

УДК 539.388.1:678

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРУ ВТОМІ ГУМОВИХ СУМІШЕЙ, ЩО ВХОДЯТЬ ДО СКЛАДУ ЕЛЕМЕНТІВ ПНЕВМАТИЧНИХ ШИН ПІСЛЯ ШТУЧНОГО СТАРІННЯ МАТЕРІАЛУ

О. О. ЛАРІН

*Кафедра динаміки та міцності машин, Національний Технічний Університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
email: AlexeyA.Larin@gmail.com*

АНОТАЦІЯ У роботі визначаються показники опору втомі гумової суміші матриці каркасу пневматичних шин та закономірності їх зміни внаслідок старіння. Дослідження проводяться експериментально з плоскими зразками на розтяг із циклічним завданням деформацій. Особливо досліджувались зразки матеріалу до та після старіння. Старіння задавалось штучно шляхом тривалої витримки зразків в термокамері на фіксованій підвищеній температурі. Проведено порівняльний аналіз зміни параметрів кривих утоми з часом в наслідок старіння. В роботі також запропоновано апроксимацію зміни базового числа циклів до відмови з часом внаслідок старіння.

Ключові слова: зразки гуми, старіння, експериментальні тести на втому, каркас пневматичної шини.

АННОТАЦИЯ. В работе определяются показатели сопротивления усталости резиновой смеси матрицы каркаса пневматических шин и закономерности их изменения в результате старения. Исследования проводятся экспериментально с плоскими образцами на растяжение. Отдельно исследовались образцы материала до и после старения. Старение проводилось искусственно путем длительной выдержки образцов в термокамере на фиксированной повышенной температуре. Проведен сравнительный анализ изменения параметров кривых усталости со временем в результате старения. В работе также предложено аппроксимацию изменения базового числа циклов до отказа со временем в результате старения.

Ключевые слова: образцы резины, старения, экспериментальные тесты на усталость, каркас пневматической шины.

AN INVESTIGATION OF THE PNEUMATIC TIRE'S RUBBER COMPOUNDS ON THE FATIGUE RESISTANCE AFTER ARTIFICIAL AGING OF THE MATERIALS

O. LARIN

Dynamics and Strength of machines department, National Technical University "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The paper defines parameters of the fatigue resistance of the rubber mixture for matrix of pneumatic tire's carcass (belt) layers and the regularity of their changes due to aging. The research was conducted experimentally using a modern measuring system INSTRON. Tests has been carried out with flat specimens on cyclic tensile deformation in a displacement control condition. The amplitudes of deformation was fixed and the specimens cycles around the set middle level of deformation, that avoids the effect of specimen buckling. The results of the tests on cyclic deformation up to failure at different amplitudes of the load have been approximated by the straight lines in a double logarithmic coordinates, i.e. classical Wohler fatigue curves were obtained. The specimens before and after aging have been studied independently.

The aging of samples was gained artificially using the procedure of thermal prolonged exposure in a heat chamber at a fixed temperature. Based on the recommendations given in the literature, the samples were kept for 6 days at 80 °C, that corresponds to the natural aging of this material at a room temperature during the 2 years.

Comparative analysis of fatigue curves obtained for samples of the material before and after artificial aging shows that the slope of Wohler curves does not change over the time, but the basic number of cycles to failure is significantly reduced. The paper also proposed to use a hyperbolic relation for approximation of the changes in the base number of cycles to failure over a time due to aging. The parameters of the approximations for fatigue curves obtained relatively of the amplitudes of strains and Cauchy true stresses have been found independently for the rubber specimens of the pneumatic tire's carcass (belt) layers.

Keywords: rubber specimens, aging, experimental fatigue tests, carcass layers of the pneumatic tire.

