

DOI: 10.12731/2227-930X-2022-12-3-40-50
УДК 629.023

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ КУЗОВА АВТОМОБИЛЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАБОЧИХ И ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ НАГРУЗОК

В.А. Ксенофонтова, Л.А. Кияшко

Статья посвящена исследованию поведения элементов конструкции автомобиля в процессе эксплуатации и в экстремальных условиях, возникающих при дорожно-транспортных происшествиях (ДТП).

В настоящее время перспективным направлением исследований в этой области является разработка методик, основанных на анализе деформированных в результате ДТП элементов конструкции поврежденного автомобиля и восстановление картины энергообмена при ударе.

Исследования выполняются как теоретическими, так и экспериментальными методами. Теоретические исследования основаны на методах теоретической и прикладной механики, сопротивления материалов и теории упругости.

Цель – усовершенствование методики проведения автотехнической экспертизы ДТП.

Метод или методология проведения работы: решение обратных задач механики сплошных сред.

Результаты: разработана методика определения начальной скорости автомобиля перед ДТП по результатам измерения деформированных элементов конструкции. Точность определения начальной скорости автомобиля пропорциональна точности измерения деформаций поврежденного автомобиля.

Область применения результатов: полученные результаты целесообразно применять при проведении автотехнической экспертизы ДТП.

Ключевые слова: моделирование; нагрузки; элементы кузова; энергия деформации; пластические и упругие деформации

MODELING BEHAVIOR OF CAR BODY STRUCTURAL ELEMENTS UNDER THE IMPACT OF WORKING AND EXTREME LOADS

L.A. Kiyashko, V.A. Ksenofontova

The article is devoted to the study behavior of car structural elements during operation and in extreme conditions that occur during road traffic accidents (RTA).

At present, a promising direction of research in this area is the development methods based on the analysis of structural elements of a damaged car deformed as a result an accident and the restoration of the energy exchange pattern upon impact.

Research carried out both theoretically and experimentally. Theoretical studies based on the methods of theoretical and applied mechanics, strength of materials and elasticity theory.

The goal is to improve the methodology for conducting an autotechnical examination of an accident.

Method or methodology of work: *solving inverse problems of continuum mechanics.*

Results: *a technique developed for determining the initial speed of a car before an accident based on the results measuring deformed structural elements. The accuracy determining the initial speed of the car is proportional to the accuracy measuring the deformations damaged car.*

Scope results: *it is advisable to apply the obtained results when conducting an autotechnical examination of an accident.*

Keywords: *modeling; loads; body elements; deformation energy; plastic and elastic deformations*

Введение

Весьма перспективным направлением исследований в области исследования поведения элементов кузова автомобиля при воздействии различных нагрузок является разработка методик, основанных на использовании фундаментальных принципов реологии,

позволяющих по результатам исследования деформированных в результате ДТП элементов конструкции автомобиля идентифицировать картину энергообмена при ударе.

Цель работы

Разработка методики, позволяющей моделировать процессы, протекающие в геометрически сложных объектах, стыках, соединениях, деталях и узлах автомобиля.

Материалы исследования

Основные элементы кузова автомобиля – каркас, боковины, панели пола, стойки, капот, крыша, двери в процессе работы изгибаются под действием рабочих нагрузок, и в критических ситуациях, при ДТП, теряют устойчивость, деформируются, разрушаются. Поведение элементов конструкции кузова моделируют с помощью уравнений теории пластин, стержней, рам, оболочек [1-3,5, 9, 10, 12].

Элементы, форма которых близка к тонкостенным стержням, при нагрузке изгибающим моментом M_u и нагрузкой P_z , претерпевают сложную деформацию, описываемую уравнениями [5]:

$$\frac{J_x E}{1-\nu^2} \varphi^{IV}(z) - \frac{J_y E}{2(1+\nu)} \varphi''(z) = \int_L \frac{\partial P_z}{\partial z} F_s dS + \frac{\partial M}{\partial z}, \quad (1)$$

где J_x, J_y – моменты инерции сечений, E, ν – свойства материала, P_z – силовая нагрузка, F_s – секториальная площадь. $J_y(1+\nu)/J_x$ – изгибно-крутильная характеристика, определяющая величину $\varphi(z)$ закручивания стержня при изгибе и деформацию $\psi(z) = f(E, \nu, J_x, J_y, \varphi)$.

При исследовании потери устойчивости подобных элементов необходимо исследовать уравнение

$$\frac{J_x E}{1-\nu^2} \varphi^{IV}(z) + \left(\frac{J_x + J_y}{F} - \frac{J_y E}{2(1+\nu)} \right) \varphi''(z) = 0, \quad (2)$$

где F – площадь поперечного сечения.

