

С. О. ЧУРСОВ

аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-6746-530X

ПРОЦЕСИ ДЕГРАДАЦІЇ МАТЕРІАЛІВ ПНЕВМАТИЧНИХ ШИН ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОПОРУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

У даній роботі розглянута модель процесу деградації матеріалів пневматичних шин при накопиченні пошкоджень в залежності від хімічного, термічного та термомеханічного старіння. Запропоновано детально розглянути поведінку гумо-еластомерів через вивчення явища опору матеріалів до зміни характеристик та механічних властивостей пневматичних шин. Шини піддаються внутрішнім і зовнішнім впливам, які більшою чи меншою мірою можуть спричинити граничні стани, що призводять до процесів деградації. Під час експлуатації шина піддається комбінованому навантаженню як з механічної (статичної, динамічної), так і з температурної точки зору: точковий нагрів у підзонах, загальний критичний нагрів у зоні протектора шини, що виникає в шинах при розриві. Агресивне середовище (наприклад, дія солей взимку) активізує процес корозії на поверхні металокорду, що може призвести до зниження адгезії між армованими елементами та матрицею, що проявляється негативними змінами властивостей матеріалів так і шини в цілому. Причини утворення основних процесів, що супроводжують деградацію потребують узагальнення та систематизації, а також детального вивчення. Розглянуті зовнішні пошкоджуючі фактори - хімічна дифузію (морська сіль, відпрацьоване мастило). Морфологію поверхні, механічні та термічні властивості композиту, вплив гідротермічного старіння на властивості композиту виявлено шляхом дослідження мікроструктури, термічних і механічних властивостей. Показано, що зі зміною температури істотно змінюється опір матеріалів та процес окислення: так, якщо при кімнатній температурі більшість металів окислюється за логарифмічною залежністю, то зі зростанням температури змінюються захисні властивості оксидної плівки і відповідно змінюється і закон окислення: від логарифмічного до лінійного. Дані по окисленню та деградації матеріалів пневматичних шин, їхня стійкість до опору термічним напругам які призводять до розтріскування і накопичення пошкоджень в матеріалах пневматичних шин в різноматних агресивних експлуатаційних середовищах, в умовах які були зімітовані до реальної експлуатації детально досліджувались в даній роботі.

Ключові слова: деградація матеріалів, кінетика накопичення пошкоджень, термомеханічні впливи гума, еластомери, корд, композиції.

S. O. CHURSOV

Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics
and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-6746-530X

PROCESSES OF DEGRADATION OF PNEUMATIC TIRE MATERIALS AND ENSURING THE RESISTANCE OF MECHANICAL PROPERTIES

In this work, a model of the process of degradation of pneumatic tire materials is created during the accumulation of damage depending on chemical, thermal and thermomechanical aging. It is proposed to consider in detail the behavior of rubber-elastomers through the study of the phenomenon of resistance of materials to changes in the characteristics and mechanical properties of pneumatic tires. Tires are exposed to internal and external influences, which to a greater or lesser extent can cause limit states leading to degradation processes. During operation, the tire is subjected to a combined load from both a mechanical (static, dynamic) and a temperature point of view: precise heating in the sub-zones, general critical heating in the tire tread area, which intensifies in the tires during rupture. An aggressive environment (for example, the action of salts in winter) activates the corrosion process on the surface of the metal cord, which can lead to a decrease in the adhesion between the reinforced elements and the matrix, which causes negative changes in the properties of the materials and the tire as a whole. The causes of the formation of the main processes that accompany degradation require generalization and systematization, as well as detailed study. Considered external damaging factors of chemical diffusion (sea force, used oil). The surface morphology, mechanical and thermal properties of the composition, the effect of hydrothermal aging on the properties of the composition were revealed by studying the microstructure, thermal and mechanical properties. It is shown that the resistance of materials and the oxidation process change significantly with a change in temperature: for example, if at room temperature large metals are oxidized according to a logarithmic dependence, then as the temperature increases, the protective properties of the oxide film change and the oxidation law changes accordingly: from logarithmic to linear. Data on oxidation and degradation of pneumatic tires, their resistance to

resistive thermal stresses that lead to cracking and accumulation of damage in the materials of pneumatic tire materials in various aggressive operating environments, under conditions that have been evaluated to real, were investigated in detail in this work.

Key words: hydraulic forging, hydrostatic extrusion, deformation, mould, modelling, strength, reliability, destruction.

Постановка проблеми

При експлуатації пневматичних шин автомобільного транспорту діють зовнішні пошкоджуючі фактори, такі як: температура, хімічна взаємодія з агресивними середовищами, циклічні навантаження, механічні руйнуючі тіла, що призводять до розриву зв'язків матеріалів пневматичних шин, зниженню твердості, корозії металевого кордону, ерозії гумо-еластичної матриці. Всі ці ефекти можна назвати деградацією гумо-композиції та конструкції шини в цілому. В цьому плані уточнення процесів деградації, що найбільше наближені до умов експлуатації є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вивченням збереження функціональних властивостей шин присвячено багато робіт [1–7]. Детально досліджувалось руйнування поверхневих шарів протектора [6, 16] при терті [8] та зношуванні [9, 10], стійкість до температурних перепадів [6, 11, 12], втомна міцність для довгострокової експлуатації [6, 13–15], хімічний опір [17] від впливу різноманітних рідких середовищ та сполук [6, 11, 12, 17, 18].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є визначення деградації механічних властивостей матеріалів пневматичних шин, зокрема падіння міцності та твердості під термічним, хіміко-термічним, термомеханічним впливом, які створено штучно в лабораторних умовах [1–7].

