

Колеснік І. В.¹

ORCID: 0000-0003-4192-1773

Колеснік Ю. І.¹

ORCID: 0000-0002-9915-2455

Блезнюк О. В.²

ORCID: 0000-0002-7928-117X

Панкова О. В.³

ORCID: 0000-0003-2866-1858

Марущак І. Т.¹

ORCID: 0009-0007-9983-0109

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

² Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

³ Харківський автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

МЕТОДИ ФОРМАЛІЗОВАНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ КУЗОВІВ ЛЕГКОВИХ АВТОМОБІЛІВ

DOI <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.38>

УДК 629.33:519.876

*Колеснік І.В., Колеснік Ю.І., Блезнюк О.В., Панкова О.В., Марущак І.Т. **Методи формалізованого представлення та аналізу параметрів кузовів легкових автомобілів***

***Анотація.** Об'єктом дослідження є нормування параметрів і показників автомобільних кузовів та їх вузлів на етапі проектування із застосуванням експериментальних і розрахункових даних.*

Метою дослідження є розробка методики формалізованого представлення, систематизації та аналізу результатів експериментальних і чисельно-аналітичних досліджень з метою забезпечення оптимального вибору конструктивних рішень і підвищення довговічності кузова легкового автомобіля.

Предметом дослідження є кількісні залежності між розрахунковим напруженням, експлуатаційним напруженням і конструктивними параметрами кузова, включаючи жорсткість, власну частоту, амплітуду відбиття характерних точок і технологічні показники якості зварних з'єднань.

Особлива увага приділяється встановленню статистично обґрунтованих залежностей між параметрами конструкції та довговічністю, що дозволяє оцінювати вплив окремих факторів на термін служби елементів кузова.

Дослідження базується на комплексному аналізі серійних автомобілів і результатів експериментальних стендових випробувань кузовів після зварювання, що включають оцінку динамічної реакції, реєстрацію появи втомних тріщин і визначення технологічних характеристик зварних швів. Для обробки даних використовуються методи регресійного аналізу, параметричної та багатокритеріальної оптимізації, а також графоаналітична інтерпретація експериментальних результатів. Формування єдиного банку даних забезпечує збереження і систематизацію інформації про розрахункові напруження і експлуатаційні напруження, що дозволяє використовувати накопичені результати на будь-якому етапі проектування і модернізації конструкції.

Результати дослідження дозволяють встановлювати кількісні взаємозв'язки між конструктивними, технологічними та експлуатаційними показниками, що забезпечує ефективну корекцію та вдосконалення конструкцій автомобільних кузовів. Пропонований підхід сприяє підвищенню точності прогнозування довговічності,

формуванню раціональних конструкторських рішень і створенню формалізованих моделей, придатних для автоматизованого проектування. Використання розробленої методики дозволяє скоротити тимчасові та матеріальні витрати при проектуванні та модернізації кузовів, а також підвищити надійність і безпеку експлуатації легкових автомобілів.

Ключові слова: довговічність, розрахункове напруження, кузов автомобіля, експериментальні дослідження, регресійний аналіз, параметрична оптимізація, графоаналітична інтерпретація.

*Koliesnik I.V., Koliesnik Yu.I., Bleznyuk O.V., Pankova O.V., Marushchak I.T. **Methods of formalized representation and analysis of passenger car body parameters***

Annotation. *The object of the study is the normalization of parameters and indicators of automobile bodies and their components at the design stage using experimental and calculated data.*

The purpose of the study is to develop a methodology for formalized representation, systematization and analysis of the results of experimental and numerical-analytical studies in order to ensure the optimal choice of design solutions and increase the durability of the passenger car body.

The subject of the study is the quantitative dependence between the design stress, operational life and design parameters of the body, including stiffness, natural frequency, reflection amplitude of characteristic points and technological indicators of the quality of welded joints.

Special attention is paid to establishing statistically substantiated dependencies between design parameters and durability, which allows assessing the influence of individual factors on the service life of body elements.

The study is based on a comprehensive analysis of serial cars and the results of experimental bench tests of bodies after welding, which include an assessment of the dynamic response, registration of the appearance of fatigue cracks and determination of technological characteristics of welds. For data processing, regression analysis methods, parametric and multi-criteria optimization, as well as graph-analytical interpretation of experimental results are used. The formation of a single data bank ensures the preservation and systematization of information on design stresses and operational experience, which allows using the accumulated results at any stage of design and modernization of structures.