Вступ

Однією з важливих особливостей еластостійких матеріалів, зокрема гумових сумішей, є прояв ефекту природного старіння [1–4]. Відомо, що гумоподібні матеріали здатні істотно змінювати свої фізико-хімічні властивості з часом. При чому такі характеристики, як статична міцність та опір утомі

можуть змінюватись в декілька разів за номінальний термін експлуатації конструкції для гумових елементів навіть, які не знаходяться в роботі (наприклад, під час зберігання) [5, 6]. Пружна поведінка та дисипативні властивості еластомерів також здатні істотно змінюватись з часом. Для пневматичних шин легкових автомобілів термін гарантованого зберігання (навіть не експлуатації)

© О. О. ЛАРІН, 2015

складає 5-6 років, після яких компанії виробники не рекомендують використовувати шини через низьку їх надійність, оскільки властивості гуми суттєво деградували [1–3]. Отже аналіз закономірностей зміни властивостей гумових матеріалів з часом є такою самою важливою проблемою, як і дослідження початкових характеристик цих матеріалів.

На процесі старіння впливає велика кількість зовнішніх факторів, серед яких найбільш суттєвими є термічне старіння, озонування (насичення киснем), вплив хімічних речовин (зокрема дуже агресивну дію реалізують нафтопродукти та сольові розчини), ультрафіолетове опромінення тощо [7–9]. Враховуючи означені фактори, сучасні елементи конструкцій, що мають гумові частини виготовляють з тим аби уникнути безпосереднього впливу зазначених факторів на несучі елементи конструкцій, тобто їх покривають захисними елементами. Наприклад, пневматичні шини мають в якості основних несучих елементів: каркас, брекер та бортову зону, які покриті із зовнішнього боку м'якою гумою бічної частини та протектором, які з точки зору міцності виконують функції захисту від впливу зовнішніх факторів, а з внутрішньої сторони сучасні шини покривають шаром герметика, який не пропускає кисень. Таким чином, за належного зберігання та правильної експлуатації особливий вплив на старіння відбувається переважно через механізми термічного старіння (решта факторів у будь-якому разі вносить свій певний вклад, наприклад, завжди присутнє дифузійне проникнення кисню у гуму) [10].

Термічне старіння – це процес зміни фізичних та хімічних характеристик гуми під дією температури [11]. Слід відзначити, що даний процес протікає за будь-яких позитивних значень температури (навіть за кімнатних) відбуваються процеси старіння. Звичайно, деградація є тим більш інтенсивною чим більшою є температура. Даний факт покладено в основу проведення прискорених випробувань гуми на механічну поведінку у штучно зістареному стані.

Слід наголосити на тому, що старіння впливає також і на показники опору втомі для цих матеріалів. При чому в літературі є досить обмежена інформація щодо впливу старіння на ці характеристики, а більшість відомих досліджень описують зміну у часі пружних параметрів та показників міцності. Проте саме зміна характеристик втомі даних матеріалів лежить в основі оцінки надійності елементів конструкцій, що складаються з гумоподібних матеріалів та гумокордних композитів.

Мега роботи

Метою даного дослідження є експериментальне визначення закономірностей зміни показників опору втомі гумової суміші каркасу пневматичних шин внаслідок їх штучного старіння.

Методика проведення процедури штучного старіння гумових матеріалів

Для штучного старіння зразки гуми витримувались тривалий час на фіксованій підвищеній температурі. Для цієї процедури використовувалась термо-камера (лабораторний сушильний шафа) литовського виробництва SNOL 44/200 LNP з примусовою конфекцією, яка оснащена мікропроцесорним контролером OMRON E5CK. Дана сушильна шафа надає можливість формувати програмний режим для створення та утримання рівномірного по камері температурного стану. Шафа дозволяє досить швидко (близько 3-х хвилин) виходити на стабільний температурний режим до 200 °C та утримувати його тривалий час на фіксованому рівні (під час роботи шафи можлива невелика варіація температури ± 2 °C за 2-3 години). На рис. 1 показана шафа, що використовувалась.



