

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.3(88).14921

А. В. ВОЙТОВ

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Україна

ЗАЛЕЖНОСТІ ЗМІНИ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТРУКТУРИ СПОЛУЧЕНИХ МАТЕРІАЛІВ У ТРИБОСИСТЕМІ ПІД ЧАС ПРИПРАЦЮВАННЯ

В роботі представлені експериментальні залежності зміни реологічних властивостей структури матеріалів поверхневих шарів трибоелементів в трибосистемі під час припрацювання, обґрунтовано методичний підхід до визначення таких властивостей з використанням поперечних ультразвукових хвиль. Експериментальним шляхом встановлено, що логарифмічний декремент загасання ультразвукових коливань в структурі матеріалу поверхневого шару за період припрацювання збільшується на 32...45 % в залежності від початкової структури матеріалів.

На підставі експериментальних даних отримано математичний вираз, який дозволяє визначити збільшення реологічних властивостей структури матеріалів трибоелементів за період припрацювання. Застосування таких залежностей дозволить підвищити точність моделювання процесів тертя та зношування.

Ключові слова: реологічні властивості структури матеріалів; внутрішнє тертя; логарифмічний декремент загасання; трибосистема; зносостійкість; коефіцієнт тертя.

Вступ. Механізми дисипації енергії (реологічні властивості структури сполучених матеріалів), є динамічними механізмами релаксації напружень, що виникають в поверхневих шарах трибоелементів. Релаксація напружень в зонах контакту шорсткостей трибоелементів обумовлена високим внутрішнім тертям структури матеріалів поверхневих шарів, що призводить до більш рівномірного перерозподілу напружень за об'ємом і запобігає необоротне накопичення дефектів, що викликає концентрацію напруг. Тому чим більша частка механічної енергії, що підводиться при терті, розсіюється у вигляді тепла, тим вище повинна бути зносостійкість трибосистеми.

Для моделювання та прогнозування зносостійкості трибосистем, а також для розрахунку швидкості зношування і втрат на тертя, необхідно мати параметр, який є структурно-чутливою характеристикою матеріалів з яких виготовлені трибоелементи. Даний параметр повинен 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. Аналіз робіт, які присвячені дослідженню реологічних властивостей матеріалів і їх зв'язку з зносостійкістю [1-4], показав, що типовими процесами механічної релаксації в металах з ОЦК ґратами (релаксаційного внутрішнього тертя) є: релаксація Сноєка, релаксація Кестера та зерногранична релаксація.

У наведених вище роботах показано, що пік внутрішнього тертя Сноєка пов'язаний з дифузійною атомів проникнення (вуглець, азот) в поле напруг ОЦК-металів при циклічній деформації, коли зміна деформацій, викликаних перерозподілом атомів в полі напружень, запізнюється по відношенню до зміни напруг.

Пік Кестера (деформаційний) є результатом взаємодії дислокацій, що виникають при пластичній деформації металу, з атомами впровадження. Внутрішнє тертя при цьому обумовлюється викликаною напруженою переорієнтацією атомів впровадження в пружному полі дислокацій при їх русі.

Ефекти зернограничної релаксації відображають в'язку течію по поверхнях і субповерхнях розділу, а також рухливість вакансій і атомів в граничних областях. При збігу періоду деформації з часом релаксації процесу міграції між межою і об'ємом зерна, спостерігається максимальне розсіювання енергії коливань – з'являється пік внутрішнього тертя. У наведених вище роботах показано, що існує мінімум зносу для сталей, який збігається з піками внутрішнього тертя в області певних температур, наприклад, 300°C.

Авторами робіт [5] затверджується, що для широкого кола матеріалів (чистих металів і промислових сплавів) спостерігаються загальні закономірності поведінки температурної залежності величини внутрішнього тертя і відносного подовження до руйнування при надпластичної деформації. В роботі [5] представлений аналіз появи піків внутрішнього тертя в міді при різних температурах, наприклад, при температурі 175°C і при температурі 230°C. Показано, що в температурних діапазонах внутрішнього тертя спостерігаються максимуми, викликані релаксацією по межах зерен.

Перераховані вище роботи дозволяють зробити висновок про значний вплив температури на величину внутрішнього тертя структури матеріалів. В процесі роботи трибосистеми має місце зростання температури поверхневих шарів трибоелементів, яка буде викликати зміни реологічних властивостей і тим самим впливати на зносостійкість трибосистеми. Можна припустити, що такі процеси будуть активно відбуватися під час припрацювання, що і підтверджено в роботі [6]. У зазначеній роботі представлені залежності збільшення логарифмічного декремента загасання ультразвукових коливань в структурі матеріалів трибоелементів під час припрацювання. Встановлено, що збільшення внутрішнього тертя за період припрацювання може досягати 30%.