The results of the study allow establishing quantitative relationships between structural, technological and operational indicators, which ensures effective correction and improvement of car body structures. The proposed approach contributes to increasing the accuracy of durability prediction, the formation of rational design solutions and the creation of formalized models suitable for automated design. The use of the developed methodology allows you to reduce time and material costs in the design and modernization of bodies, as well as increase the reliability and safety of passenger car operation.

Keywords: *durability, design stress, car body, experimental research, regression analysis, parametric optimization, graphoanalytical interpretation.*

Вступ. У процесі проектування автомобільних кузовів та їх вузлів одним із ключових завдань є забезпечення необхідної довговічності конструкцій при мінімальних витратах ресурсів і матеріалів. На сучасному етапі проектування виникає проблема відсутності формалізованих і систематизованих методів оцінки впливу конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів на довговічність елементів кузова. Традиційний підхід, заснований на орієнтації на серійні зразки та референтні

конструкції, не завжди дозволяє точно прогнозувати поведінку нових або модифікованих конструкцій в реальних умовах експлуатації.

Недостатня кількість експериментальних даних і обмежена репрезентативність вибірки ускладнюють застосування регресійного аналізу та багатокритеріальної оптимізації. Крім того, існує потреба у створенні єдиного банку даних, що дозволяє акумулювати результати експериментальних і чисельно-аналітичних досліджень і забезпечує формалізоване представлення взаємозв'язків між параметрами конструкції і терміном служби кузова.

Вирішення цієї проблеми необхідне для підвищення точності прогнозування довговічності, оптимізації конструктивних рішень і розвитку автоматизованих методів проектування автомобільних кузовів та їх вузлів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження довговічності та довговічності кузовів транспортних засобів зосереджувалися на поєднанні експериментальних методів, числового моделювання та статистичної обробки даних. Shangguan та ін. [1] застосували багатоосьові критерії та теорію кумулятивних пошкоджень для оцінки терміну служби алюмінієвого кузова, підтвердивши ефективність моделей накопичення пошкоджень від втоми. Kuo і Kelkar [2] розробили методологію аналізу структурної довговічності, яка використовується й сьогодні.

Хіе та ін. [3] продемонстрували застосування методу скінченних елементів (МСЕ) для оцінки довговічності кузовів залізничних транспортних засобів та [4] продемонстрували важливість врахування реальних навантажень. Kisko та ін. [5] поєднали аналітичні та множинні методи для оцінки довговічності конструкцій. Вугуак та ін. [6] використали статистичний аналіз експериментальних даних для встановлення зв'язку між параметрами напруженого стану та терміном служби.

Автори [7] досліджували напружений стан кузовів пасажирських автомобілів за допомогою сучасних числових методів. Poryvush та ін. [8] і Drożdziel та ін. [9] врахували вплив корозії та поверхневих тріщин на довговічність. Pachurin та ін. [10] удосконалені технології випробувань на втому листових матеріалів, що підвищує точність оцінки терміну служби.

Отже, сучасні підходи базуються на поєднанні експерименту, числового моделювання та статистики, що підтверджує доцільність формалізованого представлення даних для проектування та вдосконалення конструкцій кузова, навіть за обмежених експериментальних даних.

Мета дослідження полягає у розробці науково обґрунтованої методики формалізованого уявлення, систематизації та аналізу результатів експериментальних та чисельно-аналітичних досліджень параметрів кузовів легкових автомобілів, що забезпечує встановлення кількісних взаємозв'язків між конструктивними, технологічними та експлуатаційними факторами з метою підвищення точності прогнозування довговічності, оптимізації конструктивних рішень.

Матеріали і методи досліджень. Для досягнення нормованих параметрів та показників проектного автомобіля та його вузлів [1, 2] на етапі проектування застосовується орієнтація на референтні конструкції та цільові значення параметрів, сформовані на основі аналізу серійних автомобілів та результатів їх експлуатаційної та розрахункової оцінки та їх вузлів, які зарекомендували себе в умовах експлуатації. За відсутності прямих аналогів оцінка проводиться з використанням технічно прогресивних та економічно обґрунтованих цільових показників, що формуються на основі сукупності експериментальних та розрахункових даних.

Встановлення таких показників можливе за наявності представницького масиву інформації, що дозволяє застосовувати методи параметричної та багатокритеріальної оптимізації, а також процедури вибору раціональних проектних рішень у рамках чисельно-аналітичного проектування з використанням чисельних моделей та статистичних методів аналізу.

