

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.2(87).14719

В. А. ВОЙТОВ, А. В. ВОЙТОВ

Харківський національний технічний університет сільськогосподарства імені Петра Василенка, Україна

МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТРУКТУРИ СПОЛУЧЕНИХ МАТЕРІАЛІВ У ТРИБОСИСТЕМІ

У роботі представлений методичний підхід до визначення реологічних властивостей (внутрішнього тертя) структури матеріалів для трибосистем. З метою підвищення чутливості методу обґрунтовано застосування поперечних хвиль з дворазовим відображенням. Це дало змогу збільшити діапазон вимірювання логарифмічного декременту загасання ультразвукових коливань в структурі матеріалу. Виконано оцінку чутливості методу, показано, що застосування поперечних хвиль на частоті 5 МГц дозволяє підвищити чутливість на 19,4 %..42 %. Отримані експериментальним шляхом значення величин коефіцієнта варіації дозволяють стверджувати, що запропонований метод забезпечує відтворюваність результатів з похибкою, що не перевищує 4,7%.

Ключові слова: реологічні властивості структури матеріалів; внутрішнє тертя; логарифмічний декремент загасання; трибосистема; зносостійкість; чутливість; відтворюваність

Вступ. Поняття зносостійкості трибосистем тісно пов'язане з реологічними (релаксаційними) властивостями матеріалів [1]. Механічна енергія, що виділяється при зовнішньому терті, передається в матеріал трибоелементів за допомогою хвиль напружень, трансформуючись у внутрішнє тертя, яке обумовлено не пружними явищами і характеризує здатність твердого тіла незворотно розсіювати енергію механічних коливань, перетворюючи її в теплоту. Механізми дисипації енергії (реологічні властивості структури сполучених матеріалів), є динамічними механізмами релаксації напружень, що виникають в поверхневих шарах трибоелементів. Релаксація напружень в зонах контакту призводить до більш рівномірного перерозподілу напружень за обсягом і запобігає незворотне накопичення дефектів, що викликає концентрацію напружень. Тому чим більша частка механічної енергії, що підводиться при терті до трибосистеми, розсіюється у вигляді тепла, тим вище повинна бути зносостійкість сполучення.

Для моделювання та прогнозування зносостійкості трибосистем, а також для розрахунку швидкості зношування і втрат на тертя, необхідно мати параметр, який є характеристикою матеріалів, з яких виготовлені трибоелементи. Даний параметр повинен бути структурно-чутливою характеристикою матеріалів і реагувати на зміни в поверхневих шарах трибоелементів в процесі припрацювання, а також на величину і градієнти температур і напружень в процесі припрацювання.

Аналіз останніх публікацій з даної проблеми. У роботах, виконаних під керівництвом В.В. Шевели [1-4], показано, що релаксаційні процеси проявляють більш високу структурну чутливість до зміни напружено-деформованого стану матеріалу при динамічному навантаженні в порівнянні з фізико-механічними властивостями. На підставі виконаного аналізу робіт можна зробити висновок, що реологічні властивості структури матеріалів, з яких виготовлена трибосистема, є функцією зносостійкості і припрацювання.

Існує ряд методів для вимірювання структурно-чутливої характеристики металів і сплавів – внутрішнього тертя, які викладені в роботі [5, 12]. Серед широко застосовуваних можна виділити наступні: метод крутильного маятника [6]; резонансний метод збудження і детектування коливань зразка [7]; ультразвуковий метод [8, 9]. На підставі аналізу представлених робіт можна зробити висновок, що ультразвуковий метод (логарифмічний декремент загасання ультразвукових коливань в структурі матеріалу, який характеризує величину внутрішнього тертя) є чутливим методом до процесів, які відбуваються в поверхневих шарах під час припрацювання трибосистем. Перевагою даного методу є можливість його застосування на працюючій трибосистемі з реєстрацією величини внутрішнього тертя під час припрацювання.

Мета дослідження. Розробити методичний підхід до визначення реологічних властивостей структури матеріалів трибоелементів і провести експериментальні дослідження з визначення логарифмічного декременту загасання ультразвукових коливань, а також оцінити чутливість методу і точність вимірювань.

