

О.О. Ларін, к.т.н., доц.

Національний технічний університет «ХПІ»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРУЖНОСТІ ТА СТАТИЧНОЇ МІЦНОСТІ ГУМОВОЇ СУМІШІ, ЩО ВХОДИТЬ ДО СКЛАДУ ЕЛЕМЕНТІВ ПНЕВМАТИЧНИХ ШИН ПІСЛЯ ЇЇ ШТУЧНОГО СТАРІННЯ

Визначено показники пружності та статичної міцності гумових сумішей, що застосовуються у пневматичних шинах, та закономірності їх зміни внаслідок старіння. Дослідження проводяться експериментально з плоскими зразками на розтяг до руйнування та з циклічним завданням деформацій, що дозволили проаналізувати їх гіперпружну поведінку на малих та помірних деформаціях. Дослідження проводились зі зразками матеріалу до та після їх старіння, яке задавалось штучно шляхом тривалої витримки зразків в термокамері за фіксованої підвищеної температури. Проведено порівняльний аналіз зміни параметрів кривих деформації зразків гуми каркасу (брекеру) пневматичних шин з часом внаслідок старіння, який показує, що старіння суттєво зменшує максимальні деформації на розрив та підвищує жорсткість матеріалу. Запропоновано лінійну залежність для апроксимації зміни характеристик жорсткості (початкового модуля пружності та другого параметра моделі Муни–Рівліна) від часу. Окремо також представлено гіперболічну залежність для опису зменшення у часі показників міцності матеріалу, що викликані внаслідок його старіння.

Ключові слова: зразки гуми; пружність; міцність; каркас пневматичної шини; старіння.

Постановка проблеми. 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. Причому такі характеристики, як статична міцність та опір утомі для гумових елементів за номінальний термін експлуатації конструкції можуть змінюватись в декілька разів навіть для тих, які не знаходяться в роботі (наприклад, під час зберігання) [5, 6]. Пружна поведінка та дисипативні властивості еластомірів також здатні істотно змінюватись з часом. Для пневматичних шин легкових автомобілів термін гарантованого зберігання (навіть не експлуатації) складає 5–6 років, після яких компанії виробники не рекомендують використовувати шини через низьку 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.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На процеси 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 вкривають захисними елементами. Наприклад, пневматичні шини мають за основні несучі елементи: каркас, брекер та бортову зону, які вкриті із зовнішнього боку м'якою гумою бічної частини та протектором, що, з точки зору міцності, виконують функції захисту від впливу зовнішніх факторів, а з внутрішнього боку сучасні шини вкривають шаром герметика, що не пропускає кисень. Таким чином, за належного зберігання та правильної експлуатації особливий вплив на старіння відбувається переважно через механізми термічного старіння (решта факторів також робить 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 зазначити, що даний процес відбувається за будь-яких позитивних значень температури (навіть за кімнатної). 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.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є експериментальне визначення закономірностей зміни характеристик пружності та статичної міцності гумоподібних матеріалів, що є складовими частинами елементів пневматичних шин після їх штучного старіння.

Викладення основного матеріалу. Для штучного старіння зразки гуми витримувались тривалий час на фіксованій підвищеній температурі. Для цієї процедури використовувалась термокамера (лабораторна сушильна шафа) SNOL 44/200 LNP (рис. 1) 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 хв.) 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 год.).