Рис. 1 – Зовнішній вигляд лабораторного сушильного шафи SNOL 44/200 LNP

Відомі в літературі дані, щодо штучного старіння пневматичних шин загалом та штучного старіння їх окремих елементів вказує на те що використання термо-камери з фіксованим рівнем температури 70 °C пришвидшує процеси старіння по характеристикам міцності у (30-40) разів [6]. Отже, звичайне старіння пневматичної шини за межі гарантованого терміну зберігання у 5 років еквівалентне перебуванню елементів шини в термо-камері із повітрям без додаткового тиску на температурі 70 °C (6,5 – 7,5) тижнів. У зазначених довідкових джерелах та рекомендаціях по пришвидшеному штучному старінню гумових матеріалів зазначається, що процедури штучного старіння слід проводити не перевищуючи температури 100 °C, а оптимальним вважається значення в межах (60-70) °C. Такі обмеження пов'язані із можливістю виникнення сторонніх хімічних реакцій у гумі за високих температур, і таким чином отримані результати не будуть відповідати природному старінню. Тим не менше в літературі є приклади дослідження старіння шинних

гум на температурі 90 °С, а також слід відмітити, що в пневматичних шинах під час експлуатації можливе підвищення температури в межах 100 °С, тобто гумові суміші, що застосовуються в шинах є термостійкими в межах 100 °С.

З метою пришвидшення штучного старіння при дослідженнях, що проводились в даній роботі використовувалось старіння на температурі 80 °С. Еквівалентні значення по часу зберігання (експлуатації) шин в звичайних умовах можна визначити з моделі Арреніуса для розрахунку коефіцієнту зміщення:

$$k = \exp\left[\frac{E_0}{R}\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)\right], \quad (1)$$

де k – коефіцієнту зміщення, який показує у скільки разів менше часу необхідно витримати зразок в умовах з температурою T_1 для того щоб його властивості міцності змінилися так само як для зразку матеріалу який перебуває у температурі T_2 ; E_0 – енергія активзації хімічних реакцій (або фізичних процесів, наприклад дифузії) в матеріалі, R – універсальна газова стала ($R = 8,31446$ Дж/(моль·К)); T_1 та T_2 – температуру для станів що порівнюються, які задані в Кельвінах.

Енергія активації E_0 є емпіричним параметром, який необхідно визначити з порівняння певної характеристики визначеної після витримки заданий час на різних температурах. Так, наприклад, для характеристик міцності гумових сумішей пневматичних шин відомо, що найбільший коефіцієнт зміщення складає 40 для матеріалу, що знаходиться при температурі 70 °С у порівнянні до матеріалу, який є у звичайних умовах. Використання формули (1) для окреслених вище параметрів дозволяє визначити енергію активації для процесу деградації властивостей міцності гумових зразків пневматичних шин $E_0 = 105$ кДж/моль.

Використовуючи отримане значення для енергії активації, можна розрахувати коефіцієнт зміщення для гумових зразків витриманих і за більшої температури. В даній роботі для прискореного старіння було використано витримку зразків 3 та 6 дб у термо-камері на температурі 80 °С, що відповідає перебуванню цього матеріалу в нормальних умовах протягом 1 та 2 років.

Експериментальні визначення показників кривих утоми для гумових матеріалів до та після штучного старіння

В даній роботі було проведено серію експериментальних випробувань на циклічну втому гумових зразків матриці каркасу (брекеру) в пневматичних шинах легкових автомобілів. Експерименти проводились на одновісний розтяг з плоскими зразками до та після їх штучного старіння.

Для досліджень було використано зразки гуми геометрія яких відповідає вимогам стандартів, щодо механічних випробувань гумоподібних матеріалів ISO 527 1BA (рис. 2).

Зразки мали наступні фактичні геометричні параметри: товщина: $h = 1 \pm 0.1$ мм; ширина: $b = 5.4$ мм; довжина робочої частини: $L = 58$ мм; загальна довжина: $L_{sp} = 80$ мм. Товщина зразків мала 10% варіацію внаслідок виробничих допусків, що існують при виготовленні гумового листу. Решта параметрів мала чіткі значення оскільки усі зразки було отримано шляхом вирублення їх одним і тим самим штампом стандартного розміру. На рис. 2 наведено ескізне креслення геометрії зразків.

