

науки і техніки. Seriya: Fizika radiacionnykh povrezhdenij i radiacionnoe materialovedenie (91). 2007, No 6, pp.120-123. **3.** Belokon' A.V., Eremeyev V.A., Nasedkin A.V., Solov'yev A.N. Partitioned schemes of the finite-element method for dynamic problems of acoustoelectro-elasticity. J. Appl. Math. Mech. 2000, **64** (3), pp. 367–377. **4.** Nasedkin A.V., Eremeyev V.A. Harmonic vibrations of nanosized piezoelectric bodies with surface effects. ZAMM 94, 2014, **10**, pp. 878–892. **5.** Altenbach H., Morachkovsky O., Naumenko K. and Lavinsky D. Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2015, vol. 27, iss. 12, pp. 1-13. DOI: 10.1007/s00161-015-0484-8 **6.** Lavinsky D.V., Morachkovsky O.K. Pruzhno-plastychne deformuvannya system til pry dii electromagnitnykh poliv. Visnyk Zaporiz'kogo na-

cional'nogo universitetu: zb.nauk. st. fizyko-matematychni nauky. Zaporizhzhya: ZNU, 2015, No 2, pp. 125-135. **7.** Simo J., Hughes T. Computational Inelasticity. Springer, New York, Berlin, Heidelberg, 1998. **8.** Cazzani A., Atluri S.N. Four-noded mixed finite elements, using unsymmetric stresses, for linear analysis of membranes. Comput. Mech. 1993, **11** (4), pp. 229–251. **9.** Cazzani A., Garusi E., Tralli A., Atluri S.N. A four-node hybrid assumed-strain finite element for laminated composite plates. CMC Comput. Mater. Contin. 2005. **2** (1), pp. 23–38. **10.** Bondar' S.V., Lavinskii D.V. Study of thermoelastoplastic contact deformation of production tooling mixed structures. Strength of Materials, 2011, vol. 43, No 4, pp. 447-454.

Поступила (received) 02.06.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лавинский Денис Владимирович – канд. техн. наук, доц., кафедра теоретической механики, Национальный технический университет «ХПИ», тел.: (057)-70-763-73, e-mail: denis.lavinsky@ukr.net

Lavinsky Denis Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Theoretical Mechanics, National Technical University "KhPI", tel.: (057)- 70-763-73, e-mail: denis.lavinsky@ukr.net

УДК 539.431:678

О.О. ЛАРИН

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРУ ВТОМІ ГУМО-КОРДНИХ КОМПЗИТИВ ПРИ ДЕФОРМУВАННІ В НАПРЯМУ ОРТОГОНАЛЬНОМУ АРМУВАННЮ ДО ТА ПІСЛЯ ШТУЧНОГО СТАРІННЯ

У роботі визначаються показники опору втомі гумового композиту, що посиленій армуванням текстильним кордом та закономірності їх зміни внаслідок старіння. Дослідження проводяться експериментально з плоскими зразками на розтяг із циклічним завданням деформацій. Окремо досліджувались зразки матеріал 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.

Ключові слова: гумові композити, старіння, експериментальні тести на втому, каркас пневматичної шини.

Вступ

В сучасному машинобудуванні широко застосовуються гумово-кордні елементи конструкції. Це можуть бути спеціальні шланги, демпфуючі прокладки, гумові пружні вставки в приладах амортизації, пневматичні шини автомобілів [1-3] та інше.

Надійність перелічених елементів конструкцій є їх важливою характеристикою, що дає можливість отримати оцінки експлуатаційного ресурсу. Достовірні оцінки по строку служби гумових та гумо-кордних композиційних елементів дозволяють попередити раптові відмови, спланувати ремонтні роботи тощо.

З багатьох досліджень, що наведені в літературі відомо, що найпоширенішими типами відмов у гумо-кордних елементах конструкцій є пошкодження, що з'являються на поверхні [4] або між шарами [5]. Дослідження показують, що в існує відносно слабка міжфазна міцність, і в наслідок дії навантажень з'являються внутрішні початкові тріщини, які поступово переростають в зовнішній гумовий шар, що приводить до остаточного розриву [4, 5]. Узагальнюючи наведені

дані, можна стверджувати, що робота механічних об'єктів гумо-кордними елементами, як правило, відбувається при динамічному (циклічному) навантаженні, що призводить до накопиченню втоми в матеріалах.

