59–72. doi:10.1016/0022-5096(68)90016-1.
4. Математическая модель процесса функционирования сайлентблока на основе элементов Гука и Сен-Венана / Д. А. Тихов-Тинников, В. С. Барадиев, А. И. Федотов, А. В. Алексеев // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2019. – Т. 16, № 6(70). – С. 706–716. – DOI 10.26518/2071-7296-2019-6-706-716.
5. Федотов, А. И. Эмпирические и теоретические предпосылки математической модели процесса функционирования сайлентблоков подвески АТС / А. И. Федотов, Д. А. Тихов-Тинников, В. С. Барадиев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 10(141). – С. 239–247. – DOI 10.21285/1814-3520-2018-10-239-247.

P.I. Smirnov

Vologda State University

APPROACHES TO INCREASING FATIGUE STRENGTH AND DURABILITY OF CARS ELASTIC SUSPENSION ELEMENTS

The durability of the suspension system and its individual components is a key component of the vehicle development process, as it consistently, continuously and directly withstands high dynamic loads when the vehicle is in motion. In the process of long-term operation in difficult road and climatic conditions, the indicators of fatigue strength and resistance to aging of the material come out in the first place. As shown by a statistical study of the reasons for the refusal to continue operating cars, the share of malfunctions directly related to the elastic elements of the chassis accounts for over 16%, and for cars older than 10 years are about 35%. The strength and durability of these elements directly affects the safety of vehicles. At the same time, the main causes of damage to the elastic suspension elements are investigated. The article provides an overview of the main directions and ways to improve these indicators. In most cases, researchers are trying to increase the durability of vehicle suspension systems by changing the shape of parts and structural parameters of the suspension, but the best way is to combine the modernization of the structural characteristics of the assembly using modern elastomer materials with preliminary computer modeling of the characteristics of the finished product based on the use of numerical methods for solving nonlinear boundary value problems.

Elastomers, torsional stress, viscoelasticity, elastomer bushing, suspension elements.