Викладення основного матеріалу дослідження

В попередніх дослідженнях змін динамічних властивостей шин у якості дисипативної здатності поглинання енергії від подолання перешкод різної геометрії встановлено пряму взаємозалежність від виду та походження дефектів отриманих і під час експлуатації. Комплексним показником ступеню накопичення і характеру пошкодження є коефіцієнт демпфування μ [17] гумо-кордної конструкції. Так, за рахунок статичної деформації пневматичної шини можна отримати розрахункові дані через експериментальні стендові випробування.

За рахунок накопиченого масиву даних бічної деформації, що має кореляцію із відповідним ступенем пошкоджуваності встановлюється, саме коефіцієнт демпфування матеріалу пневматичної шини. Враховуючи дану закономірність для випробувань подальшої деградації механічних показників досліджується матеріал з різноманітними значеннями. Очевидно, що геометричні утворення пошкодження різновимірні і можуть сприяти як джерела або концентратори розповсюдження інших впливів на матеріал, таких як температурні коливання, проникність поверхнево активних речовин, їх адсорбція, ерозія еластомерів та каучуків і ін.

Проникненість рідин, газів та розповсюдження тріщин в середині новоутворених пошкоджень [17–18] напряму залежить від структурної будови армуючої кордної частини та її цілісності [6, 16]. Попередні механічні дефекти повинні посилювати кінетику деградації механічних та структурно-фізичних властивостей композитів і каучуків з армуючими волокнами. Саме здатність утримати розповсюдження комплексу негативних зовнішніх факторів є основне призначення та критерій якості матеріалів шин та зокрема протектора, що знаходиться в надзвичайно важких динамічно навантажених умовах в контакт з дорогою.

У роботі встановлювали зв'язок втрати твердості за Шором протектора з варіацією температури і дії олійних сумішей різного складу, як поверхнево активних речовин, що контактують з поверхнею протектора в дорожніх умовах та при знаходженні автотранспорту на транспортних підприємствах. Зразки вирізані з протектора та різних частин бокової поверхні пневматичної шини піддавали термічному навантаженню 80°C, 100°C, 120°C.

В якості агресивних середовищ для розчину 1 використовувалось мастило різного походження, таких як: суміш відпрацьованого моторного, трансмісійного мастила, миючий засіб (ПАР) та морська сіль. Початкове значення твердості для усіх трьох зразків виготовлених з однієї пневматичної шини складала 12,5 HD. Отримані дані в таблиці 1 та таблиці 2.

Таблиця 1

Витримка зразка у відпрацьованому мастилі при кімнатній температурі

Час витримки, години	Твердість за Шором, HD	Час витримки, години	Твердість за Шором, HD	Час витримки, години	Твердість за Шором, HD	Час витримки, години	Твердість за Шором, HD
0	12,5	9	12	30	12	54	12
1	12	12	12	36	12	60	12
3	12	18	12	42	12	66	12
6	12	24	12	48	12	72	12

В результаті проведених випробувань, а саме витримка зразку у відпрацьованому мастилі протягом 72 год. (табл. 1) твердість зразка на знизилася 0,5 HD від початкового показника 12,5 HD. Відсутність суттєвих змін можна пояснити тим, що дослідний зразок протягом часу випробування насичувався вказаним агресивним матеріалом і вказаний дослідний зразок змінив колір (рис. 1), через активне поглинання від речовини-агресивного середовища.