У разі розробки алгоритму автоматизованого проектування кузова [3] норми призначаються з використанням єдиного банку даних, що формується на основі результатів експериментальних та розрахункових досліджень, що визначають зв'язок напруги з терміном служби. Отже, для нормування показників та параметрів для формування якості конструкції на стадії проектування необхідні збір інформації, її систематизація та формалізоване подання.

Такий підхід пов'язаний з вибором розрахунково-статистичної моделі, що забезпечує формалізоване уявлення даних про кількісний вплив конструктивних, технологічних або експлуатаційних факторів на довговічність, причому залежності можуть бути різноманітними на вигляд. Однак відомо, що для багатьох матеріалів, що випробовуються на витривалість, співвідношення довговічності та міцності досить адекватно виражається залежністю $\sigma^m N = c$, яка може бути перетворена на вигляд

$$\sigma^m T = c \quad (1)$$

де σ – питома навантаження;
 N – число циклів навантаження до відмови;
 T – довговічність;
 m, c – константи.

Залежності такого виду широко використовуються в техніці, зокрема, при плануванні багатофакторних експериментів, визначенні довговічності виробів, апроксимації зміни параметрів технічного стану. Крім того, такі залежності відносно просто доповнюються незалежними параметрами стану і тоді набувають наступного придатного для проектування кузова вигляду:

$$\left(\frac{P_n}{P_{0n}}\right)^{m_n} \cdot \dots \cdot \left(\frac{P_1}{P_{01}}\right)^{m_1} \sigma^m T = c \quad (2)$$

де σ – розрахункова напруга, що діє у небезпечному перерізі елемента кузова [4];
 N – число циклів навантаження до відмови, виражене в годинах роботи, кілометрах пробігу або серед циклів змін напруги до руйнування [4];
 m, c – величини, що визначаються при формуванні кількісного взаємозв'язку розрахункова напруга – напруцювання за результатами випробувань [4];
 $P_{01} \dots P_{0n}$ – вихідні значення величин, потенційно придатних для керування ними при проектуванні;
 $P_1 \dots P_n$ – поточні значення величин, що змінюються або враховуються під час проектування;
 $m_1 \dots m_n$ – показники ступеня, що визначаються розрахунком або формуванням залежності (2) за умови рівності її лівої та правої частин.

При формуванні залежності чисельні значення параметрів P_1, P_n, P_i приймаються в результаті апріорного ранжирування, що використовується в теорії планування експериментів, а показники m_i, m_1, m_n розраховуються для кожного з фіксованих значень факторів, що враховуються. У процесі накопичення даних за розрахунковими

значеннями показників ступеня m_i можна підібрати потрібну функцію, наприклад, методом найменших квадратів. До появи такої можливості для оцінки впливу того чи іншого параметра на величину напруження слід використовувати інтерполяційні формули.

Введення поправочних співмножників залежність (2) не відрізняється по суті від відомого прийому введення поправочних коефіцієнтів. Дійсно, кожен множник виду $(P_i / P_{0i})^{m_i}$ має сенс такого коефіцієнта, але на відміну від нього дозволяє підвищити точність розрахунку, якщо його одержують на основі експериментальних досліджень. Очевидно, можна привести залежність (2) до виду

$$(P_n)^{m_n} \cdot \dots \cdot (P_1)^{m_1} \sigma^m T = c \quad (3)$$

Такий вид залежності теорії планування експерименту широко відомий [5, 9]. Звичним і в даний час широко застосовується спосіб її формування є використання апарату регресійного аналізу.

Формування залежності здійснювалося за результатами стендових експериментальних досліджень, що використовуються для верифікації формалізованих розрахункових залежностей кузовів легкового автомобіля при згинанні в умовах резонансного збудження. Випробування проводилися на кузовах після зварювання, прийнятих відділом технічного контролю, у конфігурації без навісних елементів.

У процесі випробувань реєструвалися основні конструктивні та технологічні параметри, а також параметри динамічного відгуку кузова. При досягненні граничного стану фіксувалося поява тріщин втоми в елементах конструкції, після чого випробування тривали з метою накопичення експериментальних даних і аналізу тенденцій зміни довговічності. Підварювання тріщин розглядалося як технологічний прийом, не спрямований на відновлення вихідної міцності елемента, а забезпечує можливість подальшого накопичення експериментальних даних про характер та локалізації ушкоджень.