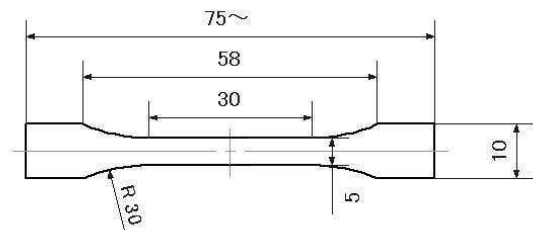


Рис. 2 – Геометрія зразків для випробувань

Зразки жорстко фіксувались у пневматичних затискачах, як показано на рис. 3. Пневматичні затискачі дозволяють утримувати фіксоване значення зусилля, що утримує зразок навіть при зменшенні його товщини внаслідок прояву ефекту Пуассона при великих деформаціях еластостійких матеріалів. При випробуваннях на втому задавалось жорстке циклічне навантаження, тобто задавались фіксовані значення деформації зразку, при цьому вимірювалось зусилля, що виникає у нижньому затискачі (використовувався стандартний сенсор даної машини із максимально можливим зусиллям у 3 кН \pm 0,01 Н).

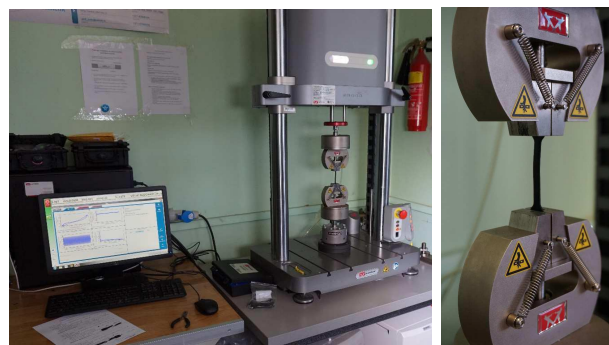


Рис. 3 – Фіксація зразків у вимірювальному комплексі INSTRON E3000 для проведення циклічних тестів

З метою уникнення прояву ефекту втрати статичної стійкості деформування зразків було без стискання. Таким чином проводилось циклічне деформування при жорсткому навантаженні (здавались деформації) із фіксованими середнім

рівнем деформації в циклі (100 %) та з різними амплітудами: 80 %, 66 % та 50 %. Частота циклів складала 5 Гц. Дане значення було знайдено з міркувань забезпечення відсутності динамічної складової у поведінці зразку (деформації проходила квазістатично), а також забезпечувало відсутність помітного нагріву зразків (при більших значеннях спостерігались вібрації випробувальної машини та складна полігармонічна поведінка зразків).

Крім того тести на втомну довговічність проводились для стабілізованого матеріалу, тобто спочатку виконувалось 10 циклів деформації зразка з якого після цього знімалось повністю навантаження. Така попередня процедура дозволяла позбавитись впливу ефекту Маліна на подальші результати.

Експериментальні точки було апроксимовано прямою лінією у подвійних логарифмічних координатах, тобто відповідно до рівняння Велера:

$$\sigma_a^m \cdot N = \sigma_{-1}^m \cdot N_0, \quad (2)$$

де N – кількість циклів деформації до відмови по

втомі при амплітуді напружень σ_a ; m – показник нахилу кривої Велера, N_0 – базове число циклів до відмови, σ_{-1} – теоретична (умовна) границя втоми, тобто під σ_{-1} розумітимуться амплітуди напружень за яких відмова зразку буде спостерігатись через базове число циклів (N_0).

В даній роботі було проведено апроксимації таким чином, що було зафіксовано базовий рівень амплітуд деформування на рівні 50% і при цьому параметрами кривої Велера, що підлягають визначенню вважались показник нахилу цієї кривої m та кількість циклів N_0 до руйнування зразку.

На рис. 4 представлені криві втоми для зразків гумової суміші каркасу (брекеру) пневматичних шин після їх штучного старіння (6 діб в термо-камері при температурі 80 °C) в порівнянні до приведених кривих втоми цього ж матеріалу до старіння. На рисунках верхні криві та сині точки відповідають даним отриманим для зразків до старіння, а нижні криві та червоні точки відповідно – кривим втоми після штучного старіння.