Такие элементы конструкции кузова, как панели пола, капот, двери и др. моделируются с помощью теории пластин [13]. Из-

гиб таких элементов конструкции с учетом воздействия нагрузки $q(x,y)$ описывается уравнением [11]

$$\frac{\partial^4 U_z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 U_z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 U_z}{\partial y^4} = \frac{12(1-\nu^2)}{Eh^3} q(x,y), \quad (3)$$

где U_z – прогиб пластины в направлении z , h – толщина пластины, x,y – декартовы координаты поперечного и продольного сечений.

Для определения изгиба элементов, имеющих округлую конфигурацию можно использовать уравнения в цилиндрических координатах r, φ, z [6]

$$\left(\frac{\partial^2 U_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U_z}{\partial \varphi^2} \right)^2 = \frac{12(1-\nu^2)}{Eh^3} q(r, \varphi), \quad (4)$$

Элементы конструкции в виде пластин кроме поперечной нагрузки подвержены действию продольных сил N_x, N_y . В этом случае необходимо исследовать объект на устойчивость. Для этого применяют уравнение [11]

$$\frac{\partial^4 U_z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 U_z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 U_z}{\partial y^4} = \frac{12(1-\nu^2)}{Eh^3} \left[q(x,y) + N_x \frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 U_z}{\partial y^2} \right], \quad (5)$$

Большое количество элементов кузова имеют незначительную толщину и при этом получают повреждения, которые сравнимы с их толщиной, а в ряде случаев превосходят величину h .

В таких случаях для исследования поведения элементов необходимо применить модифицированные уравнения Кармана [7, 11]

$$\frac{\partial^4 U_z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 U_z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 U_z}{\partial y^4} = \frac{12(1-\nu^2)}{Eh^3} \left[\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 U_z}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 U_z}{\partial x \partial y} + \frac{q(x,y)}{h} \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} = E \left[\left(\frac{\partial^2 U_z}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} \frac{\partial^2 U_z}{\partial y^2} \right]$$

где $\varphi(x,y)$ – функция напряжений, определяющая напряжения в пластине.

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}, \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}, \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}, \quad (7)$$

При движении автомобиля все панели совершают колебательное движение, в этом случае в правой части бигармонического уравнения появляется инерционное слагаемое [4,8]

$$\frac{\partial^4 U_z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 U_z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 U_z}{\partial y^4} = \frac{12(1-\nu^2)\rho}{Eh^2g} \frac{\partial^2 U_z}{\partial t^4}, \quad (8)$$

где ρ – плотность материала панели, g – ускорение свободного падения, t – время.

В реальной ситуации при выполнении расчетов энергию деформации следует принять как сумму:

$$\mathcal{E}_o = \sum_{i=1}^N U_{ij} P_{ij}, \quad (9)$$

где $U_{ij} = \int_0^{P_{ij}} \delta_{ij} dP_{ij}$;

δ_{ij} – деформации, определяемые из матрицы податливости:

$$\begin{bmatrix} \delta_{12}^N \\ \delta_{12}^Q \\ \delta_{12}^M \\ \delta_{12}^{P_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l_1}{EJ} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} \frac{l_1^3}{EJ} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{48} \frac{l^3}{EJ} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{24} \frac{l^3}{EJ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{12} \\ Q_{12} \\ M_{12} \\ P_0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где l – длина элемента конструкции; E, J – характеристики сечения.

При исследовании деформации боковой части двери (рис. 1) различаются локальные повреждения и общая деформация.



Рис. 1. Деформация боковой части двери автомобиля

Локальные повреждения идентифицируются измерением деформаций сечений элементов боковины (рис. 2).

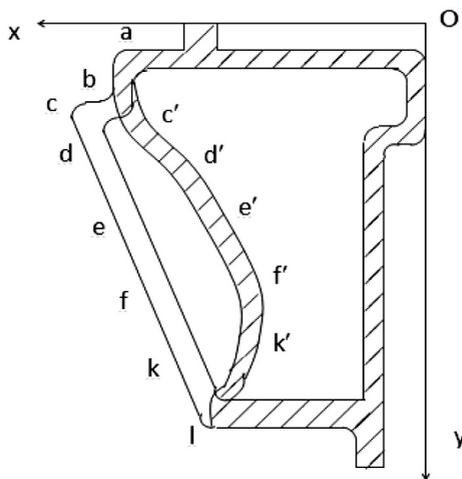


Рис. 2. Локальная деформация сечения двери

Первоначальная конфигурация $a-b-c-d-e-f-k-l$, после деформации изменяется в $a-b-c'-d'-e'-f'-k'-l'$. Полученная конфигурация является точным решением прямой задачи теории пластичности в перемещениях. Полученные при деформации перемещения определяются как разница координат x точек исследуемого профиля до деформации и после:

$$u_i(y_i) = x_{oi} - x_{ki}. \quad (11)$$

Массив x_{oi} имеет следующие значения (до деформации) (табл. 1).