В результаті застосування методів статистичної обробки та обчислення вибірових характеристик при обмеженому обсязі експериментальної вибірки, характерному для верифікаційних експериментальних досліджень [6] встановлено кількісний взаємозв'язок довговічності кузова з рядом його параметрів, включаючи згинальну жорсткість, власну частоту згину, амплітуду віброзміщення характерної точки та технологічні показники.

Множинний кореляційний зв'язок довговічності кузовів з перерахованими характеристиками, отриманий в результаті статистичної обробки за методикою, викладеною в роботі [6-8]

$$N = 0,0000766C^{1,4011} f^{2,2194} A^{0,0015} \lambda^{0,411}. \quad (4)$$

Формула (4), що має постійні показники ступеня, очевидно, має такі ж обмеження щодо точності розрахунку, як і вираз (2), що містить поправочні коефіцієнти. Водночас виникає питання про доцільність одночасного введення у формулу (4) пов'язаних між собою величин C, f, A, λ . Подібне у практиці досліджень зустрічається досить часто і потребує подальшого дослідження. У разі формула (4) може лише сенс узагальненого висловлювання даних, поданих у таблиці 1.

Таблиця 1

Узагальнення експериментальних даних

Умовний номер кузова	\bar{N}_{ik} в циклах	f , Гц	A , мм	C , кгс/мм	λ , %
1	826600	35,4	0,19	458,4	0,10
2	477600	34,3	0,32	396,1	2,73
3	566700	32,4	0,14	448,3	4,04
4	748400	35	0,10	497,5	0,36
5	653600	34,4	0,31	480	0,13
6	611300	35	0,20	448,3	0,23
7	334700	34,8	0,37	431,7	3,37
8	655800	34,8	0,24	450,8	0,33
9	544200	35	0,33	519,7	3,37
10	389800	34	0,47	405,9	2,85
11	690400	34,1	0,20	413,3	0,20
12	575200	33,2	0,21	471,7	2,33
13	526200	32,5	0,22	416,4	0,41
14	468000	32,5	0,42	438,1	1,91
\bar{N}	576300	34,1	0,27	448,3	16,3
σ	135100	1,04	0,11	35,45	1,5
ν	23	3	40	7	90

Отримана форма узагальнення експериментальних даних мало зручна використання, оскільки безпосередньо відбиває обсягу накопиченої інформації та дозволяє оцінити відхилення від встановлених норм у разі введення у конструкцію будь-яких змін. Крім того, виконання процедур регресійного аналізу та конструювання на їх основі формалізованих моделей для систематизації даних потребують представницької вибірки. Процес накопичення даних зазвичай відбувається протягом тривалого часу, що пов'язано при проектуванні або модернізації конструкцій з певними труднощами.

Таким чином, виникає питання про знаходження способів формалізованого подання одержуваних результатів дослідження, який дозволяв би в міру накопичення матеріалів використовувати для формування наявних конструкцій. Розглянемо такий спосіб з прикладу графоаналітичної інтерпретації експериментальних даних.

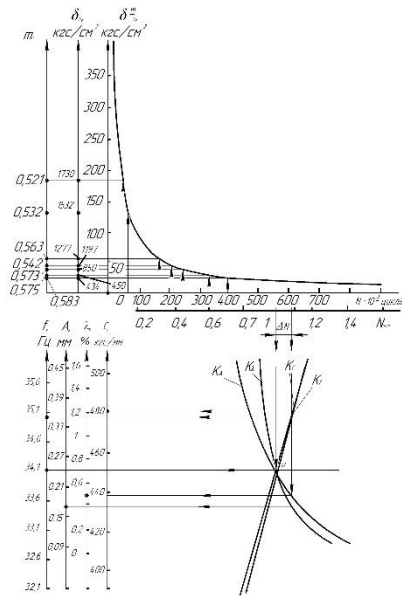


Рис. 1. Діаграма формування кількісного взаємозв'язку розрахункового напруження-довговічність на підставі експериментальних даних

Її побудову почнемо з формування кількісного взаємозв'язку розрахункове напруження – довговічність виходячи з експериментальних даних [4, 10]. Оскільки експериментальних даних замало встановлення математичного очікування довговічності, приймемо її середньоарифметичне значення досліджених кузовів. З точки \bar{N} опустимо перпендикуляр до перетину з довільною лінією в точці O , яку приймемо за лінію еталонної структури даної конструкції кузова масового виробництва. Стосовно цієї лінії проведемо формування взаємозв'язку вивчених параметрів C, f, A, λ із довговічністю \bar{N} . Зліва від точки O на лінії еталонної структури проведемо перпендикулярні лінії, що характеризують значення параметрів C, f, A, λ . Точки перетину ліній будуть відповідати значенням параметрів щодо середньоарифметичного значення N (математичного очікування за достатньої вибірки).