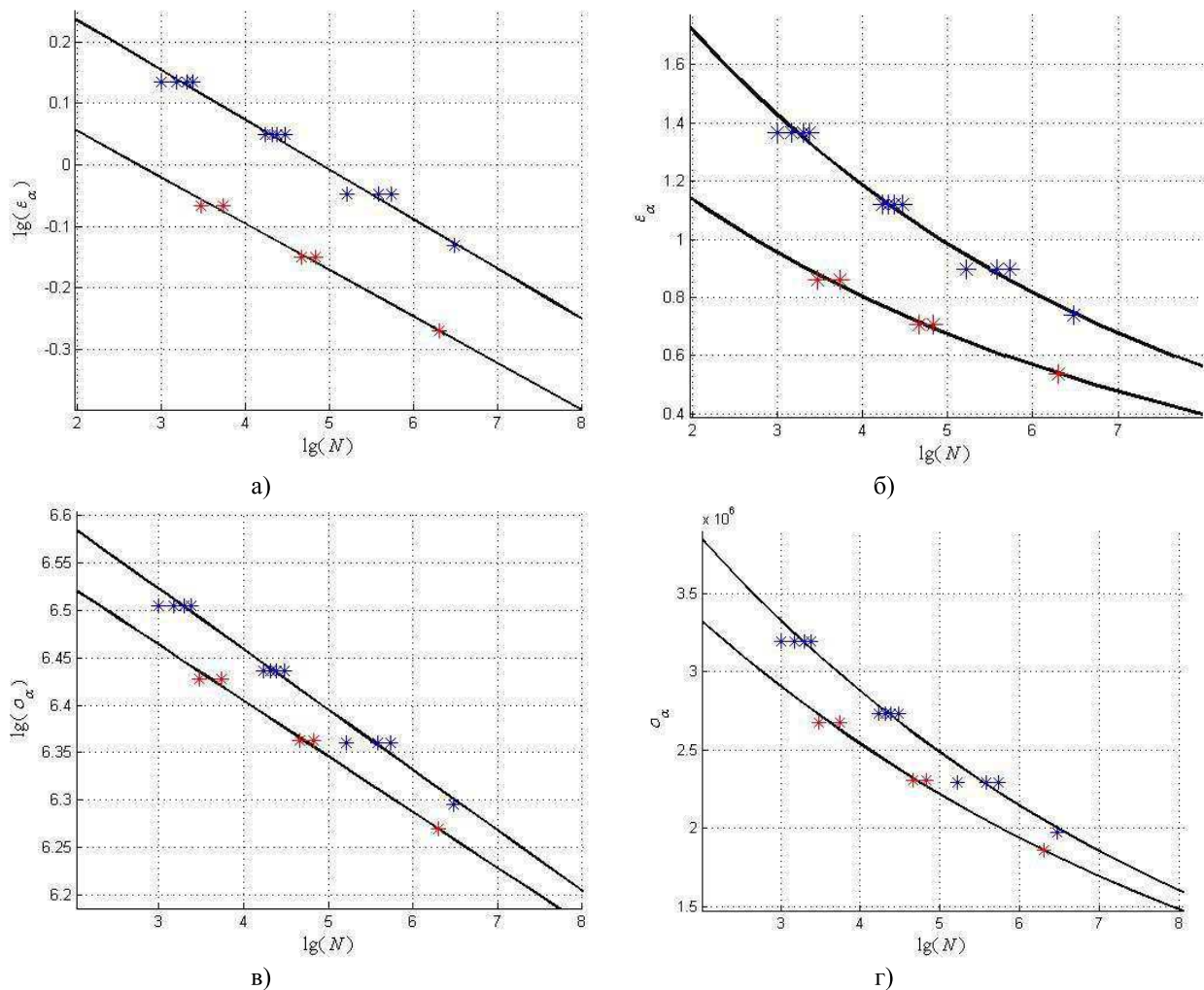


Рис. 4 – Криві втоми гумової суміші матриці каркасу (брекеру) пневматичних шин до (верхні криві) та після штучного старіння (6 діб в термо-камері на температурі 80 °C) представлені для амплітуд деформацій (а, б) та істинних напружень (в, г).