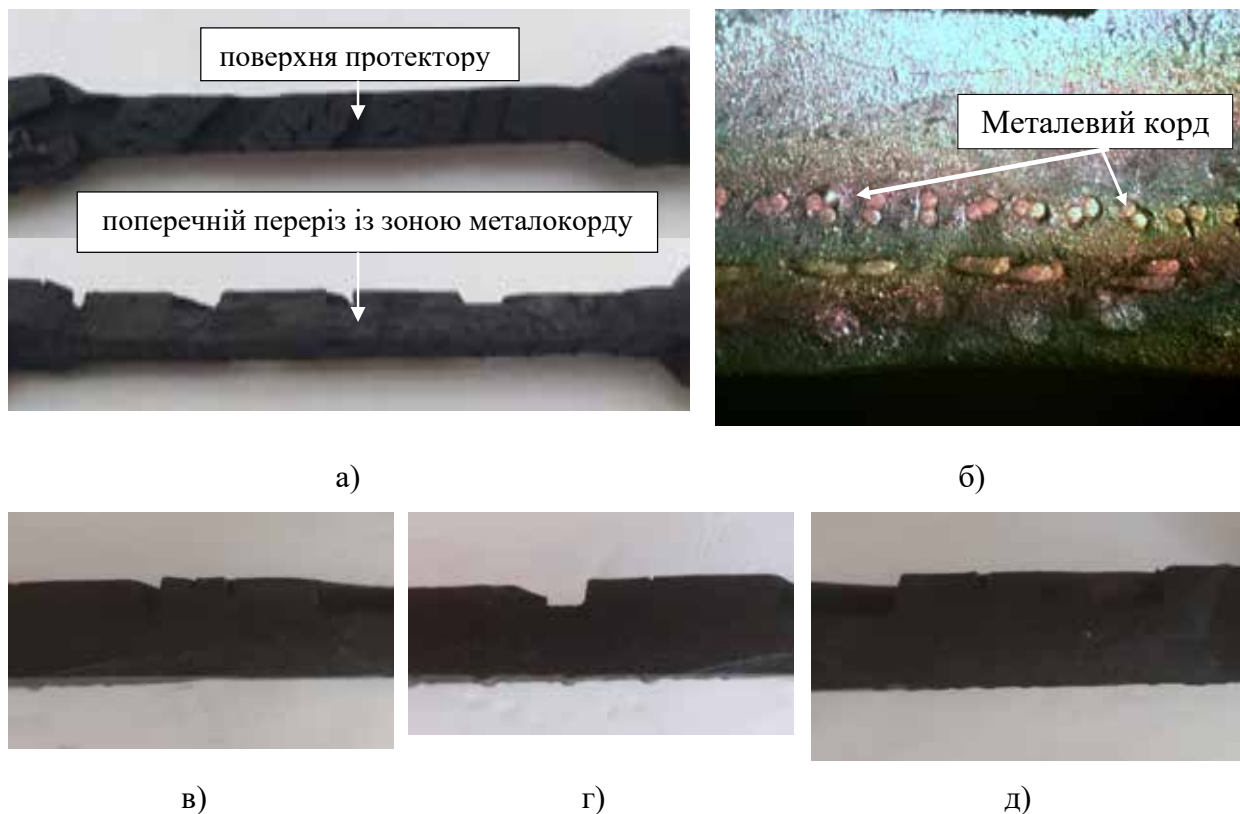


Рис. 1. Зразок пневматичної шини насичений речовиною-агресивним середовищем «мастило»: а) – загальний вигляд зразку; б) – мікроповерхня поперечного перерізу пневматичної шини із металокорду після випробувань; в), г), д) – вплив агресивного середовища на зони поперечного перерізу пневматичної шини після насичення агресивним розчином 1, під час випробувань

Таблиця 2

Витримка сухого зразка в гарячій камері (мастило)

Час витримки, години		Твердість HD
Початкове значення		12,5
Час витримки при 100 °С, години		12
Час витримки при 200 °С, години	6	11
	9	10,1
	12	9,5

Таблиця 3

Попередня витримка зразка в ПАВ при кімнатній температурі

Час витримки, години	Твердість за Шором, HD	Час витримки, години	Твердість за Шором, HD	Час витримки, години	Твердість за Шором, HD	Час витримки, години	Твердість за Шором, HD
0	12,5	9	12	30	12	54	12
1	12	12	12	36	12	60	12
3	12	18	12	42	12	66	12
6	12	24	12	48	12	72	12

В результаті проведених випробувань, а саме витримка зразку в агресивному середовищі розчин 2 мильний миючий засіб, а саме ПАР протягом 72 год суттєвих змін твердості не встановлено, дані наведено в таблиці 3, зміна склала 0,5 HD від початкового показника 12,5 HD. Відсутність суттєвих змін можна пояснити тим, що дослідний зразок протягом часу випробування насичувався вказаним агресивним матеріалом, також зміни кольору зафіксовано не було. Це можна пояснити тим, що зразок не зазнавав істотного впливу від речовини-агресивного середовища.