Рис. 1. Зовнішній вигляд лабораторної сушильної шафи SNOL 44/200 LNP

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

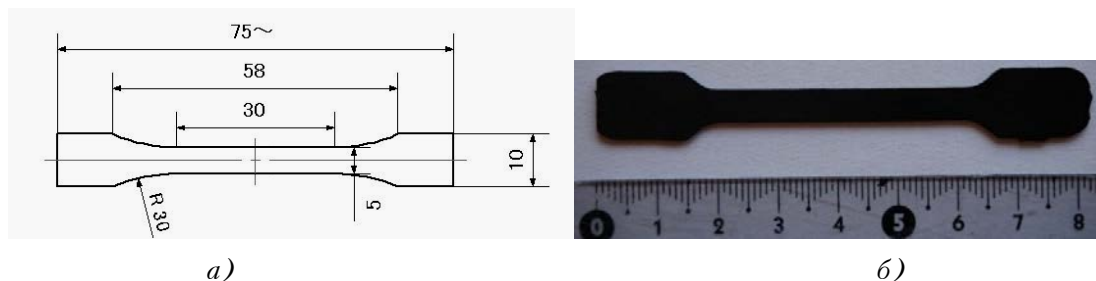


Рис. 2. Геометрія зразків для випробувань

Відомі в літературі дані щодо штучного старіння пневматичних шин в цілому та штучного старіння їх окремих елементів зокрема вказує на те, що використання термокамери з фіксованим рівнем температури 70 °C пришвидшує процеси старіння за характеристиками міцності у 30–40 разів. Отже, звичайне старіння пневматичної шини за межі гарантованого терміну зберігання у 5 років еквівалентне перебуванню елементів шини в термокамері із повітрям без додаткового тиску за температури 70 °C 6,5–7,5 тижнів. У зазначених довідкових джерелах та рекомендаціях з пришвидшеного штучного старіння гумових матеріалів зазначається, що процедуру штучного старіння слід проводити, не перевищуючи температури 100 °C, а оптимальним вважається значення в межах 60–70 °C. Такі обмеження пов'язані з можливістю виникнення сторонніх хімічних реакцій у гумі за високих температур, отже отримані результати не будуть відповідати природному старінню. Тим не менше, в літературі є приклади дослідження старіння шинних гум за температури 90 °C, а також слід зазначити, що у пневматичних шинах під час експлуатації можливе підвищення температури в межах 100 °C є типовим явищем і тому гумові суміші, що застосовуються в шинах, є термостійкими в межах 100 °C.

З метою пришвидшення штучного старіння в дослідженнях, що проводились в даній роботі, використовувалось старіння за температури 80 °С. Еквівалентні значення за часом зберігання (експлуатації) шин в звичайних умовах можна визначити з моделі Арреніуса для розрахунку коефіцієнта зміщення:

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

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

Енергія активації E_0 є емпіричним параметром, який необхідно визначити з порівняння необхідної характеристики визначеної після витримки за певний час за різних температур. Так, наприклад, для характеристик міцності гумових сумішей пневматичних шин відомо, що найбільший коефіцієнт зміщення складає 40 для матеріалу, що знаходиться за температури 70 °С, порівняно до матеріалу, що знаходиться у звичайних умовах. Використання (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, що витримані і за більшої температури. В цій роботі для прискореного старіння було використано витримку зразків 3 та 6 діб у термокамері за температури 80 °С, що відповідає перебуванню цього матеріалу в нормальних умовах протягом 1 та 2 років. У таблиці 1 представлено результати натурних випробувань на міцність зразків гуми каркасу (брекеру) пневматичних шин легкових автомобілів після штучного старіння. Наведено значення деформацій на розрив (граничних деформацій), ε_u ; граничні Піала–Кірхгофа напруження, S_u ; граничні істинні напруження Коші σ_u . Для наочності в таблиці додано значення характеристик міцності матеріалу в первісному стані та відносні значення (відношення параметрів міцності після штучного старіння до первісного стану, наприклад, $\varepsilon_u/\varepsilon_u^0$).

Таблиця 1

Характеристики міцності гумової суміші каркасу (брекеру)
в пневматичних шинах після штучного старіння

Показник	Матеріал								
	у первісному стані			після штучного старіння в термокамері за температури 80 °С					
				3 доби			6 діб		
ε_w , %	638	575	610	532	450	473	390	430	330
$\langle \varepsilon_u \rangle$, %	610			485			383,3		
$\varepsilon_u/\varepsilon_u^0$	1			0,8			0,63		
S_w , МПа	22,3	19	20,6	21,5	18	20,5	18,4	17,4	18,85
$\langle S_u \rangle$, МПа	20,6			20			17,4		
S_u/S_u^0	1			0,97			0,85		
σ_w , МПа	164	128	146	135,8	99	117,5	90	92,2	81
$\langle \sigma_u \rangle$, МПа	146			117,4			87,4		
σ_u/σ_u^0	1			0,8			0,6		

Аналіз наведених значень вказує, що старіння суттєво зменшує максимальні можливі деформації в даному матеріалі. Так, граничні деформації на розрив внаслідок старіння зменшуються на 20 % за перший рік та більш ніж на 40 % за другий (фактично встановлено, що граничні значення деформацій зменшуються на 20 % за кожні 3 доби перебування в термокамері за температури 80 °С). Щодо граничних Піала–Кірхгофа напружень, то отримано, що середні значення знаходяться в межах звичайного розкиду отриманих експериментальних даних, тому можна зробити висновок, що ці напруження істотно не змінюються при старінні

матеріалу за вказаний час. Разом із тим, граничні істинні напруження Коші зменшуються досить суттєво на понад 20 % на рік. Отримані закономірності вказують на те, що зменшення істинної міцності супроводжується процесом набуття гумовим матеріалом більшої жорсткості. В таблиці 2 представлено закономірності зміни внаслідок старіння інженерних характеристик пружності «початковий модуль», «модуль 100» та «модуль на розрив», а також параметрів неогуківської моделі та моделі Муні–Рівліна.