Мета дослідження. Провести експериментальні дослідження і виконати оцінку ступеня зміни реологічних властивостей структури матеріалів трибоелементів трибосистеми під час припрацювання, а також отримати математичні вирази для їх апроксимації.

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

Грунтуючись на висновках роботи [7] при вимірах логарифмічного декремента загасання будемо використовувати поперечні хвилі на робочій частоті дефектоскопа $f_0 = 5$ МГц. У процесі досліджень п'єзоелектричний перетворювач (ПЕП) встановлювали на нерухомий трибоелемент трибосистеми так, щоб перше і третє (зворотний хід хвилі) відображення припадали на зону контакту рухомого і нерухомого трибоелементів, рис.1.

Дослідження залежностей зміни логарифмічного декремента загасання під час припрацювання трибосистеми проводили за схемою «диск – колодка» на машині тертя СМТ-1. В якості «колодки» застосовували плоский зразок розміром 10×10 мм та довжиною 35 мм. На плоску грань зразка встановлювався ПЕП, як показано на рис.1.

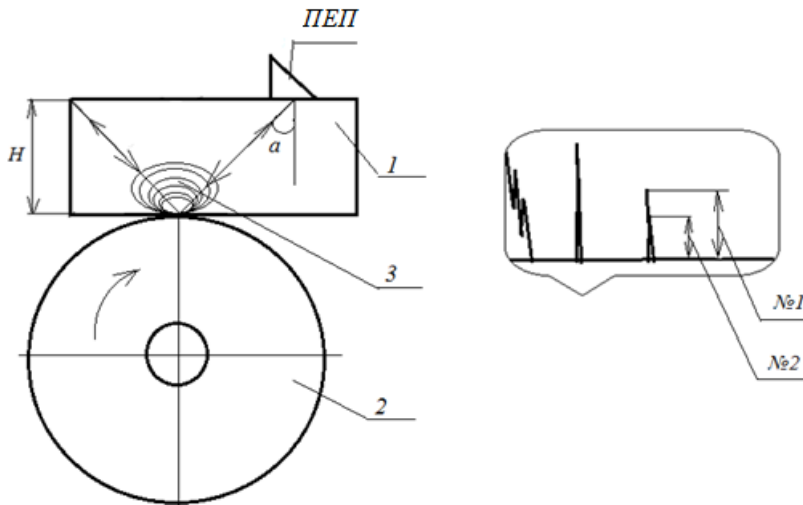


Рис. 1. Схема застосування поперечних хвиль при визначенні внутрішнього тертя структури матеріалів в трибосистемі під час припрацювання: ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач; 1 – нерухомий трибоелемент; 2 – рухомий трибоелемент; 3 – область контакту; №1 – імпульс дворазового відображення хвилі перед початком припрацювання; №2 – імпульс дворазового відображення хвилі після завершення припрацювання; α – кут введення ультразвукової хвилі в матеріал; H – товщина матеріалу

Рухомий трибоелемент – ролик, був виготовлений зі сталі ШХ 15 (HRC 62). Нерухомі трибоелементи – плоскі зразки, були виготовлені з сталей, чавунів і бронз, згідно таблиці 1 яка наведена в роботі [7].

В якості мастильного середовища використовували моторну оливу М-10Г_{2к}, яка подавалася в зону тертя крапельним способом. Швидкість ковзання 0,5 м/с, навантаження 400 – 1600 Н, в залежності від сполучених матеріалів в трибосистемі.

Початкові значення логарифмічного декременту загасання, який позначимо через δ_0 , візьмемо з таблиці 1 яка наведена в роботі [7]:

- сталь 45 (HRC 52), $\delta_0=374,5$ dB/м;
- сталь ШХ 15 (HRC 62), $\delta_0=424,8$ dB/м;
- сталь 40X (HRC 58), $\delta_0=443,6$ dB/м;
- СЧ 15 (HB 210), $\delta_0=619,9$ dB/м;
- ВЧ 70 (HB 302), $\delta_0=680,8$ dB/м;
- СЧМ (HB 280), $\delta_0=729,6$ dB/м;
- Бр.ОЦС-6-6-4 (HB 70), $\delta_0=679,0$ dB/м;
- Бр.АЖ 9-4 (HB 110), $\delta_0=784,0$ dB/м;
- ЛМцСКА 58-2-2-1-1 (HB 125), $\delta_0=840,5$ dB/м.

Перераховані матеріали широко застосовуються в конструкціях трибосистем гідромашин.

У процесі проведення експерименту реєстрували динаміку зміни моменту тертя, який перераховували в коефіцієнт тертя. За зміною коефіцієнта тертя судили про завершення припрацювання. За допомогою ультразвукового дефектоскопу УД2-12 вимірювали логарифмічний декремент загасання ультразвукових хвиль в нерухомому трибоелементі. З метою виключення впливу ультразвуку на процес припрацювання, вимірювання проводили дискретно, в характерних точ-

ках кривої припрацювання. Режим роботи трибосистем – тертя в умовах граничного навантаження.