Методичний підхід до проведення досліджень. При застосуванні ультразвукового методу вимірювання внутрішнього тертя структури матеріалів можливо застосування двох хвиль: поздовжньої і поперечної.

При використанні поздовжньої хвилі довжина хвилі визначається за виразом:

$$\lambda_{\text{новз}} = \frac{c_{\text{новз}}}{f_{\delta}} = \frac{\sqrt{E/\rho}}{f_{\delta}}, \text{ м.} \quad (1)$$

При використанні поперечної (зсувної) хвилі довжина хвилі визначається за виразом:

$$\lambda_{\text{non}} = \frac{c_{\text{non}}}{f_{\delta}} = \frac{\sqrt{G/\rho}}{f_{\delta}}, \text{ м,} \quad (2)$$

де $c_{\text{новз}}$ і c_{non} – швидкість поширення поздовжньої і поперечної хвилі в матеріалі, м/с; f_{δ} – робоча частота ультразвукового дефектоскопа, 1/с; E і G – модуль пружності і модуль зсуву матеріалу, Па; ρ – щільність матеріалу, кг/м³.

З огляду на те, що модуль зсуву G менше модуля пружності E і становить, приблизно, для металів $0,38E$, застосування поперечних хвиль призведе до зменшення довжини хвилі, яка буде поширюватися по матеріалу. Чим менше довжина хвилі, тим чутливіше метод.

Зменшення довжини хвилі можна досягти збільшенням робочої частоти ультразвукового дефектоскопа f_{δ} , це слідує з формул (1) та (2). Однак, чим вище робоча частота, тим важче хвилю ввести в матеріал, значна частина енергії хвилі буде відбиватися від поверхні введення і розсіюватися в навколишнє середовище. Тому шлях збільшення частоти коливань ультразвукової хвилі не є раціональним, бо це призведе до більших похибок вимірювання, що буде показано нижче.

З метою підвищення чутливості і достовірності методу визначення величини внутрішнього тертя структури матеріалів в трибосистемі (згідно роботи [10] – робастність методу) будемо застосовувати поперечні (зсувні) хвилі, які вводяться в досліджуваний матеріал похилим п'єзоелектричним перетворювачем (ПЕП) згідно схеми, яка представлена на рис.1.

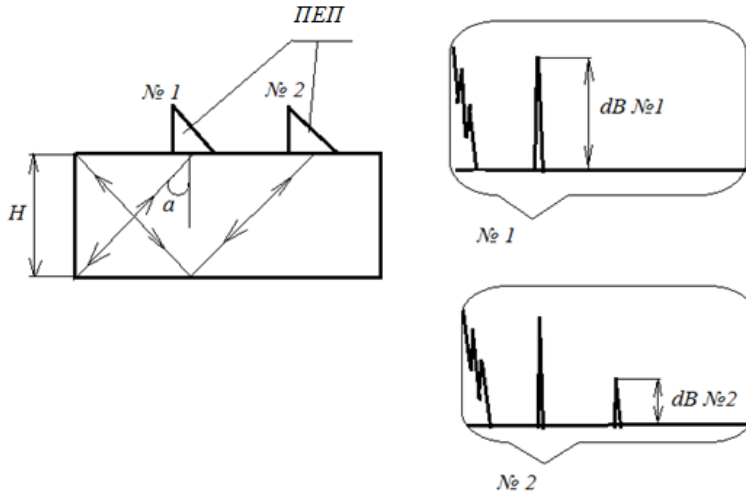


Рис. 1. Схема застосування поперечних хвиль при визначенні внутрішнього тертя структури матеріалу: ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач; №1 – одноразове відображення хвилі; №2 – дворазове відображення хвилі; a – кут введення ультразвукової хвилі в матеріал; H – товщина матеріалу

Відповідно до схеми, яка представлена на рис. 1, величину початкового імпульсу дефектоскопа A_0 визначити неможливо. Однак, встановивши ПЕП в точку №1 так, щоб імпульс відбився від межі зразка, отримаємо імпульс №1 на екрані дефектоскопа (одноразове відображення хвилі) – A_1 . При цьому поперечна хвиля пройшла дві відстані, що дорівнює:

$$l_1 = \frac{2H}{\cos a}, \text{ м}, \quad (3)$$

де a – кут введення ультразвукових коливань в матеріал, градус.