Питанням оцінки характеристик опору втомі для різних матеріалів приділяється багато уваги в літературі, зокрема і питанням прогнозування втомної довговічності у гумоподібних матеріалах [6,7] Основною характеристикою опору втомі є експериментальна крива Велера, яка визначає залежність між амплітудами параметру напружено-деформованого стану (НДС) від кількості циклів деформації (напружень), що витримає зразок до появи тріщини заданого розміру (або до руйнування).

Тут слід зазначити, що відомі експериментальні дані по залежностям кількості циклів до відмови від параметрів НДС вказує на те що завжди існує досить суттєвий статистичний розкид у визначенні матеріальних констант [8,9].

Крім цього, однією з важливих особливостей еластовимірних матеріалів, зокрема гумових сумішей,

є прояв ефекту природного старіння [10–14]. 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) [10, 11]. Зазвичай, термін гарантованого зберігання (навіть не експлуатації) складає 5-6 років, після яких компанії виробники не рекомендують використовувати дані конструкції через низьку їх надійність, оскільки властивості гуми за цей час суттєво деградують [10–14]. 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 [12, 13]. 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. 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) [13].

Термічне старіння – це процес зміни фізичних та хімічних характеристик гуми під дією температури [14]. 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 відповідних елементів конструкцій. Таким чином, визначення характеристик опору втомі відповідних композиційних матеріалів є важливою науково-практичною задачею.

Мета роботи

Метою даного дослідження є експериментальне визначення закономірностей зміни показників опору втомі гумового композиту, що посиленний текстильним кордом внаслідок їх штучного старіння.

Експериментальне визначення показників кривих утоми для гумокордного композиту

В даній роботі було проведено серію експериме-

нтальних випробувань на циклічну втому із композитним матеріалом який є шаром каркасу пневматичних шин. Відповідний композит складається з гумової матриці, що посилена текстильним кордом. Експерименти проводились на одновісний розтяг. Для досліджень було використано зразки геометрія яких відповідає вимогам стандартів, щодо механічних випробувань гумоподібних матеріалів та гумо-кордних композитів ISO 527-2 1A.

Зразки мали наступні фактичні геометричні параметри: товщина: $h = 10 \pm 0,1$ мм; ширина: $b = 10$ мм; довжина робочої частини: $L = 80$ мм; загальна довжина: $L_{sp} = 150$ мм. Товщина зразків мала 1% варіацію внаслідок виробничих допусків, що існують при виготовленні гумового листу. На рис. 1 наведено ескізне креслення геометрії зразків та фотографія натурального екземпляру.

Зразки жорстко фіксувались у механічних затискачах, як показано на рис. 2. Задавалось жорстке навантаження, тобто задавались фіксовані значення деформації зразку. Пневматичні затискачі дозволяють утримувати фіксоване значення зусилля, що утримує зразок навіть при зменшенні його товщини внаслідок прояву ефекту Пуассона. При випробуваннях на втому задавалось жорстке циклічне навантаження, тобто задавались фіксовані значення деформації зразку.

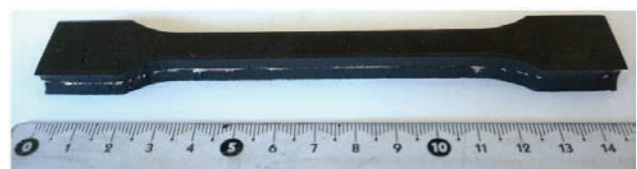
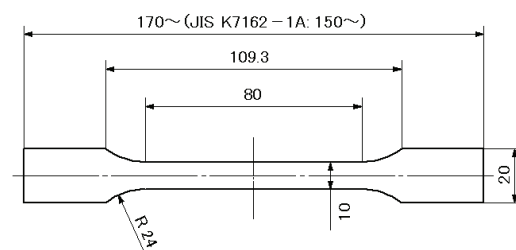


Рисунок 1 – Геометрія зразків для випробувань



Рисунок 2 – Фіксація зразків у вимірювальному комплексі INSTRON E3000 для проведення циклічних тестів

В рамках даної роботи, дослідження обмежувались лише випробуванням зразків при навантаженні в напрямку перпендикулярному до армування.