Для спрощення здійснимо побудову щодо $N_{num} = N / \bar{N}$ (N – поточне значення довговічності), а параметри C, f, A, λ виразимо через коефіцієнти K_C, K_A, K_f, K_λ , що характеризує відповідно жорсткість кузова, амплітуду віброзміщення точки порога, власну частоту кузова, відсоток непровару дверних отворів.

При вирішенні питань, пов'язаних з підвищенням довговічності (в даному випадку \bar{N} збільшується до ΔN), забезпечується наочність вибору параметрів чи факторів, що забезпечують досягнення мети.

Розглянутий спосіб формування аналітичного образу постійно накопичуються результатів дослідження у вигляді залежностей (2) і (3), а також їх графічна інтерпретація забезпечують можливість фіксації інформації, передачі її конструктору на будь-якій стадії вивчення конструкції та сприяють формуванню та коригуванню конструкції автомобіля та його вузлів на різних етапах проектування.

Висновки

Для досягнення нормованих параметрів і показників проєктованого автомобіля та його вузлів на етапі проєктування ефективно застосовується орієнтація на референтні конструкції та цільові значення параметрів, сформовані на основі аналізу серійних

автомобілів і результатів їх експлуатаційної та розрахункової оцінки. За відсутності прямих аналогів використовуються технічно прогресивні та економічно обґрунтовані цільові показники, сформовані на основі експериментальних і розрахункових даних.

Формування показників і параметрів конструкції можливе тільки за наявності репрезентативного масиву інформації, що дозволяє застосовувати методи параметричної і багатокритеріальної оптимізації, чисельно-аналітичне проектування і методи аналізу для вибору раціональних проектних рішень.

Використання єдиного банку даних для автоматизованого проектування кузова дозволяє встановлювати зв'язок між напругою і терміном служби елементів конструкції, що забезпечує формалізацію інформації і систематизацію для корекції проектних рішень на будь-якому етапі проектування.

Розроблені кількісні залежності між розрахунковим напруженням, числом циклів до відмови і конструктивними параметрами кузова (жорсткість, власна частота, амплітуда віброзмішування, якість зварних швів) дозволяють прогнозувати довговічність елементів і оцінювати вплив технологічних і експлуатаційних факторів.

Графоаналітична інтерпретація експериментальних даних забезпечує наочність оцінки параметрів, що впливають на довговічність, і дозволяє ефективно формувати та коригувати конструкції автомобільних кузовів на основі накопиченої інформації.

Використання регресійного аналізу та чисельно-аналітичних моделей дозволяє підвищити точність прогнозування довговічності та сприяє розвитку методів автоматизованого проектування автомобільних конструкцій.

Список використаних джерел

1. Shanguan Y., Wang W., Yang C., He A. Fatigue Strength Assessment of an Aluminium Alloy Car Body Using Multiaxial Criteria and Cumulative Fatigue Damage Theory // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 215. – DOI: 10.3390/app13010215.
2. Kuo E., Kelkar S. Vehicle Body Structure Durability Analysis // *SAE Technical Paper* 951096. – 1995. – <https://doi.org/10.4271/951096>.
3. Xie N., Lu Y.-H., Feng Z., Chen T.-L. Fatigue Strength Research on Aluminum Alloy Car Body for Railway Vehicle Based on Finite Element Analysis Method // *Proc. of the 2015 International Conference on Material Science and Applications. – Advances in Physics Research*. – 2015. – P. 885–891. – <https://doi.org/10.2991/icmsa-15.2015.164>.
4. Xin Cai Zhong, Zhen Yu Wu, Kai Song. A Research on the Methods of Fatigue Analysis for Vehicle Body Based on Real Road Conditions // *Applied Mechanics and Materials*. – Vol. 615. – 2014. – P. 93–100. – <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.615.93>.
5. Kicko M., Frankovský P., Huňady R., Kaňavský A., Kostka J. Determination of the Fatigue Life of the Vehicle Construction Based on Strength Calculations // *American Journal of Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol. 5, No. 6. – P. 274–279. – <https://doi.org/10.12691/ajme-5-6-8>.
6. Буряк М. В., Розум Р. І., Захарчук О. П., Прогній П. Б., Попович П. В., Шевчук О. С., Галушак Д. О. Оцінкавічності металоконструкцій автотранспортних засобів // *Вісник машинобудування та транспорту*. – 2022. – Вип. 15, вип. 1. – С. 11–16. – <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-11-16>.
7. Мартинов І., Калабухін Ю., Труфанова А., Мартинов С. Аналіз напруженого стану кузовів пасажирських вагонів // *Транспортні системи і технології*. – 2024. – <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-9>.
8. Попович П., Шевчук О., Побережна Л., Цон О., Ляшук О. Дослідження характеристик втомного руйнування металевих конструкцій транспортних засобів, що використовуються для транспортування агресивних матеріалів // *Репозиторій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя*.