Змістивши ПЕП в точку №2, отримаємо другий імпульс на екрані дефектоскопа (дворазове відображення хвилі) – A_2 , який дорівнює:

$$l_2 = \frac{4H}{\cos a}, \text{ м}. \quad (4)$$

Відповідно до прийнятої точки відліку, якою є перший відбитий імпульс, рис.1, запишемо вираз для визначення коефіцієнта загасання ультразвукових коливань між імпульсом №1 і імпульсом №2:

$$\frac{A_0/A_1}{A_0/A_2} = \frac{A_0 \cdot \exp(-\delta 2H / \cos a)}{A_0 \cdot \exp(-\delta 4H / \cos a)} = \frac{\exp(-\delta 2H / \cos a)}{\exp(-\delta 2H / \cos a) \cdot \exp(-\delta 2H / \cos a)} = \exp(\delta 2H / \cos a). \quad (5)$$

Прологарифмувавши вираз (5), отримаємо:

$$\ln(A_0/A_1) - \ln(A_0/A_2) = \delta \cdot 2H / \cos a \cdot \ln e. \quad (6)$$

В теорії загасаючих коливань замість натурального логарифма відношення амплітуд сигналів, формула (6), використовують вираз:

$$20 \lg(A_0/A_1), \text{ dB}. \quad (7)$$

З урахуванням виразу (7) вираз (6) можна записати у вигляді:

$$\delta = \frac{20 \lg(A_0/A_1) - 20 \lg(A_0/A_2)}{2H} \cdot \cos a, \text{ dB/м}. \quad (8)$$

Вираз (8) характеризує логарифмічний декремент загасання ультразвукових коливань в структурі матеріалу і є структурно-чутливою характеристикою даного матеріалу.

Вимірюючи за допомогою ультразвукового дефектоскопа УД2-12 величину першого і другого імпульсів в dB за формулою (8) можна розрахувати величину δ , dB/m , яка характеризує реологічні властивості структури матеріалу.

Результати досліджень. Вимірювання логарифмічного декременту загасання різних конструкційних матеріалів, які широко застосовуються у насособудуванні, виконувалися на плоских зразках товщиною 10 мм на робочих частотах 1,25; 2,5 та 5 МГц. Для вимірювань застосовували похилий ПЕП з кутом введення ультразвукової хвилі в матеріал $\alpha=50^\circ$.

Середньоарифметичні значення логарифмічного декременту загасання δ_{cp} для різних матеріалів, а також значення середньоквадратичного відхилення S_δ , представлені в таблиці 1.

Як слідує з отриманих результатів, збільшення робочої частоти дефектоскопа f_δ від 1,25 до 5 МГц збільшує значення логарифмічного декременту загасання ультразвукових коливань в структурі матеріалів. Це призводить до збільшення чутливості методу. Згідно з роботою [11] чутливість методу будемо визначати за виразом:

$$\eta = \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{f_{\delta,i} / f_{\delta,i-1}} = \frac{\Delta\delta}{5/2,5}, dB/m. \quad (9)$$

Згідно формули (9) чутливість методу – це відношення діапазону зміни вимірюваної величини декременту $\Delta\delta$, викликане зміною відношення робочих частот дефектоскопа, наприклад, робочої частоти 5 МГц до попередньої робочої частоти 2,5 МГц. Величини зміни $\Delta\delta$ на різних робочих частотах, а також значення чутливості методу на різних частотах представлено в таблиці 2.