Результати досліджень. Залежності зміни логарифмічного декременту загасання і коефіцієнта тертя різних конструкційних матеріалів, в сполученні з рухомих зразком зі сталі ШХ 15, представлені на рис.1 – 3. На рис.1 для трибосистем з сполученням матеріалів «сталь – сталь». На рис.2 для трибосистем з сполученням матеріалів «сталь – чавун». На рис.3 для трибосистем з сполученням матеріалів «сталь – бронза (латунь)».

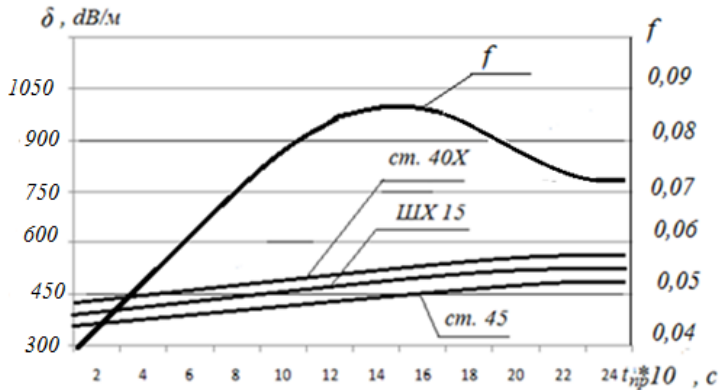


Рис.1. Залежності зміни логарифмічного декременту загасання δ різних марок сталей і коефіцієнта тертя f в процесі припрацювання трибосистеми

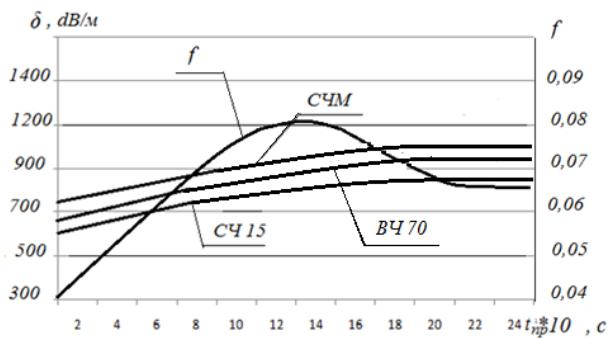


Рис.2. Залежності зміни логарифмічного декременту загасання δ різних марок чавунів і коефіцієнта тертя f в процесі припрацювання трибосистеми

Аналіз представлених експериментальних залежностей дозволяє зробити висновок, що в процесі припрацювання реологічні властивості структури матеріалів збільшуються. Наприклад, для сталей, рис.1, логарифмічний декремент загасання збільшується від значень $\delta_0 = 374 \dots 443$ dB/m до значень $\delta_{max} = 493 \dots 584$ dB/m, що становить 32 %.

Для різних марок чавунів, рис.2, логарифмічний декремент загасання збільшується від значень $\delta_0 = 619 \dots 729$ dB/m до значень $\delta_{max} = 854 \dots 1006$ dB/m, що становить 38 %.

Для різних марок бронз і латуней, рис.3, логарифмічний декремент загасання збільшується від значень $\delta_0 = 679 \dots 840$ dB/m до значень $\delta_{max} = 984 \dots 1218$ dB/m, що становить 45 %.

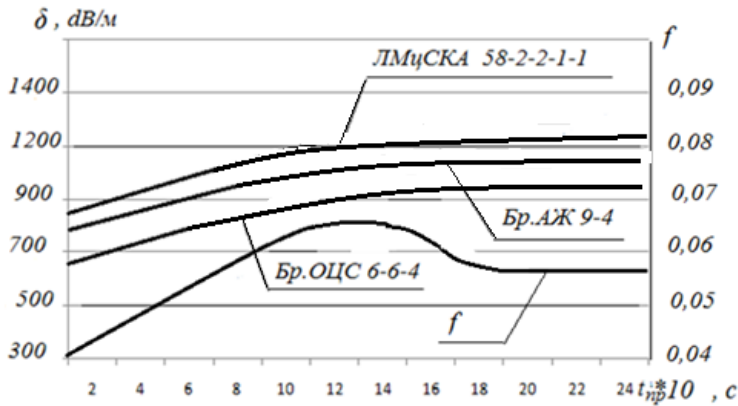


Рис. 3. Залежності зміни логарифмічного декременту загасання δ різних марок бронз і латуней і коефіцієнта тертя f в процесі припрацювання роботи трибосистеми

Таке зростання величини внутрішнього тертя структури матеріалів поверхневих шарів нерухомих трибоелементів можна пояснити складним напруженим станом зони контакту.