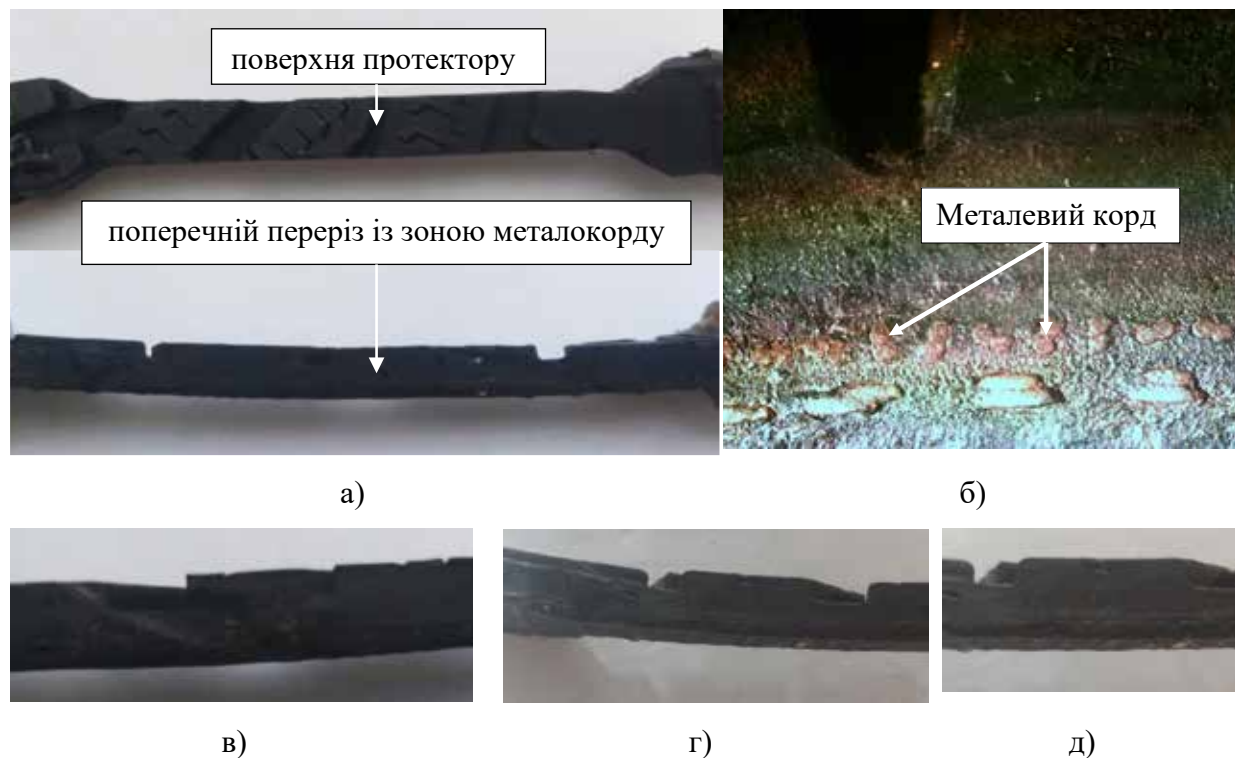


Рис. 2. Зразок пневматичної шини насичений агресивним середовищем ПАР: а) – загальний вигляд зразку; б) – мікроповерхня поперечного перерізу пневматичної шини із металокорду після випробувань; в), г), д) – вплив агресивного середовища на зони поперечного перерізу пневматичної шини після насичення агресивним розчином 2 під час випробувань

Таблиця 4

Витримка сухого зразка в гарячій камері (миючий засіб)

Час витримки, години		Твердість HD
Початкове значення		12,5
Час витримки при 100 °С, години		12
Час витримки при 200 °С, години	6	11
	9	10,5
	12	10

Таблиця 5

Попередня витримка зразка в розчині «засоби технічні очищення дорожнього покриття» при кімнатній температурі

Час витримки, години	Твердість за Шором, HD	Час витримки, години	Твердість за Шором, HD	Час витримки, години	Твердість за Шором, HD	Час витримки, години	Твердість за Шором, HD
0	12,5	9	12	30	12	54	12
1	12	12	12	36	12	60	12
3	12	18	12	42	12	66	12
6	12	24	12	48	12	72	12

В результаті проведених випробувань, а саме витримка зразку в агресивному середовищі морська сіль з водою 72 год суттєвих змін твердості не встановлено, яке наведено в таблиці 3 зміна склала 0,5 від початкового показника 12,5 HD. Відсутність суттєвих змін можна пояснити тим, що дослідний зразок протягом часу випробування насичувався вказаним агресивним матеріалом.

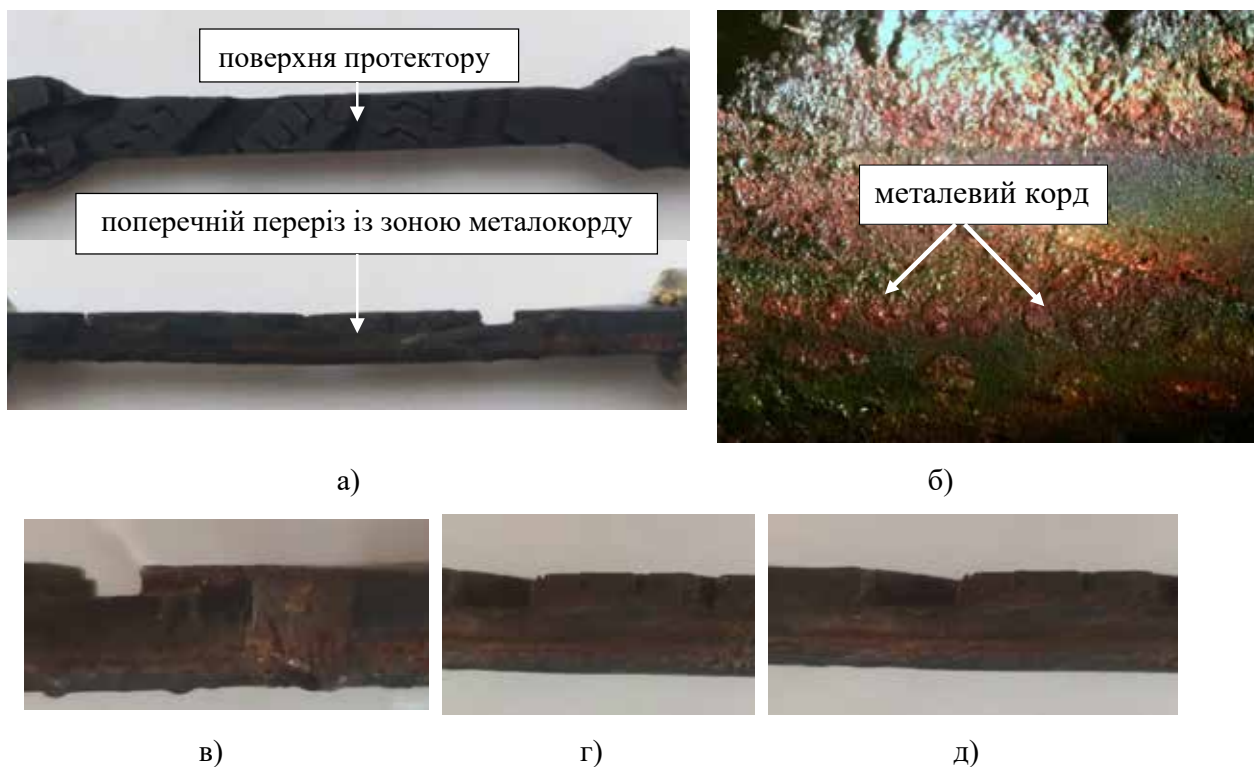


Рис. 3. Зразок пневматичної шини насичений агресивним середовищем «засоби технічні очищення дорожнього покриття» а) – загальний вигляд зразку; б) – мікроповерхня пневматичної шини з металокордом після випробувань; в), г), д) – вплив агресивного середовища на зони поперечного перерізу пневматичної шини після насичення агресивним Розчином 3 під час випробувань