Таблиця 1

Результати вимірювань логарифмічного декременту загасання на робочих частотах 1,25; 2,5 та 5 МГц для різних матеріалів

Матеріал	$f_\delta=1,25$ МГц		$f_\delta=2,5$ МГц		$f_\delta=5$ МГц	
	Середнє значення δ_{cp} , dB/m	Середньоквадратичне відхилення S_δ , dB/m	Середнє значення δ_{cp} , dB/m	Середньоквадратичне відхилення S_δ , dB/m	Середнє значення δ_{cp} , dB/m	Середньоквадратичне відхилення S_δ , dB/m
Сталь 45	314,5	10,7	354,5	13,7	374,5	16,9
Сталь 20Х	321,8	11,5	394,8	14,5	394,8	18,6
Сталь 40Х	323,6	10,6	423,6	17,6	443,6	21,7
Сталь ШХ-15	334,8	11,6	404,8	16,6	424,8	21,8
38Х2МЮА	346,5	11,3	426,5	17,3	466,5	22,4
СЧ 15	500,9	16,9	550,9	20,9	619,9	29,0
СЧ спец.	540,6	18,3	670,6	24,3	729,6	34,4
ВЧ-70	520,8	16,3	620,8	20,3	680,8	30,4
БрОЦС-6-6-4	570,0	18,8	621,0	26,8	679,0	32,9
Бр.АЖ 9-4	586,0	19,6	681,0	30,6	784,0	35,7
ЛС 62-1,5	613,5	22,8	711,5	30,8	813,5	37,9
ЛМцСКА 58-2-2-1-1	642,5	23,5	744,5	31,5	840,5	38,7

Середні значення величин середньоквадратичного відхилення логарифмічного декременту загасання $S_{\delta, \text{cp}}$, яке характеризує відтворюваність (змінність) результатів вимірювання таблиця 2, дозволяють стверджувати, що зі збільшенням робочої частоти відтворюваність погіршується.

Таблиця 2

Результати зміни чутливості і достовірності (відтворюваності) методу на робочих частотах: 1,25; 2,5 і 5 МГц для різних матеріалів

Параметри	$f_{\delta}=1,25$ МГц	$f_{\delta}=2,5$ МГц	$f_{\delta}=5$ МГц
$\Delta\delta = \delta_{\text{max}} - \delta_{\text{min}}, \text{dB/м}$	328	390	466
$\eta, \text{dB/м}$	164	195	233
$S_{\delta, \text{cp}}, \text{dB/м}$	15,9	22,0	28,3
$\nu, \%$	3,4	4,0	4,7

Такий експериментальний факт пояснюється наступним: чим вище частота коливань, тим важче ввести ультразвукову хвилю в матеріал і тим швидше загасають коливання хвилі під час руху по матеріалу. Наприклад, при роботі на частоті 10 МГц виміру другого відбитого сигналу зареєструвати не вдалося або реєстрація відбувалася з великими значеннями S_{δ} . Це дозволило прийняти рішення про вилучення робочої частоти 10 МГц з експериментальних досліджень.

Розрахунок значень коефіцієнта варіації $\nu, \%$, таблиця 2, дозволяє стверджувати, що при збільшенні робочої частоти коефіцієнт варіації ν змінюється від величини 3,4% до 4,7%.

Обговорення результатів досліджень. Визначимо зміну чутливості методу на різних частотах ультразвукових коливань при використанні поперечних хвиль з дворазовим відображенням (рис. 1, ПЕП №2) за виразом:

$$\Delta\eta = \frac{\eta_{\text{max}} - \eta_{\text{min}}}{\eta_{\text{min}}} \cdot 100, \% \quad (10)$$

Максимальні значення чутливості на $f_{\delta} = 5$ МГц і мінімальні значення на $f_{\delta} = 1,25$ МГц візьмемо з таблиці 2.

Результати розрахунку показують, що застосування поперечних хвиль з двократним відображенням на $f_{\delta} = 5$ МГц по відношенню до $f_{\delta} = 1,25$ МГц збільшує чутливість на 42%, а по відношенню до $f_{\delta} = 2,5$ МГц – на 19,4%.