9. Дроздзель П., Попович П., Вітенко Т., Шевчук О., Золотий Р., Конончук О. Прогнозування довговічності транспортних засобів з урахуванням поширення корозійних поверхневих тріщин у конструктивних елементах // Науковий журнал Сілезького технологічного університету. Серія Транспорт. – 2018. – № 101. – С. 47–57. – <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2018.101.5>.

10. Пачурін Г., Гончарова Д., Філіппов А., Шевченко С., Мухіна М., Кузьмін Н., Пачурін В., Матвеев Ю., Кутєпова Л., Смірнова З. Розробка технології випробувань на втому листових автомобільних матеріалів // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2018. – Т. 5, № 12 (95). – С. 31–37. – <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144524>.

References

1. Shangguan Y., Wang W., Yang C., He A. Fatigue Strength Assessment of an Aluminium Alloy Car Body Using Multiaxial Criteria and Cumulative Fatigue Damage Theory // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 215. – DOI: 10.3390/app13010215.

2. Kuo E., Kelkar S. Vehicle Body Structure Durability Analysis // SAE Technical Paper 951096. – 1995. – <https://doi.org/10.4271/951096>.

3. Xie N., Lu Y.-H., Feng Z., Chen T.-L. Fatigue Strength Research on Aluminum Alloy Car Body for Railway Vehicle Based on Finite Element Analysis Method // Proc. of the 2015 International Conference on Material Science and Applications. – Advances in Physics Research. – 2015. – P. 885–891. – <https://doi.org/10.2991/icmsa-15.2015.164>.

4. Xin Cai Zhong, Zhen Yu Wu, Kai Song. A Research on the Methods of Fatigue Analysis for Vehicle Body Based on Real Road Conditions // Applied Mechanics and Materials. – Vol. 615. – 2014. – P. 93–100. – <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.615.93>.

5. Kicko M., Frankovský P., Huňady R., Kaňavský A., Kostka J. Determination of the Fatigue Life of the Vehicle Construction Based on Strength Calculations // American Journal of Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 5, No. 6. – P. 274–279. – <https://doi.org/10.12691/ajme-5-6-8>.

6. Buryak M. V., Rozum R. I., Zacharchuk O. P., Progniy P. B., Popovych P. V., Shevchuk O. S., Halushchak D. O. Оцінка довговічності металоконструкцій автотранспортних засобів // Вісник машинобудування та транспорту. – 2022. – Vol. 15, Iss. 1. – P. 11–16. – <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-11-16>.

7. Martynov I., Kalabukhin Y., Trufanova A., Martynov S. Analysis of Stress State of Passenger Car Bodies // Transport Systems and Technologies. – 2024. – <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-9>.

8. Popovych P., Shevchuk O., Poberezhna L., Tson O., Lyashuk O. The Study of Fatigue Failure Performance of Vehicle Metal Structures Used in Transportation of Corrosive Materials // Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University Repository.

9. Drożdziel P., Popovych P., Vitenko T., Shevchuk O., Zoloty R., Kononchuk O. Prediction of Transport Vehicles' Durability with Consideration of Corrosive Surface Cracks Propagation in Structural Elements // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. – 2018. – No. 101. – P. 47–57. – <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2018.101.5>.

10. Pachurin G., Goncharova D., Filippov A., Shevchenko S., Mukhina M., Kuzmin N., Pachurin V., Matveyev Y., Kutepova L., Smirnova Z. Development of Fatigue Test Technology of Sheet Automobile Materials // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 5, No. 12 (95). – P. 31–37. – <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144524>.

Отримано: 01.04.2026. Прийнято: 13.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.