Під час випробувань зразок 3, змінював колір металокорду від сірого до помаранчевого через зародження, утворення та виникнення явища корозії, це можна пояснити тим що зразок перебував в найбільш несприятливих умовах. Корозія частіше зустрічається в зоні контакту гума-метал або прилеглий до неї зоні. Контактна напруга та локальне насичення агресивного середовища рідини також істотно впливають на процес корозії.

Таблиця 6

Витримка сухого зразка в гарячій камері

Час витримки, години	Твердість HD	
Початкове значення	0	12,5
Час витримки при 200 °С, години	1	12
	6	11,2
	9	9,5
	12	8,5

Загальні результати випробувань проведених у сушильній камері для трьох вказаних зразків, а саме витримка 72 год у комплексі олійний та миючих засобів а також розчин технічні засоби очищення наведено в таблиці 7.

Таблиця 7

Загальні результати вимірювань

Години	HD		
	Зразок 1 в розчині комплексу олійно-мастильних сумішей	Зразок 2 в комплексі мильно-миючих емульсій	Зразок розчин 3 засоби технічні очищення дорожнього покриття
0	12,5	12,5	12,5
1	12	12	12
6	11	11,5	11,2
9	10,1	10,5	9,5
12	9,5	10	8,5

Експеримент проводився імітуючи реальні умови експлуатації шин та спираючись на досвід і результати досліджень і публікацій по темі [4, 5].

Зразки витримувались в розчині № 1 послідовно через інтервал часу 6 годин після чого висушувались при кімнатній температурі протягом 2 годин з наступним вимірюванням твердості (рис. 4). Низка зразків піддавалася градуйованому нагріванню в розчині з агресивним середовищем та відповідному хімічному складі.

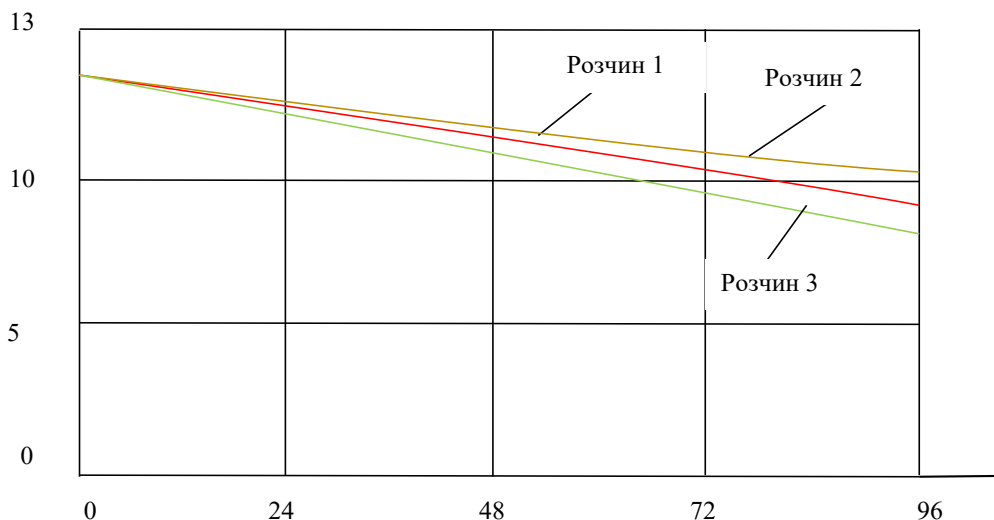
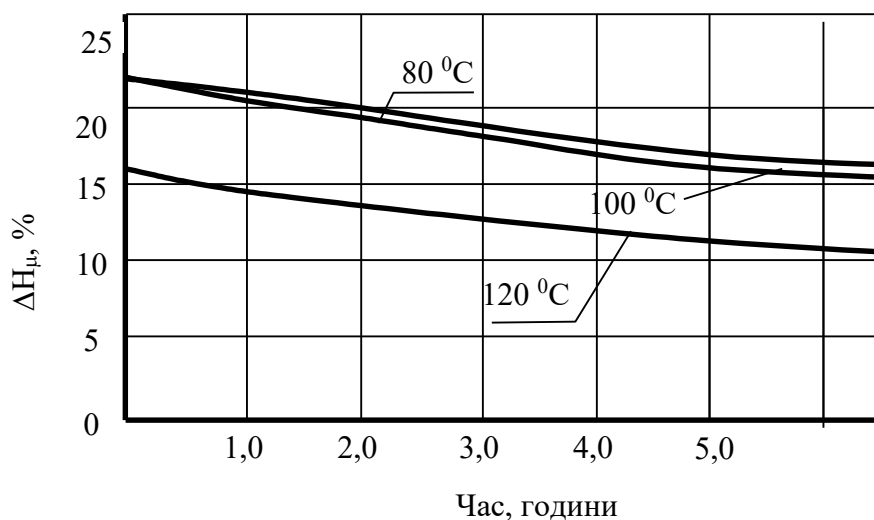