Аналогічна оцінка чутливості методу була виконана для даних, наведених в роботі [9], де застосовувалися поздовжні хвилі з кутом введення $\alpha=0^{\circ}$. Згідно з роботою [9] визначення логарифмічного декременту загасання виконували на частотах: 2,5; 5 та 10 МГц. Розрахунок чутливості за формулою (10) показав, що при використанні поздовжніх хвиль і зміні частоти від 2,5 до 10 МГц чутливість збільшується на 0,05%.

Висновок. Обґрунтовано методичний підхід до визначення реологічних властивостей (внутрішнього тертя) структури матеріалів для трибосистем. З метою підвищення чутливості методу обґрунтовано застосування поперечних хвиль з двократним відображенням. Це дало змогу збільшити діапазон виміру логарифмічного декременту загасання ультразвукових коливань в структурі матеріалу на 19,4% - 42%.

Отримані експериментальним шляхом значення величин коефіцієнта варіації дозволяють стверджувати, що запропонований метод забезпечує відтворюваність результатів з похибкою, що не перевищує 4,7%.

Отримані значення логарифмічного декремента загасання ультразвукових хвиль в структурі матеріалів трибоелементів (реологічні властивості) в подальшому будуть використані в математичних моделях розрахунку швидкості зношування і коефіцієнта тертя, що буде представлено в наступній роботі авторів.

Список літератури

1. Шевеля В.В., Олександренко В.П., Калда Г.С. О роли релаксационных явлений и субструктурных превращений при трении металлов / Проблемы трибологии. – 2003. – № 2. – С. 3-11.
2. Шевеля В.В. Реология износостойкости и совместимости пар трения / Трение и износ. – 1993. – Т. 14, № 1. – С. 48-63.
3. Шевеля В.В., Трытек А. Реология вязкоупругого фрикционного контакта / Проблемы трибологии. – 2010. – № 4. – С. 6-16.
4. Шевеля В.В., Олександренко В.П. Трибохимия и реология износостойкости. – Хмельницкий: ХНУ, 2006. – 278 с.
5. Клюев В.В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. В 2-х книгах. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
6. Дыха А.В., Аулин В.В., Маковкин О.Н., Посонский С.Ф. Определение характеристик вязкого трения в опорах скольжения методом маятника / Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2017. №3/7 (87). С.
7. Мухамедиев Э.Д., Шамирзаев С.Х., Зиевадинов Ж.К. Установка для измерения внутреннего трения в алюминиевых сплавах / Электронная обработка материалов. 2013. №49(2). С.102-105.
8. Шевеля В.В., Войтов В.А., Суханов М.И., Исаков Д.И. Закономерности изменения внутреннего трения в процессе работы трибосистемы и его учет при выборе совместимых материалов / Трение и износ. – 1995. – Т. 16, №4. – С. 734-744.
9. Захарченко М.Б. Методика оценки реологических свойств структуры сопряженных материалов в трибосистеме / Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2015. – Вип. 158: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві. – С. 64-69.
10. Хьюбер Дж. П. Робастность в статике. Пер. с англ. – М.: Мир. 1984. – 304 с.
11. Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. – М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.
12. Vojtov, V., Biekairov, A., & Voitov, A. (2018). The Quality of the Tribosystem as a Factor of Wear Resistance. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 25-29. doi:<http://dx.doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19547>

Стаття надійшла до редакції 28.04.2020.

Войтов Віктор Анатолійович – д.т.н., професор, завідувач кафедри транспортних технологій і логістики Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка, vavoitovva@gmail.com.

Войтов Антон Вікторович – к.т.н., старший викладач кафедри деревооброблювальних технологій та системотехніки лісового комплексу Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка, K1kavoitov@gmail.com.