Порівняння кривих втоми побудованих окремо для амплітуд деформацій та істинних напружень Коші для гумової суміші каркасу пневматичних шин до та після штучного старіння показує, що показник нахилу кривої втоми не зазнає вираженої зміни і може вважатись сталим. Також очевидним є якісний висновок, щодо того, що спостерігається суттєве зменшення кількості циклів до відмови, яке може витримати даний матеріал після старіння.

Порівняльний аналіз показує, що базове число циклів до відмови на фіксованому рівні амплітуд деформацій у 50 % зменшилось у 80 разів, а аналогічне зменшення по кривим, що побудовані для істинних напружень спостерігається у 35 разів. В таблиці 1 наведено дані по характеристикам кривих втоми до та після старіння.

Таблиця 1 – Параметри кривих втоми для гумової суміші матриці каркасу (брекеру) пневматичних шин до та після штучного старіння

матеріал	параметри кривої втоми			
	для деформацій		для істинних напружень	
	m	N_0	m	N_0
у первісному стані	13	$4 \cdot 10^8$	16	$6,3 \cdot 10^8$
після штучного старіння	13	$5 \cdot 10^6$	17	$1,8 \cdot 10^7$

В даній роботі пропонується вважати, що старіння призводить до зменшення кількості циклів до відмови на фіксованому рівні навантаження аналогічно як відбувається зміна характеристик міцності – за гіперболічною залежністю, яку можна представити рівнянням:

$$N_0 = \frac{N_{00}}{(1 + \gamma \cdot t)}, \quad (3)$$

де N_{00} – початкове значення, тобто кількість циклів до відмови на фіксованому рівні навантаження (відповідає деформуванню із амплітудами деформацій у 50%) для матеріалу, що не зазнав старіння; γ – коефіцієнти спаду (швидкість зміни) внаслідок старіння кількість циклів до відмови на фіксованому рівні навантаження. Використовуючи дані з таблиці 1 було визначено наступні параметри апроксимації (3): $N_{00} = 4 \cdot 10^8$; $\gamma = -0.109$ – для кривої Велера, яка побудована відносно деформацій, а також $N_{00} = 6,3 \cdot 10^8$; $\gamma = -0.0875$ – для кривої Велера, яка побудована відносно істинних напружень Коші. На рис. 5 графічно наведено залежності (3).

Точками позначено експериментальні дані, які є приведеними у часі до нормального старіння відповідно до моделі Арреніуса. На рисунках

приведено залежності зміни логарифму кількості циклів до відмови внаслідок старіння від часу.

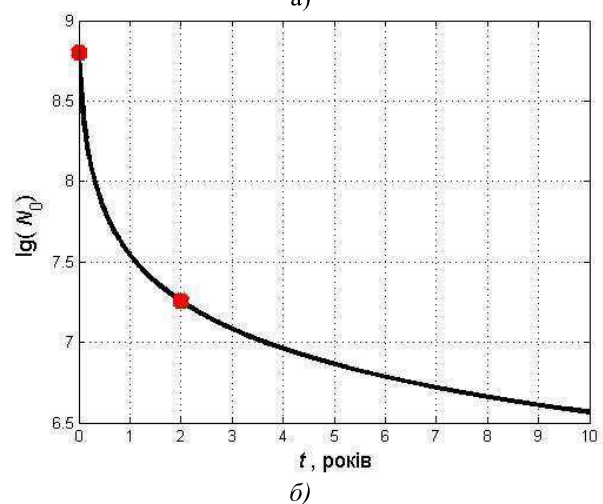
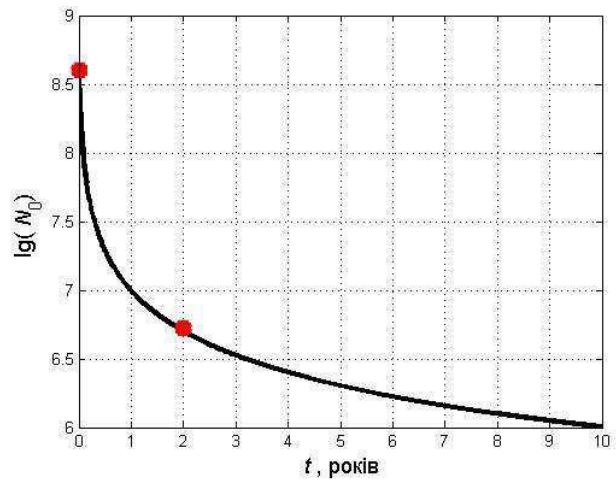