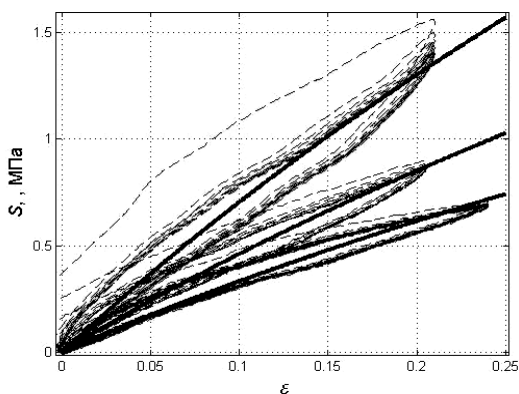
Аналіз наведених результатів, що зведені до таблиці 2, вказує на те, що усі «модулі пружності» отримали істотне підвищення. Окремо слід наголосити, що початковий модуль та «модуль 100» продемонстрували однаковий відносний рівень зміни. Так, за 1 умовний рік старіння даний матеріал (гумова суміш каркасу (брекеру) пневматичних шин) модулі пружності підвищились у 1,5 раза, за 2 умовні роки – майже у 2 рази. Модуль на розрив змінився не так істотно: його зміна кількісно (у відносному сенсі) та якісно повторює зміну характеристик міцності. У роботі для матеріалу після штучного старіння було проведено визначення характеристик законів нелінійного деформування. На малих рівнях деформацій використовувалась модель неогуківського матеріалу, параметр якої є початковим модулем зсуву (табл. 2), а для помірних рівнів деформацій використовувалась модель Муні–Рівліна.

На рисунку 3 наведено криві деформації зразків гуми каркасу (брекеру) пневматичних шин на малих рівнях (рис. 3, а) та за помірних деформаціях (рис. 3, б). На кожному рисунку представлено залежності інженерних напружень від деформацій для матеріалу в стабілізованому стані для первісного матеріалу та після його штучного старіння. Пунктирні криві є експериментальними даними, а грубі чорні криві – апроксимації відповідними законами. На рисунках знизу вгору наведено криві для первісного стану та після штучного старіння 3 та 6 діб у термокамері за температури 80 °С, що відповідає природному старінню в 1 та 2 роки.

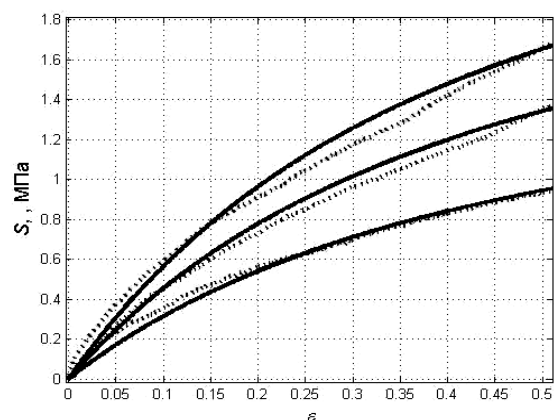
Таблиця 2

*Характеристики міцності гумової суміші каркасу (брекеру)
в пневматичних шинах після штучного старіння*

Характеристика пружності		Матеріал		
		у первісному стані	після штучного старіння в термокамері за температури 80 °С	
			3 доби	6 діб
початковий модуль	E , МПа	3,5	5,05	7,2
«модуль 100»	E_{100} , МПа	1,4	2,2	3,1
початковий модуль зсуву	G , МПа	1,2	1,685	2,57
параметри моделі Муні–Рівліна	C_{01} , МПа	0,1	0,1	0,1
	C_{10} , МПа	0,52	0,785	0,994



а)



б)

Рис. 3. Криві деформування гумових зразків каркасу (брекеру) пневматичних шин за малих (а) та помірних (б) деформаціях у первісному стані та після штучного старіння (витримка 3 та 6 діб у термокамері за температури 80 °С)

Отримані залежності зі зміни характеристик міцності та пружності якісно добро узгоджуються з існуючими в літературі даними. Відомо, що старіння призводить до зміни «модуля пружності» як лінійної залежності, яку можна представити рівнянням:

$$E = E_0 \cdot (1 + \alpha_{NH} \cdot t), \quad C_{10} = C_{10}^0 \cdot (1 + \alpha_{MR} \cdot t), \quad (2)$$

де E_0 , C_{10}^0 – значення початкового модуля пружності та другого коефіцієнта моделі Муні–Рівліна для матеріалу, що не зазнав старіння; α_{NH} та α_{MR} – коефіцієнти росту (швидкість зміни) внаслідок старіння відповідно початкового модуля пружності та другого коефіцієнта моделі Муні–Рівліна.