З метою уникнення прояву ефекту втрати статичної стійкості деформування зразків було без стискання. Таким чином проводилось циклічне деформування при жорсткому навантаженні (задавались деформації) із фіксованими середнім рівнем деформації в циклі (133 %) та з різними амплітудами: 133 %, 100 %, 87% та 66 %. Відповідно розраховані за лінійною інженерною оцінкою (модуль 100 складає 3 МПа) рівні напружень Піала-Кірхгофа мали середнє значення у 4 МПа, а амплітудні значення були на рівні 4 МПа, 3 МПа, 2,6 МПа та 2 МПа відповідно. 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, а також істотне самонагрівання зразків).

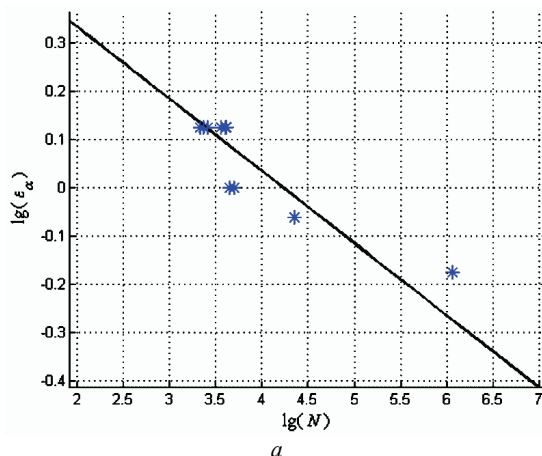
Крім того тести на втомну довговічність проводились для стабілізованого матеріалу, тобто спочатку виконувалось 10 циклів деформації зразка з якого після цього знімалось повністю навантаження. Така попередня процедура дозволяла позбавитись впливу ефекту Маліна на подальші результати.

В результаті тривалої дії циклічного навантаження в зразках формувались мікро-пошкодження в місцях природної концентрації НДС – навколо кордних волокон (рис. 3, а), які з часом розвивались та розповсюджувались на всю ширину зразку, що врешті рещт призвело до його повного руйнування (рис. 3, б).

Експериментальні точки були апроксимовані прямою лінією у подвійних логарифмічних координатах, тобто відповідно до рівняння Велера, окремо для деформацій (1) та істинних напружень Коші (2):

$$\varepsilon_a^{m_\varepsilon} N_\varepsilon = \varepsilon_0^{m_\varepsilon} N_{0\varepsilon}; \quad (1)$$

$$\sigma_a^{m_\sigma} N_\sigma = \sigma_0^{m_\sigma} N_{0\sigma}, \quad (2)$$



де N_ε , N_σ – кількість циклів деформації (напружень Коші) до відмови по втомі при амплітуді деформацій ε_a (або відповідно: при амплітудах напружень Коші σ_a ; m – показник нахилу відповідної кривої Велера, N_0 – базове число циклів до відмови, ε_0 та σ_0 – теоретичні (умовні) границі втоми (для кривих по деформаціям, або напруженням), тобто під σ_0 , наприклад, розумітимуться амплітуди напружень Коші за яких відмова зразку буде спостерігатись через базове число циклів ($N_{0\sigma}$)).

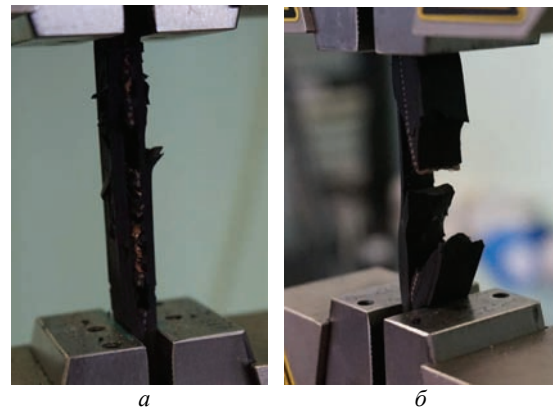


Рисунок 3 – Фотографії розвитку пошкоджень у зразків підчас випробувань на втому

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 гумокордного композиту при його одновісному навантаженні в напрямі перпендикулярному армуванню текстильним кордом.