Рис. 4. Термомеханічні впливи та втомна міцність матеріалів в об'ємах матеріалу протектору

При термічному старінні гумо-кордної композиції автомобільної шини спостерігалася майже лінійна залежність механічних властивостей, за певний проміжок часу твердості за Шором (рис. 5), при початковому показникові 22,5 HD, орієнтовна середня швидкість втрати твердості складає 2,5 HD за год. Так, зразки що витримувались при 80 °C втрачають за 5 годин термічного пошкодження 8 одиниць HD від початкового значення. Подібна тенденція спостерігається і для зразків, що витримувались при 100 °C і 120 °C, що не суперечить даним авторів при термічному старінні [23].



а)

б)

Рис. 5. Експериментальні термоциклічні навантаження на втому матеріалу пневматичної шини в залежності від часу а) – діаграма; б) – обладнання шафа сушильна ШС-3

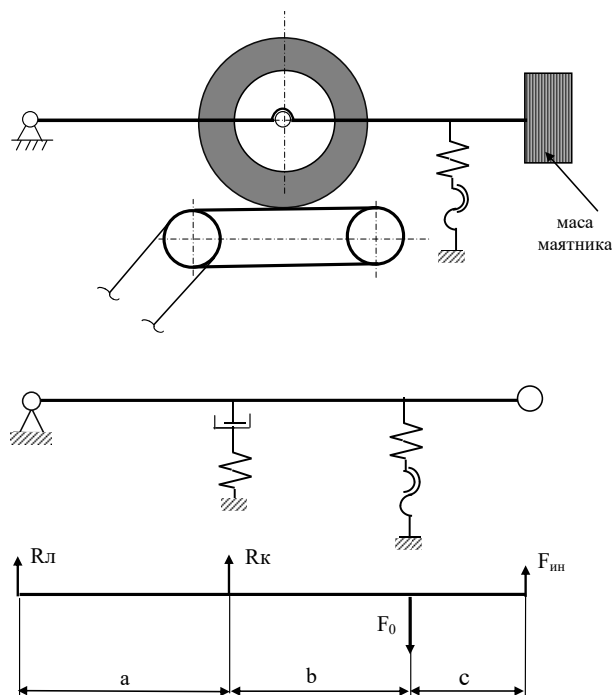
Дослідження проводилося на використаних шинах, що мали сукупний шлях експлуатації 50000 км, та 25000 км, та в окремих умовах, а саме робота на асфальтному покритті в містах, робота на асфальтному покритті

міжміські, переважна робота на ґрунтах. Дані впливи прийняті як механічні впливи до фіксації хімічної і термохімічної деградації.

Зроблено припущення, що ступінь накопичення пошкоджень та кінетика їх експлуатації та кінетика їх утворення при попередній експлуатації містять втомні, наслідки для металевих кордів еластомерної матриці.

Згідно класифікації наданих авторами видів пошкоджень можна припустити кількісні показники проникності ерозії від дії агресивних середовищ та накопиченої втоми складової кордів.

Ці дані корегувалися з формою пружної деформації шин з внутрішнім різним тиском 1, 1,5, 2, Атм. отриманих на стенді (рис. 6).



Кінематична схема



Спеціальний дослідний зразок

Рис. 6. Схема традиційного і спеціального чотирикоординатного стенду для випробування шин

Так бічні деформації у межах від 2 до 6 мм в середньому радіусі автомобільної шини з тиском одна атмосфера можуть бути відповідними зміні пошкоджень у бік деградації на рівні 1,5 млн циклів навантаження.

Деформація бічної частини під тиском 1 Атм., 1,5 Атм., 2 Атм. на вісь автомобіля 250 кг на рівні 6–10 мм, відповідає критичними умовам експлуатації на рівні 1 млн циклів навантаження.

Висновки

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що окремий термоциклічний вплив на матеріал протектора без змін армуючих волокон спостерігається при температурі 200 °С. Швидкість втрати твердості фіксується на рівні 2,5 та 3,5 одиниць із застосуванням агресивних середовищ, у вигляді агресивних та мастильно-миючих сумішей. Термоциклічний випробування у комплексі із зануренням зразків протектора пневматичної шини в середовищі мастильні суміші показали ефект пришвидшення деградації міцнісних характеристик на 24% від початкових даних твердості 12,5 HD, для миючих сумішей показник склав 20%, а для агресивних середовищ становить 32%. При початковому показникові 22,5 HD, орієнтовна середня швидкість втрати твердості складає 2,5 HD за год. Так, зразки що витримувались при 80 °С втрачають за 5 годин термічного пошкодження 8 одиниць HD від початкового значення.

Зроблено припущення, що ступінь накопичення пошкоджень та кінетика їх експлуатації та кінетика їх утворення при попередній експлуатації містять втомні, наслідки для металевих кордів еластомерної матриці.

Список використаної літератури

1. Gent A. N., Walter J. D. Pneumatic Tire / Mechanical Engineering Faculty Research. 2006. URL: https://ideaexchange.uakron.edu/mechanical_ideas/854/ (Last accessed: 05.09.2023).
2. Механіка шини: монографія / В.А. Перегон, В.А. Карпенко, Л.П. Гречко та ін. Харків: ХНАДУ, 2011. 404 с.