Таблица 1.

Массив координат точек сечения до деформации

Точка	a	b	c	d	e	f	k	l
y_o	12	21	22	30	42	53	60	64
x_o	31	31	42	38	35	32	30	25

Деформированный профиль имеет следующие координаты точек (табл. 2).

Таблица 2.

Массив координат точек сечения после деформации

Точка	a	b	c'	d'	e'	f'	k'	l
y_i	12	21	22	30	42	53	60	64
x_i	31	31	30	25	24	23	24	25

Массив перемещений вдоль координаты x, u_i получается в соответствии с (11), при вычитании данных табл. 2 из данных табл. 1.

Таблица 3.

Массив перемещений точек сечения

Точка	a	b	c	d	e	f	k	l
y	12	21	22	30	42	53	60	64
u	0	0	12	13	11	9	6	0

Полученный массив u интерполируется кубическими сплайн-функциями.

Вычисляется интеграл энергии для сечения единичной длины:

$$\mathcal{E}_0 = \frac{\sqrt{2}}{4} \sigma_s \frac{E}{1-2\nu} \int_{x_n}^{x_p} (a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3)^2 dx. \quad (12)$$

В результате вычислений по такой методике получается, что энергия, затраченная на деформацию исследуемого сечения двенадцати при указанных деформациях, составляет $\mathcal{E}_0 = 314$ кДж.

Результаты исследования

Таким образом, аппарат уравнений теории упругости позволяет с высокой точностью моделировать процессы, протекающие в геометрически сложных объектах, стыках, соединениях, деталях и узлах автомобиля [14,15]. В зависимости от конфигурации объекта исследования и его структуры применяются следующие группы уравнений:

- уравнения пространственной (трехмерной) теории упругости;
- уравнения плоской теории упругости;
- уравнения теории упругости неоднородных сред.

Заключение

Показано, что для определения энергии, поглощенной реальными элементами конструкции, достаточно произвести измерения деформированных элементов и полученные данные подставить в реализованные в электронной среде выражения.

Применение сплайн-интерполяции при сканировании поврежденной поверхности позволяет с точностью до 10% идентифицировать остаточные деформации, причем точность определения начальной скорости автомобиля по разработанной методике зависит от точности измерения деформаций поврежденного автомобиля.

Показана эффективность разработанных методик, основанных на простых измерениях деформированных конструкций.

Список литературы

1. Беляев М.В. Возможности трасологических исследований при установлении факта контактного взаимодействия транспортных средств // Вестник экономической безопасности. 2021. № 3. С. 125-130.
2. Гольчевский В.Ф. Экспертное исследование по выявлению изменений конструкции транспортного средства // Вестник Московского университета МВД России. 2019. №1. С. 41-43.
3. Гракович И.В. Механические деформации корпуса автомобиля как критерий фальсификации обстоятельств ДТП // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. №2. С.4-18.
4. Исследование процесса диссипации энергии в элементах кузова автомобиля при дорожно-транспортных происшествиях / Ксенофонтова В.А., Аблаев А.Р., Аблаев Р.Р., Кияшко Л.А. // Мир транспорта и технологических машин. Орёл: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2020. № 2 (69). С. 56-62.
5. Калмыков Б.Ю. Актуальность метода расчета скорости транспортных средств перед столкновением по деформации их деталей // Проблемы науки. 2017. №7 (89). С. 32-34.
6. Ксенофонтова В.А. Метод обратных задач для процедур оптимизации конструкторско-технологических решений // Оптимизация производственных процессов. Вып. 1. Севастополь: Изд-во СевГТУ. 1999. С. 3-6.

7. Ксенофонтова В.А. Моделирование больших деформаций панели пола автомобиля модифицированными уравнениями Кармана // Материалы III международной научно-технической конференции «Автомобильный транспорт: прогресс, технологии, кадры». Севастополь: Изд-во СевГТУ. 1999. С. 12-18.
8. Методика определения скорости движения транспортного средства в момент столкновения по остаточным деформациям элементов конструкции / Ксенофонтова В.А., Аблаев А.Р., Аблаев Р.Р. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орёл: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева. 2019. № 4-1 (336). С. 130-134.
9. Огородников В. А. Энергия. Деформация. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы). Монография / В. А. Огородников, В. Б. Киселёв, И. О. Сивак. Винница: УНІВЕРСУМ. 2005. 204 с.
10. Проблемы и перспективы энергетических методов реконструкции ДТП / Торлин В. Н., Ксенофонтова В. А., Ветрогон А. А., Яковенко Е. В. // Вестник ХНАДУ. 2013. №61-62. С.170-173.
11. Рекач В.Г. Руководство к решению задач прикладной теории упругости. М.: Высшая школа, 1973. 384 с.
12. Калмыков Б.Ю., Копылов С.В., Гармидер А.С. Сравнительный анализ методов определения скорости автомобилей при столкновении // Проблемы современной науки и образования. 2017. № 16 (98). С. 54-56.
13. Фентон Дж. Несущий каркас кузова автомобиля и его расчет: пер. с англ./ Под ред. Э.И. Григолюка. М.: Машиностроение, 1984. 200 с.
14. Németh S. Analysis of car safety in terms of the materials used in the deformation zones of the car body // Strojárstvo, 2014, vol. 7, pp. 158-160.
15. The process of front-to-side collision of motor vehicles in terms of energy balance/ Gidlewski M., Prochowski L., Jemioł L., Żardecki D. // Nonlinear Dynamics, 2019, vol. 97, pp. 1877-1893.