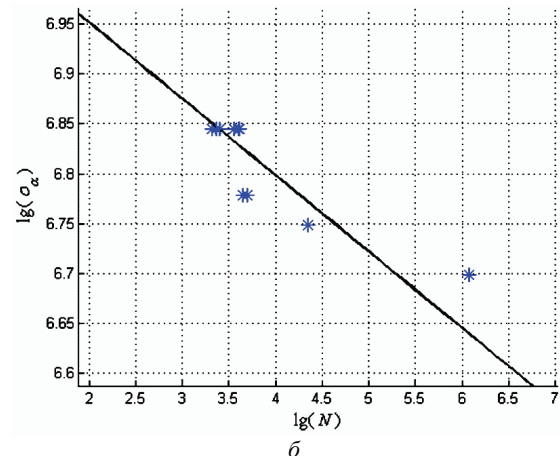


Рисунок 4 – Криві втоми зразків композиту представлені для амплітуд деформацій (а) та істинних напружень (б)

На рис. 3 зірочками помічено експериментальні точки, а прямі лінії – апроксимації, що побудовані методом найменших квадратів. Було отримано наступні параметри апроксимації: $m_\varepsilon = 8$, $N_{0\varepsilon} = 5,3 \cdot 10^6$ для залежності амплітуд деформацій (напружень Піала) від кількості циклів до руйнування, та: $m_\sigma = 18$,

$N_{0\sigma} = 5 \cdot 10^6$ для залежності амплітуд істинних напружень від кількості циклів до руйнування. Значення параметру m округлено до цілого числа. Слід відмітити, що проведені тести засвідчують, що для кожного фіксованого рівня навантаження кількість циклів до відмови, що фіксувалась під час експериментів має

досить істотний розкид в межах 30 % від значення, що отримане апроксимацією.

Для подальшого практичного використання зручно привести отримані результати до умовно симетризованого циклу. З цією метою було використано рівняння Гербера (3), яке вказує на вплив середніх значень в циклах на характеристики втоми:

$$\sigma_{asym} = \sigma_a \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (3)$$

Використання формули (3) для перерахунку кривих втоми не призводить до зміни параметру нахилу цієї кривої (m), а лише змінює значення кількості циклів до руйнування, що витримає матеріал при симетричному циклі. Таким чином перераховані для симетричного циклу деформування значення кількості циклів до руйнування зразку матеріалу складо $N_{0\sigma}^s = 3,1 \cdot 10^7$ для залежності амплітуд деформацій і напружень Піала та: $N_{0\sigma}^s = 9 \cdot 10^9$ для істинних напружень Коші.

Методика проведення процедури штучного старіння гумових матеріалів

Наступним етапом досліджень було проведення аналогічних випробувань для даного композиту після його старіння.

Для штучного старіння зразки гуми витримувались тривалий час на фіксованій підвищеній температурі. Для цієї процедури використовувалась термокамера SNOL 44/200 LNP з примусовою конфекцією, яка оснащена мікропроцесорним контролером OMRON E5CK. Дана сушильна шафа надає можливість формувати та утримувати рівномірний по камері температурний стан.

Відомі в літературі дані, щодо штучного старіння пневматичних шин загалом та штучного старіння їх окремих елементів вказує на те що використання термокамери з фіксованим рівнем температури 70 °C пришвидшує процеси старіння по характеристикам міцності у (30-40) разів [6]. У зазначених довідкових джерелах та рекомендаціях по пришвидшеному штучному старінню гумових матеріалів зазначається, що

процедури штучного старіння слід проводити не перевищуючи температури 100 °C.

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

$$k = \exp \left[\frac{E_0}{R} \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) \right], \quad (4)$$

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 змінились так само як для зразку матеріалу який перебуває у температурі T_2 ; E_0 – енергія активації хімічних реакцій в матеріалі, R – універсальна газова стала ($R = 8,31446$ Дж/(моль·К)).

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 °C у порівнянні до матеріалу, який є у звичайних умовах [10, 11]. Використання формули (5) для окреслених вище параметрів дозволяє визначити енергію активації для процесу деградації властивостей цих гумових зразків $E_0 = 105$ 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 10 діб у термокамері на температурі 80 °C, що відповідає перебуванню цього матеріалу в нормальних умовах зберігання протягом 3 років.