3. Ларін О.О. Комп'ютерне та математичне моделювання в задачах прогнозування надійності при поступових відмовах: монографія/ Ларін О.О., Водка О.О., Потопальська К.Є. Харків : НТУ «ХПІ», Юрайт 2020. 232 с. DOI: 10.20998/978-617-7450-20-6.

4. Ларін О.О. Експериментальні дослідження параметрів пружності та статичної міцності гумового композиту, що посиленний текстильним кордом / О. О. Ларін // Наукові нотатки. 2015. Вип. 52. С. 41–47. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2015_52_10.

5. Ларін О. О. (2016). Експериментальна оцінка опору втомі гумокордного композиту за ортогональної до арматури деформації до та після штучного старіння. Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Динаміка та міцність машин, (26), 63–68. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2016.26.79931>

6. Kotial, P., Krmela, J., Frydrek, K., & Ruiak, I. (2012). The Chosen Aspects of Materials and Construction Influence on the Tire Safety. In *Composites and Their Properties*. InTech. <https://doi.org/10.5772/48181>.

7. Baranowski, P., Bogusz, P., Gotowicki P., Malachowski J. (2012). Assessment of mechanical properties of offroad vehicle tire: Coupons testing and FE model development. *Acta Mechanica et Automatica*. 6(2) 17–22.

8. Niu, Y., Zhang, S., Tian, G., Zhu, H., & Zhou, W. (2020). “Estimation for Runway Friction Coefficient Based on Multi-Sensor Information Fusion and Model Correlation”. *Sensors* 20(14):3886, 1–22. <https://doi.org/10.3390/s20143886>

9. Gong, Y., Chen, X., Yi, J., & Wang, H. (2023). Hydrodynamics and Friction Estimation for Wet Tire/Ground Interactions. In *2023 American Control Conference (ACC)*. IEEE. <https://doi.org/10.23919/acc55779.2023.10156130>

10. Rahman, M. M., Khan, F., Kaiser, M. S., & Ahmed, S. R. (2018). Effect of thermal ageing on mechanical behavior of synthetic and natural rubber dominated short flat bars. In *DISRUPTIVE INNOVATION IN MECHANICAL ENGINEERING FOR INDUSTRY COMPETITIVENESS: Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanical Engineering (ICOME 2017)*. Author(s). <https://doi.org/10.1063/1.5044300>

11. Staszczak, M., Pieczyska, E. A., Maj, M., Urbański, L., Odriozola, I., & Martin, R. (2015). Thermomechanical Properties of Vulcanized Rubber investigated by Testing Machine and Infrared Camera. *Measurement Automation Monitoring*, 4, 206–209.

12. Kaiser, S., Rabbani, R., Ahmed, R., & Kaiser, S. (2021). Temperature Dependent Mechanical Properties of Natural and Synthetic Rubber in Practical Structures. *Acta Mechanica Slovaca*, 25(3), 6–14. <https://doi.org/10.21496/ams.2021.031>

13. Song, J. (2004). Fatigue of cord-rubber composites for tires. The Pennsylvania State University The Graduate School College of Engineering. (Original work published 2004).

14. Behroozinia, P., Mirzaeifar, R., & Taheri, S. (2017). A review of fatigue and fracture mechanics with a focus on rubber-based materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 233(5), 1005–1019. <https://doi.org/10.1177/1464420717719739>

15. Qiu, X., Yin, H., & Xing, Q. (2022). Research Progress on Fatigue Life of Rubber Materials. *Polymers*, 14(21), 4592. <https://doi.org/10.3390/polym14214592>

16. Krmela, J., & Krmelova, V. (2017). Tire casings and their material characteristics for computational modeling of tires. In *16th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*. Latvia University of Agriculture. <https://doi.org/10.22616/erdev2017.16.n043>

17. Kaiser, S., Kaiser, M. S., & Ahmed, S. R. (2020). Wear Behavior of Commercial Tire Rubber against Mild Steel in Dry, Wet and 3.5% NaCl Corrosive Environment. *Journal of Energy, Mechanical, Material, and Manufacturing Engineering*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.22219/jemmm.v5i1.10428>

18. Jiang, N., Zhang, R., Li, Y., Li, N., Dong, L., Chen, C., & Tan, C. (2022). Hydrothermal Aging Mechanisms of All-Steel Radial Tire Composites. *Polymers*, 14(15), 3098. <https://doi.org/10.3390/polym14153098>.

References

1. Gent A. N., Walter J. D. (2006) Pneumatic Tire / Mechanical Engineering Faculty Research. URL: https://ideaexchange.uakron.edu/mechanical_ideas/854/ (Last accessed: 05.09.2023).

2. Perehon V.A., Karpenko V.A., Hrechko L.P. ta in. (2011) *Mekhanika shyny: monohrafiya*. Kharkiv: KHNADU, 404 s.

3. Larin O.O. (2020) *Komp'yuterne ta matematychnye modelyuvannya v zadachakh prohnozuvannya nadiynosti pry postupovykh vidmovakh: monohrafiya*/ Larin O.O., Vodka O.O., Potopal's'ka K.YE. Kharkiv : NTU «KHPI», Yurayt. 232 s. DOI: 10.20998/978-617-7450-20-6.