Рис. 5 – Криві зміни характеристик втоми (кількості циклів до відмови при фіксованому жорсткому навантаженні із амплітудою деформацій 50%) при старінні гумових зразків з матриці каркасу (брекеру) в пневматичних шинах для кривої Велера, яка побудована відносно деформацій (а) та істинних напружень Коші (б)

Із представлених залежностей можна побудувати екстраполяцію зміни характеристики опору втоми даного матеріалу на більший термін роботи (або зберігання). Аналіз графіків показує, що за 10 років базове число циклів до відмови змінюється більш ніж на 2 порядки.

Висновки

В роботі проведено комплекс експериментальних випробувань гумових зразків матриці каркасу (брекеру) пневматичних шин легкових автомобілів на втомну міцність до та після їх штучного старіння. Процедура старіння

проводились шляхом витримки зразків у термокамері на фіксованій температурі 80 оС протягом 6 діб. Встановлено за моделлю Арреніуса, що така витримка для даного матеріалу відповідає його природному старінню протягом 2х років.

В рамках дослідження побудовані криві втоми (криві Велера) по деформаціям та істинним напруженням Коші для зразків гуми каркасу пневматичних шин до та після процедури штучного старіння. Порівняльний аналіз отриманих результатів показує, що показник нахилу кривих втоми не змінюється через старіння в той час як базове число циклів до відмови суттєво зменшилось (більш ніж на порядок). Так, за два умовних роки базове число циклів до відмови гумових зразків матриці каркасу (брекеру) пневматичних шин зменшилось у 80 та 35 разів відповідно для кривих втоми побудованих відносно деформацій та істинних напружень Коші. З метою узагальнення результатів в роботі проведено апроксимацію зміни у часі базового числа циклів до відмови в наслідок старіння матеріалу за гіперболічною залежністю.