На рис. 5 наведено криві втоми зразків гумового композиту, що посилені текстильним кордом із навантаженням в напрямку перпендикулярному армуванню після їх штучного старіння.

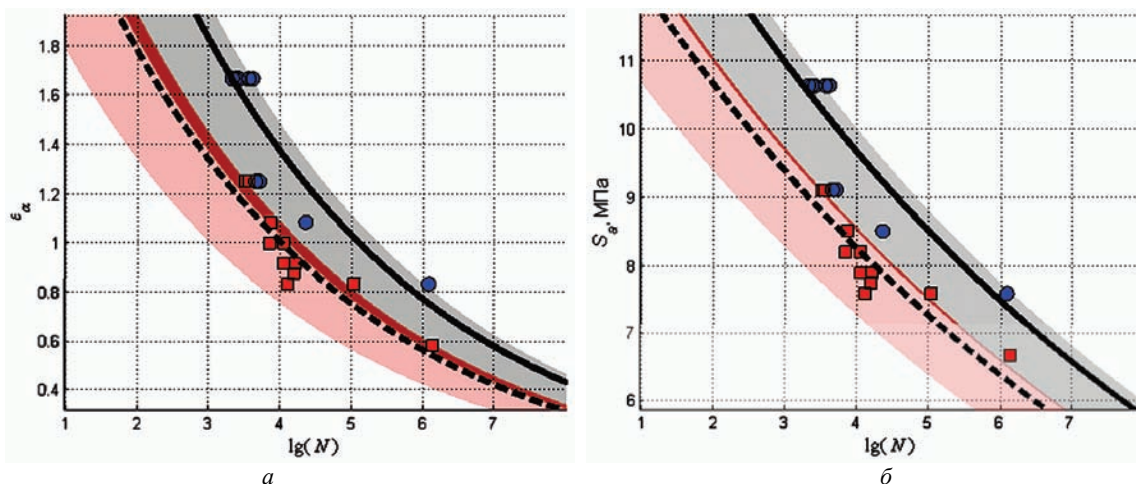


Рисунок 5 – Криві втоми зразків композиту після його штучного старіння (витримка 10 діб на температурі 80oC), які представлені для амплітуд деформацій (а) та істинних напружень Коші (б)

На рисунках суцільні криві та сині точки відповідають даним отриманим для зразків до старіння, а пунктирні криві та червоні точки відповідно – кривим утоми після штучного старіння зразків. Зафарбованими зонами показано розкид експериментальних значень з коефіцієнтом варіації 0.3.

Порівняння кривих утоми побудованих окремо для амплітуд деформацій та істинних напружень Коші для зразків композиту, що досліджується показує, що показник нахилу кривої втоми не знає 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. Так, базове число циклів до відмови на фіксованому рівні амплітуд деформацій у 50 % зменшилось у 12 раз, а аналогічне зменшення по кривим, що побудовані для істинних напружень спостерігається у 16 раз. В таблиці 1 наведено дані по характеристикам кривих утоми до та після старіння.

Таблиця 1 – Параметри кривих утоми зразків гумо-кордного композиту до та після штучного старіння

Матеріал	Параметри кривої втоми			
	Для деформацій		Для істинних напружень	
	m_ϵ	$N_{0\epsilon}^s$	m_σ	$N_{0\sigma}^s$
У первісному стані	8	$3.1 \cdot 10^7$	18	$9 \cdot 10^9$
Після штучного старіння	8	$2.5 \cdot 10^6$	18	$5.4 \cdot 10^8$

Висновки

В роботі проведено комплекс експериментальних випробувань гумокордних зразків композиту на втомну міцність до та після їх штучного старіння. Процедура старіння проводилась шляхом витримки зразків у термокамері на фіксованій температурі 80 оС протягом 10 діб. Встановлено за моделлю Арреніуса, що така витримка для даного матеріалу відповідає його природному старінню протягом 3-х років.

В рамках дослідження побудовані криві втоми (криві Велера) по деформаціям та істинним напруженням Коші. Порівняльний аналіз отриманих результатів показує, що показник нахилу кривих утоми не змінюється через старіння в той час як базове число циклів до відмови суттєво зменшилось (більш ніж на порядок). Так, за 3 умовних роки базове число циклів до відмови гумових зразків зменшилось у 12 та 16 раз відповідно для кривих утоми побудованих відносно деформацій та істинних напружень Коші.