V. A. VOJTOV, A. V. VOITOV

METHODOLOGICAL APPROACH TO DETERMINING THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF THE STRUCTURE OF CONJUGATED MATERIALS IN A TRIBOSYSTEM

The paper presents a methodological approach to determining the rheological properties (internal friction) of the structure of materials for tribosystems. It is shown that for modeling and predicting the wear resistance of tribosystems, as well as for calculating the wear rate and friction losses, it is necessary to have a parameter that is a characteristic of the materials from which the triboelements are made. This parameter should be a structurally sensitive characteristic of materials and respond to changes in the surface layers of triboelements during running-in, as well as to the magnitude and gradients of temperatures and stresses during running-in. In order to increase the sensitivity of the ultrasonic method for determining the internal friction of materials, the use of transverse waves with double reflection is justified, which is a difference from previously known methods. This made it possible to increase the measurement range of the logarithmic attenuation decrement of ultrasonic vibrations in the material structure. An expression is obtained for calculating the logarithmic attenuation decrement in the test materials according to the results of measurements on an ultrasonic flaw detector. The values of the values of internal friction of various materials that are widely used in hydraulic machines are presented. The experimentally substantiated choice of the working frequency of the flaw detector for measuring the logarithmic attenuation of the decay. The sensitivity of the method was estimated, and it was shown that the use of transverse waves at a frequency of 5 MHz can increase the sensitivity by 19,4%...42%. The values of the coefficient of variation obtained experimentally suggest that the proposed method provides reproducible results with an error not exceeding 4,7%.

Keywords: rheological properties of the structure of materials; internal friction; logarithmic decrement of attenuation; tribosystem; wear resistance; sensitivity; reproducibility

References

1. Shevelya V.V., Oleksandrenko V.P., Kalda G.S. O roli relaksatsionnykh yavleniy i substrukturnykh prevrashcheniy pri trenii metallov / Problemi tribologii. – 2003. – № 2. – S. 3-11.
2. Shevelya V.V. Reologiya iznosostoykosti i sovmestimosti par treniya / Treniye i iznos. – 1993. – T. 14, № 1. – S. 48-63.
3. Shevelya V.V., Trytek A. Reologiya vyzkouprugogo friktsionnogo kontakta / Problemi tribologii. – 2010. – № 4. – S. 6-16.
4. Shevelya V.V., Oleksandrenko V.P. Tribokhimiya i reologiya iznosostoykosti. – Khmel'nitskiy: KHNU, 2006. – 278 s.
5. Klyuyev V.V. Pribory dlya nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdeliy. V 2-kh knigakh. –M.: Mashinostroyeniye, 1986. – 352 s.
6. Dykha A.V., Aulin V.V., Makovkin O.N., Posonskiy S.F. Opredeleniye kharakteristik vyzkogo treniya v oporakh skol'zheniya metodom mayatnika / Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. 2017. №3/7 (87). S.
7. Mukhamediyev E.D., Shamirzayev S.KH., Ziyevaddinov ZHK. Ustanovka dlya izmereniya vnutrennego treniya v alyuminiyevykh splavakh / Elektronnyaya obrabotka materialov. 2013. №49(2). S.102-105.
8. Shevelya V.V., Voytov V.A., Sukhanov M.I., Isakov D.I. Zakonomernosti izmeneniya vnutrennego treniya v protsesse raboty tribosistemy i yego uchet pri vybore sovmestimyykh materialov / Treniye i iznos. – 1995. – T. 16, №4. – S. 734-744.
9. Zakharchenko M.B. Metodika otsenki reologicheskikh svoystv struktury sopryazhennykh materialov v tribosisteme / Visnik Kharkivs'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu sil'skogo gospodarstva im. P. Vasilenka. – Kharkiv: KHNTUSG, 2015. – Vip. 158: Resursozberigayuchi tekhnologii, materiali ta obladnannya u remontnomu virobnitstvi. – S. 64-69.
10. KH'yuber Dzh. P. Robastnost' v statike. Per. s angl. – M.: Mir. 1984. – 304 s.
11. Zazhigayev L.S., Kish'yan A.A., Romanikov YU.I. Metody planirovaniya i obrabotki rezul'tatov fizicheskogo eksperimenta. –M.: Atomizdat, 1978. – 232 s.
12. Vojtov, V., Biekirov, A., & Voitov, A. (2018). The Quality of the Tribosystem as a Factor of Wear Resistance. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 25-29. doi:<http://dx.doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19547>