4. Larin O.O. (2015) *Eksperymental'ni doslidzhennya parametriv pruzhnosti ta statychnoyi mitsnosti humovoho kompozytu, shcho posylyuye tekstyl'nym kordom* / O.O. O. Larin // *Naukovi notatky*. Vyp. 52. S. 41–47. Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2015_52_10.

5. Larin O. O. (2016). *Eksperymental'na otsinka opory vtomi humokordnoho kompozytu za ortohonal'noyi do armatury deformatsiyi do ta pislya shtuchnoho starinnya*. Visnyk NTU «KHPI» Seriya: Dynamika ta mitsnist' mashyn, (26), 63–68. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2016.26.79931>.

6. Kotial P., Krmela Dzh., Fridrek K. ta Ruyak I. (2012). Vybrani aspekty vplyvu materialiv i konstruktsiyi na bezpeku shyn. V Kompozyty ta yikh vlastyvoli. InTech. <https://doi.org/10.5772/48181>.
7. Baranovs'kyi, P., Bohush, P., Hotovits'kyi P., Malakhovs'kyi YA. (2012). Otsinka mekhanichnykh vlastyvolostey shyn pozashlyakhovykiv: vyprobuvannya zrazkiv ta rozrobka modeli FE. Acta Mechanica et Automatica. 6(2) 17–22.
8. Niu YU., Chzhan S., Tyan' H., Chzhu KH. ta Chzhou V. (2020). «Otsinka koefitsiyenta tertya na zlitno-posadkoviy smuzi na osnovi mul'tysensornoho ob'yednannya informatsiyi ta korelyatsiyi modeli». Datchyky 20(14):3886, 1–22. <https://doi.org/10.3390/s20143886>.
9. Hun, YU., Chen, X., YI, Dzh., i Van, KH. (2023). Hidrodynamika ta otsinka tertya dlya vzayemodiyi mokroyi shyny z zemleyu. U 2023 rotsi Amerykans'ka kontrol'na konferentsiya (ACC). IEEE. <https://doi.org/10.23919/acc55779.2023.10156130>.
10. Rakhman M. M., Khan F., Kayzer M. S. ta Akhmed S. R. (2018). Vplyv termichnogo starinnya na mekhanichnu povedinku syntetychno ta natural'noho kauchuku, de perevazhayut' korotki ploski stryzhni. V RIVNIVNI INNOVATSIYI V MASHYNOBUDUVANNI DLYA KONKURENTOBUDUVANNYA PROMYSLOVOSTI: Materialy 3-yi Mizhnarodnoyi konferentsiyi z mashynobuduvannya (ICOME 2017). Avtor(y). <https://doi.org/10.1063/1.5044300>
11. Stashchak, M., Pyechys'ka, E. A., May, M., Urbans'kyi, L., Odiozola, I., i Martin, R. (2015). Termomekhanichni vlastyvoli vulkanizovanoho kauchuku, doslidzheni testovoyu mashynoyu ta infrachervonoyu kameroyu. Monitorynh avtomatyzatsiyi vymiryuvan', 4, 206–209.
12. Kayzer S., Rabbani R., Akhmed R. ta Kayzer S. (2021). Temperaturno-zalezni mekhanichni vlastyvoli natural'noho ta syntetychno kauchuku v praktychnykh konstruktsiyakh. Acta Mechanica Slovaca, 25(3), 6–14. <https://doi.org/10.21496/ams.2021.031>.
13. Sonh, Dzh. (2004). Vtoma kordno-humovykh kompozytiv dlya shyn. Universytet shtatu Pensil'vaniya Vyscha shkola inzhenerneho koledzhu. (Oryhinal'na robota opublikovana 2004 r.).
14. Behroozinia, P., Mirzaeifar, R., & Taheri, S. (2017). Ohlyad mekhaniky vtomy ta ruynuvannya z aktsentom na materialakh na osnovi humy. Pratsi Instytutu inzheneriv-mekhanikiv, chastyna L: Zhurnal materialiv: proektuvannya ta zastosuvannya, 233(5), 1005–1019. <https://doi.org/10.1177/1464420717719739>.
15. Tsyu, X., In', H., i Xing, Q. (2022). Prohres doslidzhen' vtomnoyi dovhovichnosti humovykh materialiv. Polimery, 14(21), 4592. <https://doi.org/10.3390/polym14214592>.
16. Krmela, Dzh., i Krmelova, V. (2017). Pokryshky ta kharakterystyky yikh materialiv dlya komp'yuternoho modelyuvannya shyn. U 16-y Mizhnarodniy naukovopraktychniy konferentsiyi Inzheneriya dlya sil's'koho rozvytku. Latviys'kyi universytet sil's'koho hospodarstva. <https://doi.org/10.22616/erdev2017.16.n043>.
17. Kayzer S., Kayzer M. S. ta Akhmed S. R. (2020). Znoshuvanist' humy promyslovykh shyn proty m'yakoyi stali v sukhomu, volohomu ta koroziynomu seredovyshchi 3,5% NaCl. Journal of Energy, Mechanical, Material, and Manufacturing Engineering, 5(1), 1. <https://doi.org/10.22219/jemmme.v5i1.10428>.
18. Tszyan, N., Chzhan, R., Li, YU., Li, N., Donh, L., Chen, K., i Tan, K. (2022). Hidrotermichni mekhanizmy starinnya kompozytiv iz sutsil'nostalevykh radial'nykh shyn. Polimery, 14(15), 3098. <https://doi.org/10.3390/polym14153098>.