Список літератури: 1. Noda N.-A. Effect of dimensions of crimped portion upon sealing performance of hydraulic brake hose by applying three-dimensional fem analysis / N.-A. Noda, B. Kim, K. Ota [et al.] // Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering. – 2013. – Vol. 7, No. 2. – P. 281-292. 2. Luo Y. Numerical investigation of nonlinear properties of a rubber absorber in rail fastening systems / Y. Luo, Y. Liu, H. P. Yin // International Journal of Mechanical Sciences. – 2013. – Vol. 69. – P. 107-113. 3. Polukoshko S. Vibration damping using laminated elastomeric structures / S. Polukoshko, V. Gonca, J. Svabs // Solid State Phenomena. – 2015. – Vol. 220-221. – P. 81-90. 4. Seung-Bum Kwak Micro-damage formation of a rubber hose

assembly for automotive hydraulic brakes under a durability test / Seung-Bum Kwak, Nak-Sam Choi // Engineering Failure Analysis. 2009. – Vol. 16. – P. 1262-1269. 5. Cho J.R. Fatigue life assessment of fabric braided composite rubber hose in complicated large deformation cyclic motion / J.R. Cho, Y.H. Yoon, C.W. Seo, Y.G. Kim // Finite Elements in Analysis and Design, 2015. – Vol. 100. – P. 65-76. 6. Mars W. A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber / W. Mars, A. Fatemi // International Journal of Fatigue. – 2002. – Vol. 24, No. 9. – P. 949-961. 7. Schubel P. M. Fatigue characterization of tire rubber / P. M. Schubel, E. E. Gdoutos, I. M. Daniel // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2004. – Vol. 42, No. 2. – P. 149-154. 8. Sun Q. A statistically consistent fatigue damage model based on miner's rule / Q. Sun, H.-N. Dui, X.-L. Fan // International Journal of Fatigue. – 2014. – Vol. 69. – P. 16-21. 9. Zhao Y. X. Weibull modeling of the probabilistic s-n curves for rolling contact fatigue / Y. X. Zhao, H. B. Liu // International Journal of Fatigue. – 2014. – Vol. 66. – P. 47-54. 10. 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. 11. 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. 12. 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. 13. La Count 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. La Count, J. M. Castro, F. Ignatz-Hoover // Polymer Degradation and Stability. – 2002. – Vol. 75, No. 2. – P. 213-227. 14. 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. Noda N.-A. Kim B., Ota B. et al. Effect of dimensions of crimped portion upon sealing performance of hydraulic brake hose by applying three-dimensional fem analysis. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering. 2013. vol. 7, no. 2, pp. 281-292. 2. Luo Y., Liu Y., Yin H. P. Numerical investigation of nonlinear properties of a rubber absorber in rail fastening systems. International Journal of Mechanical Sciences. 2013. vol. 69, pp. 107-113. 3. Polukoshko S., Gonca V., Svabs J. Vibration damping using laminated elastomeric structures. Solid State Phenomena. 2015. vol. 220-221. pp. 81-90. 4. Seung-Bum Kwak, Nak-Sam Choi Micro-damage formation of a rubber hose assembly for automotive hydraulic brakes under a durability test. Engineering Failure Analysis. 2009. vol. 16, pp. 1262-1269. 5. Cho J.R., Yoon Y.H., Seo C.W., Kim Y.G. Fatigue life assessment of fabric braided composite rubber hose in complicated large deformation cyclic motion. Finite Elements in Analysis and Design. 2015. vol. 100, pp. 65-76. 6. Mars W., Fatemi A. A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber. International Journal of Fatigue. 2002. vol. 24, no. 9, pp. 949-961. 7. Schubel P. M., Gdoutos E. E., Daniel I. M. Fatigue characterization of tire rubber. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2004. vol. 42, no. 2, pp. 149-154. 8. Sun Q., Dui H.-N., Fan X.-L. A statistically consistent fatigue damage model based on miner's rule. International Journal of Fatigue. 2014. vol. 69, pp. 16-21. 9. Zhao Y. X., Liu H. B. Weibull modeling of the probabilistic s-n curves for rolling contact fatigue. International Journal of Fatigue. 2014. vol. 66, pp. 47-54. 10. Baldwin J. M., Bauer D. R., Ellwood K. R. Rubber aging in tires. part 1: field results. Polymer Degradation and Stability. 2007. vol. 92, no. 1, pp. 103-109. 11. Bauer D. R.,