References

1. Belyaev M.V. *Vestnik ekonomicheskoy bezopasnosti*, 2021, no. 3, pp. 125-130.

2. Gol'chevskiy V.F. *Vestnik Moskovskogo universiteta MVD Rossii*, 2019, no. 1, pp. 41-43.
3. Grakovich I.V. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2018, no. 2, pp. 4-18.
4. Ksenofontova V.A., Ablaev A.R., Ablaev R.R., Kiyashko L.A. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*, 2020, no. 2 (69), pp. 56-62.
5. Kalmykov B.Yu. *Problemy nauki*, 2017, no. 7 (89), pp. 32-34.
6. Ksenofontova V.A. *Optimizatsiya proizvodstvennykh protsessov. Vyp. I* [Optimization of production processes. Issue. 1]. Sevastopol': Izd-vo SevGTU, 1999, pp. 3-6.
7. Ksenofontova V.A. *Materialy III mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Avtomobil'nyy transport: progress, tekhnologii, kadry»* [Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference "Road Transport: Progress, Technologies, Personnel"]. Sevastopol': Izd-vo SevGTU, 1999, pp. 12-18.
8. Ksenofontova V.A., Ablaev A.R., Ablaev R.R. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2019, no. 4-1 (336), pp. 130-134.
9. Ogorodnikov V. A. *Energiya. Deformatsiya. Razrushenie (zadachi avto-tekhnicheskoy ekspertizy). Monografiya* [Energy. Deformation. Destruction (tasks of auto-technical expertise). Monograph] / V. A. Ogorodnikov, V. B. Kiselev, I. O. Sivak. Vinnitsa: UNIVERSUM, 2005, 204 p.
10. Torlin V. N., Ksenofontova V. A., Vetrogon A. A., Yakovenko E. V. *Vestnik KhNADU*, 2013, no. 61-62, pp. 170-173.
11. Rekach V.G. *Rukovodstvo k resheniyu zadach prikladnoy teorii uprugosti* [Guide to solving problems of applied elasticity theory]. M.: Vysshaya shkola, 1973, 384 p.
12. Kalmykov B.Yu., Kopylov S.V., Garmider A.S. *Problemy sovremennoy nauki i obrazovaniya*, 2017, no. 16 (98), pp. 54-56.
13. Fenton J. *Nesushchiy karkas kuzova avtomobilya i ego raschet* [The supporting frame of the car body and its calculation]. M.: Mashinostroenie, 1984, 200 p.
14. Németh S. Analysis of car safety in terms of the materials used in the de-formation zones of the car body. *Strojárstvo*, 2014, vol. 7, pp. 158-160.
15. The process of front-to-side collision of motor vehicles in terms of energy balance/ Gidlewski M., Prochowski L., Jemioł L., Żardecki D. // *Nonlinear Dynamics*, 2019, vol. 97, pp. 1877-1893.

ДАНИЕ ОБ АВТОРАХ

Ксенофонтова Виктория Анатольевна, доцент кафедры Автомобильный транспорт Политехнического института, канд. техн. наук, доц.

*Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Российская Федерация
vaksenofontova.v@gmail.com*

Кияшко Лариса Александровна, старший преподаватель кафедры Автомобильный транспорт Политехнического института
*Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Российская Федерация
LAKiyashko@sevsu.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Victoria A. Ksenofontova, Associate Professor, Department Automobile Transport, Polytechnic Institute, Ph.D. tech. sciences
*Sevastopol State University
33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
vaksenofontova.v@gmail.com
SPIN-code: 2786-9966*

Larisa A. Kiyashko, Senior Lecturer, Department Automobile Transport, Polytechnic Institute
*Sevastopol State University
33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation
LAKiyashko@sevsu.ru
SPIN-code: 6605-5322*

Поступила 05.05.2022
После рецензирования 20.05.2022
Принята 01.06.2022

Received 05.05.2022
Revised 20.05.2022
Accepted 01.06.2022