На рисунку 4 графічно наведено залежності (2). Точками позначено експериментальні дані, які є приведеними у часі до нормального старіння відповідно до моделі Арреніуса, а пряма є апроксимацією (2) із коефіцієнтами, що отримані методом найменших квадратів.

Аналогічно для характеристик міцності відомо, що старіння призводить до їх зміни (зменшення) у часі за гіперболічною залежністю, яку можна представити рівнянням:

$$\varepsilon_u = \frac{\varepsilon_u^0}{(1 + \beta_\varepsilon \cdot t)}, \quad \sigma_u = \frac{\sigma_u^0}{(1 + \beta_\sigma \cdot t)}, \quad (3)$$

де ε_u^0 , σ_u^0 – значення граничних деформацій та граничних істинних напружень Коші для матеріалу, що не зазнав старіння; β_ε та β_σ – коефіцієнти спаду (швидкість зміни) внаслідок старіння граничних деформацій та граничних істинних напружень Коші відповідно.

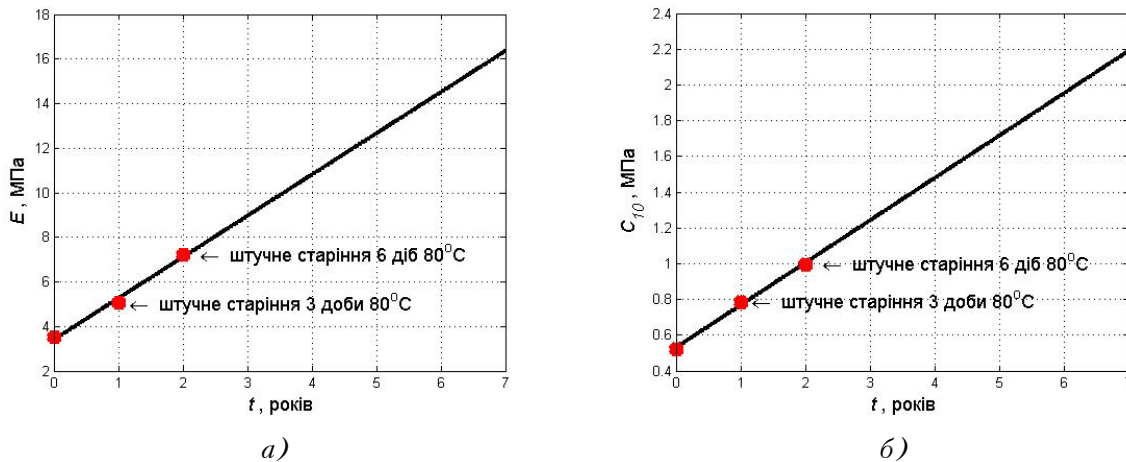


Рис. 4. Криві зміни початкового модуля пружності (а) та другого коефіцієнта Муні–Рівліна при старінні гумових зразків каркасу (брекеру) пневматичних шин

На рисунку 5 графічно наведено залежності (3). Точками позначено експериментальні дані, які є приведеними у часі до нормального старіння відповідно до моделі Арреніуса, а пряма є апроксимацією (3) із коефіцієнтами, що отримані методом найменших квадратів (табл. 3).