Baldwin J. M., Ellwood K. R. Rubber aging in tires. part 2: accelerated oven aging tests. *Polymer Degradation and Stability*. 2007. vol. 92, no. 1, pp. 110-117. **12.** 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. vol. 19, no. 6, pp. 1229-1242. **13.** La Count 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. vol. 75, no. 2, pp. 213-227. **14.** 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. vol. 2, pp. 7-12.

Поступила (received) 26.07.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ларін Олексій Олександрович – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Динамика и прочность машин», Национальный технический университет «ХПИ», тел.: (057) 707-68-79; e-mail: AlexeyA.Larin@gmail.com.

Larin Oleksij Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Dynamics and Strength of Machines, National Technical University «KhPI», tel.: (057) 707-68-79; e-mail: AlexeyA.Larin@gmail.com.

УДК 539.3¹

Э.А. СИМСОН, Д.С. ЯГУДИН

ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ДИСКА БОРОНЫ НА ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ПРУЖИННОЙ СТОЙКЕ

Проведено компьютерное моделирование процесса эксплуатации дисковой бороны на индивидуальной пружинной стойке. Сформулирована задача по исследованию поведения стойки при силовом и кинематическом нагружении стойки от действия эксплуатационных нагрузок, а также проведен частотный анализ конструкции. Анализ полей деформаций и напряжений показал, что статическое и кинематическое нагружение само по себе не приводит к разрушению стойки. По результатам исследования поверхности излома разрушение носит комплексный характер: накопление усталостных повреждений с последующим разрушением от статической кинематической нагрузки.

Ключевые слова: дисковая бороны, пружинная стойка, собственная частота, разрушение, метод конечных элементов.

Введение. Для проведения в полном объеме численных исследований напряженно-деформированного состояния дисковой бороны на пружинной стойке при всех заданных параметрах необходима научно обоснованная модель рабочей среды, то есть почвы, как сплошных сред, которая имела бы в качестве параметров твердость и влажность, заданные в расчетном задании. В данной работе определялись абсолютные значения сил в расчете на 1 м захвата, а также зависимости этих сил от угла атаки, глубины обработки и скорости поступательного движения. С целью усовершенствования конструкции пружинной стойки проведен статический анализ НДС при действии на нее силового и кинематического нагружения, а также определена собственная частота системы и частота вынуждающей нагрузки.

Анализ последних исследований и литературы. Современные технологии возделывания и уборки сельскохозяйственных культур выдвигают высокие требования к ресурсосбережению и энергоэффективности процесса [1,2]. На этом фоне дисковые орудия получили широкое распространение в сельскохозяйственном секторе.

На рынке сельскохозяйственной техники существует большое множество различных вариантов конструкции рабочих органов. В частности дискаторы, в основном своем большинстве, спроектированы либо с

единым валом, на который посажены дисковые рабочие органы, либо с набором пружинных стоек, на каждую из которых крепится один диск [3].

В литературе известны работы посвященные экспериментальному определению силы, действующей на диски во время работы. Например, в СКБ завода «Сибсельмаш» была разработана и изготовлена специальная динамометрическая тележка для пространственного динамометрирования дисковых батарей, с которой были проведены соответствующие эксперименты [4]. В данной работе приводятся данные полевых испытаний на динамометрической тележке, проведенные для трех различных видов обработки почвы – предпосевной обработки, обработки паров и лущения стерни. Во время опытов ежедневно по 3-4 раза определялась твердость и брались пробы влажности почвы. Затем на каждом участке подсчитывалось среднее значение твердости и влажности. Количество стеблей на 1 м² составляло 400-500 шт. высотой 150-200 мм, количество сорняков 9-15.

Целью данной статьи является численное моделирование деформирования пружинной стойки при штатных силовых нагрузках, кинематических нагрузках, а также исследования спектра собственных и вынужденных частот колебаний конструкции в процессе эксплуатации.