Список літератури

- 1 **Юрченко, А. Н.** Автомобильные шины (требования, эксплуатация, износ) / **А. Н. Юрченко.** – Харьков: ДП ХМЗ «ФЭД». – 2003. – 115 с.
- 2 **Clark, S. K.** Mechanics of Pneumatic Tires, US Department of Transportation, Dot HS 805952, Washington, DC, 2006.
- 3 **Ларин, А. А.** Исследование закономерностей деформирования пневматических шин в контакте с дорогой у учетом наличия эксплуатационной деградации материала / **Ю. В. Арефин, А. А. Ларин** // *Механіка та машинобудування: Науково-технічний журнал.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №2. – С. 52-57.
- 4 **Овчаров, В. И.** Свойства резиновых смесей и резин: оценка регулирование, стабилизация / **В. И. Овчаров, М. В. Бурмистр, А. Г. Смирнов, В. А. Тютин, В. В. Вербас, А. П. Науменко.** – М.: «САНТ-ТМ». – 2001. – 400 с.
- 5 **Baldwin, J. M.** Rubber aging in tires. part 1: field results / **J. M. Baldwin, D. R. Bauer, K. R. Ellwood** // *Polymer Degradation and Stability.* – 2007. – Vol. 92, No. 1. – P. 103-109.
- 6 **Bauer, D. R.** Rubber aging in tires. part 2: accelerated oven aging tests / **D. R. Bauer, J. M. Baldwin, K. R. Ellwood** // *Polymer Degradation and Stability.* – 2007. – Vol. 92, No. 1. – P. 110-117.
- 7 **Choi, J.-H.** Heat aging effects on the material property and the fatigue life of vulcanized natural rubber, and fatigue life prediction equations / **J.-H. Choi, H. Jin Kang, H.-Y. Jeong [et al.]** // *Journal of Mechanical Science and Technology.* – 2005. – Vol. 19, No. 6. – P. 1229-1242.
- 8 **Huang, D.** Development of a service-simulating, accelerated aging test method for exterior tire rubber compounds i. cyclic aging / **D. Huang, B. J. LaCount, J. M. Castro, F. Ignatz-Hoover** // *Polymer Degradation and Stability.* – 2001. – Vol. 74, No. 2. – P. 353-362.
- 9 **Hansaka, M.** Investigation on aging of train rubber hose. / **M. Hansaka, M. Ito, N. Mifune** // *Quarterly Report of RTRI.* – 1999. – Vol. 40, No. 2. – P. 105-111.
- 10 **LaCount, B. J.** Development of a service-simulating, accelerated aging test method for exterior tire rubber compounds ii. design and development of an accelerated outdoor aging simulator / **B. J. LaCount, J. M. Castro, F. Ignatz-Hoover** // *Polymer Degradation and Stability.* – 2002. – Vol. 75, No. 2. – P. 213-227.
- 11 **Woo, C. S.** Heat-aging effects on the material properties and fatigue life prediction of vulcanized natural rubber / **C. S. Woo, W. D. Kim** // *e-Journal of Soft Materials.* – 2006. – Vol. 2. – P. 7-12.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Yurchenko, A. M.** Car tires (rudiments, exploitation and wear). Kharkiv: DP HMZ «FED», 2003, 115 p.
- 2 **Clark, S. K.** Mechanics of Pneumatic Tires, US Department of Transportation, Dot HS 805952, Washington, DC, 2006.
- 3 **Larin, O. O., Arefin, Yu. V.** Investigation of regularities of deformation pneumatic tires in contact with the road takes into account an availability of operational material degradation, *Mehanika ta mashinobuduvannya: Naukovo-tehnichnyi gurnal*, Kharkiv: NTU «KhPI», 2011, **2**, 52-57.
- 4 **Ovcharov, V. I., Burmistr, M. V., Smirnov, A. G., Tutin, V. A., Verbas, V. V., Naumenko O. P.** The properties of rubber and rubber compounds: estimation, regulation and stabilization, Moskow: «SANT-TM», 2001, 400 p.
- 5 **Baldwin, J. M., Bauer, D. R., Ellwood, K. R.** Rubber aging in tires. part 1: field results, *Polymer Degradation and Stability*, 2007, **92**(1), 103-109.
- 6 **Bauer, D. R., Baldwin, J. M., Ellwood, K. R.** Rubber aging in tires. part 2: accelerated oven aging tests, *Polymer Degradation and Stability*, 2007, (92)1, 110-117.
- 7 **Choi, J.-H., Jin Kang, H., Jeong, H.-Y.** [et al.] Heat aging effects on the material property and the fatigue life of vulcanized natural rubber, and fatigue life prediction equations, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2005, **19**(6), 1229-1242.
- 8 **Huang, D., LaCount, B. J., Castro, J. M., Ignatz-Hoover, F.** Development of a service-simulating, accelerated aging test method for exterior tire rubber compounds i. cyclic aging, *Polymer Degradation and Stability*, 2001, **74**(2), 353-362.
- 9 **Hansaka, M., Ito, M., Mifune, N.** Investigation on aging of train rubber hose. *Quarterly Report of RTRI*, 1999, **40**(2), 105-111.
- 10 **LaCount, B. J., Castro, J. M., Ignatz-Hoover, F.** Development of a service-simulating, accelerated aging test method for exterior tire rubber compounds ii. design and development of an accelerated outdoor aging simulator. *Polymer Degradation and Stability*, 2002, **75**(2), 213-227.
- 11 **Woo, C. S., Kim, W. D.** Heat-aging effects on the material properties and fatigue life prediction of vulcanized natural rubber. *e-Journal of Soft Materials*, 2006, **2**, 7-12.

Надійшла (received) 15.10.2015