Таблиця 3

Параметри апроксимації зміни характеристик пружності та міцності гумової суміші каркасу (брекеру) в пневматичних шинах внаслідок старіння матеріалу

Характеристика		Константи апроксимацій	
пружності	початковий модуль Юнга	E_0 , МПа	α_{NH} , рік ⁻¹
		3,4	0,54
	другий коефіцієнт моделі Муні–Рівліна	C_{10}^0 , МПа	α_{MR} , рік ⁻¹
		0,53	0,447
міцності	граничні деформації на розрив	ε_u^0	β_ε , рік ⁻¹
		6,1	0,3
	граничні істинні напруження Коші	σ_u^0 , МПа	β_σ , рік ⁻¹
		147,4	0,3

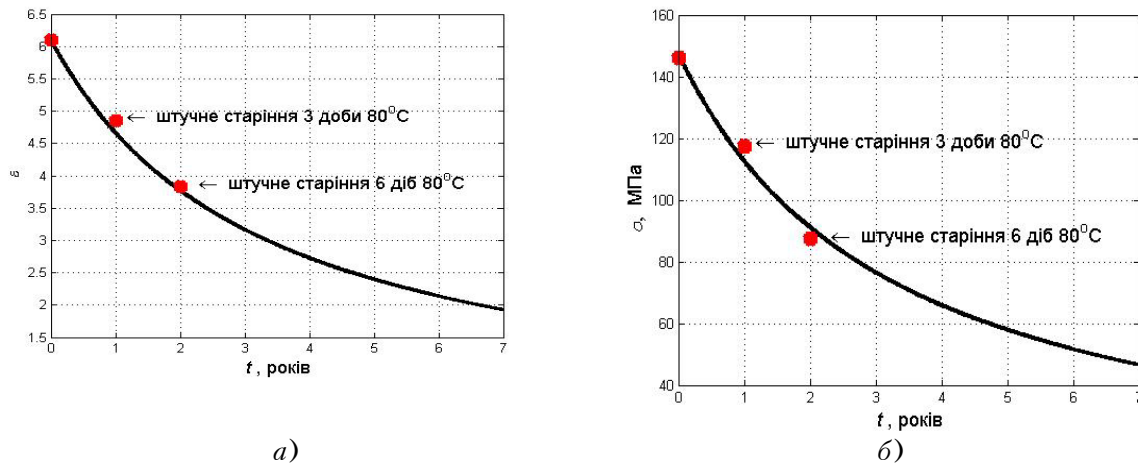


Рис. 5. Криві зміни граничних деформацій (а) та граничних істинних напружень Коші при старінні гумових зразків каркасу (брекеру) пневматичних шин

Висновки. У роботі проведено комплекс експериментальних випробувань гумових зразків матриці каркасу (брекеру) пневматичних шин легкових автомобілів на міцність та пружність до та після їх штучного старіння. Процедура старіння проводилась шляхом витримки зразків у термокамері за фіксованої температури 80 С протягом 6 діб. Встановлено, за моделлю Арреніуса, що така витримка для цього матеріалу відповідає його природному старінню протягом 2-х років,

У межах дослідження побудовано криві деформації зразків гуми каркасу (брекеру) пневматичних шин та зразків гуми наповнювача в пневматичних шинах. Аналіз отриманих результатів вказує на те, що старіння суттєво зменшує максимальні можливі деформації в гумі каркасу (брекеру) пневматичних шин. Разом з тим, гумова суміш наповнювача значно більш виражено зазнає старіння, ніж попередньо досліджений матеріал гумової суміші каркасу (брекеру).

Список використаної 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. Аферин Ю.В. Исследование закономерностей деформирования пневматических шин в контакте с дорогой у учетом наличия эксплуатационной деградации материала / Ю.В. Аферин, А.А. Ларин // Механіка та машинобудування. – Харків : НТУ «ХП», 2011.– № 2. – С. 52–57.
4. Свойства резиновых смесей и резин: оценка регулирование. стабилизация / В.И. Овчаров, М.В. Бурмистр, А.Г. Смирнов и др. – 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, № 1. – Pp. 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, № 1. – Pp. 110–117.
7. 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, № 6. – Pp. 1229–1242.
8. 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, № 2. – Pp. 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, № 2. – Pp. 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, № 2. – Pp. 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. – Pp. 7–12.

ЛАРИН Олексій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри динаміки та міцності машин Національного технічного університету «ХПІ».

Наукові інтереси:

– експериментальні та теоретичні дослідження особливостей деформування гумових матеріалів та гумокордних композитів;

– розробка математичних моделей опису накопичення деградаційних процесів, що відбуваються в полімерних матеріалах та металах, зокрема і методів оцінки їх втомної міцності;

– розробка підходів та методів чисельного моделювання нелінійних та випадкових коливань в машинобудівних конструкціях в тому числі й таких, що мають гіперпружні елементи конструкцій, а також методів прогнозування їх надійності та ресурсу.

Тел.: (050)619–50–68.

E-mail: AlexeyA.Larin@gmail.com

Стаття надійшла до редакції 14.10.2015.