По-перше, в зоні контакту підвищується температура поверхневих шарів, а також в об'ємі матеріалу, що прилягає до поверхневих шарів. Ґрунтуючись на роботах, які наведені вище, зростанню логарифмічного декременту загасання сприяють температурні піки внутрішнього тертя.

По-друге, в зоні контакту, де присутній складний напружений стан, відбувається зернограничне ковзання, дифузія по межах зерен, ротація блоків і т.д., що змінює структуру матеріалу поверхневих шарів за період припрацювання. Перераховані явища збільшують реологічні властивості структури матеріалів від δ_0 до δ_{max} , які після завершення припрацювання не змінюються.

Отримані експериментальні залежності були апроксимовані наступним виразом:

$$\delta_{max} = \delta_0 + \delta_0 \cdot \left(\frac{W_{TP,n}}{f_{max} \cdot N \cdot v_{ков}} \right) \cdot th \left(\frac{t_i}{t_{np}} \right), \quad (1)$$

де $W_{TP,n}$ – швидкість роботи дисипації в нерухомому трибоелементі трибосистеми, розраховується відповідно до роботи [8], розмірність Дж/с; f_{max} – максимальне значення коефіцієнта тертя під час припрацювання трибосистеми; N – навантаження на трибосистему, Н; $v_{ков}$ – швидкість ковзання, м/с; t_i – час в процесі припрацювання, с; t_{np} – час завершення припрацювання, с.

Вираз (1), який характеризує зміну реологічних властивостей структури матеріалів трибоелементів під час припрацювання, було перевірено на адекватність експериментальним даним за критерієм Фішера з довірчою ймовірністю 0,95.

Обговорення результатів досліджень. Вираз в першій скобці формули (1) – це безрозмірна величина, яка відображає відношення швидкості роботи дисипації в матеріалі нерухомого трибоелемента до швидкості зміни роботи тертя в трибосистеми.

Згідно роботи [8] на величину швидкості роботи дисипації $W_{TP,n}$ впливають параметри шорсткості поверхонь тертя Ra та Sm , фізико-механічні властивості матеріалів (модуль пружності і коефіцієнт Пуасона), навантаження і швидкість

ковзання N , $v_{ков}$, конструкція трибосистеми (площа тертя і об'єм матеріалу, який бере участь в деформації), трибологічні властивості мастильного середовища. Фізичний сенс швидкості роботи дисипації структури матеріалу нерухомого трибоелемента $W_{TP,n}$ – це та частина роботи тертя, яка перетворюється в тепло і розсіюється в навколишнє середовище.

Відношення швидкості роботи дисипації $W_{TP,n}$ до швидкості зміни роботи тертя в трибосистемі під час перехідного процесу (припрацювання) $-f_{max}Nv_{ков}$ характеризує ту частину роботи тертя, яка відноситься до нерухомого трибоелементу. Зміна структури матеріалу, наявність градієнта напружень на фактичних плямах контакту, а також градієнта температур в об'ємі поверхневого шару, призводить до збільшення реологічних властивостей структури сполучених матеріалів в трибосистемі. Для підвищення точності моделювання процесів тертя і зношування необхідно враховувати встановлений факт, тому що збільшення реологічних властивостей в процесі припрацювання від δ_0 до δ_{max} , становить 32...45 %.

Висновок. Обґрунтовано методичний підхід до визначення реологічних властивостей (внутрішнього тертя) структури матеріалу нерухомого трибоелемента трибосистеми під час припрацювання. Експериментальним шляхом встановлено, що логарифмічний декремент загасання ультразвукових коливань в структурі матеріалу за період припрацювання збільшується на 32...45 %.

На підставі експериментальних даних отримано математичний вираз, який дозволяє визначити збільшення реологічних властивостей структури матеріалів трибоелементів за період припрацювання. Застосування таких залежностей дозволить підвищити точність моделювання процесів тертя та зношування.

Список літератури

1. Шевеля В.В., Олександренко В.П., Калда Г.С. О роли релаксационных явлений и субструктурных превращений при трении металлов / Проблемитрибології. – 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 / Проблемитрибології. – 2010. – № 4. – С. 6-16.
4. Шевеля В.В., Олександренко В.П. Трибохимия и реология износостойкости. – Хмельницький: ХНУ, 2006. – 278 с.
5. Грязнов М.Ю., Чувильдеев В.Н., Сысоев А.Н., Копылов В.И. Зернограничное внутреннее трение и сверхпластичность нано- и микрокристаллических металлов и сплавов / Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. – №5(2). – С.147-158.
6. 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.
7. Войтов В.А., Войтов А.В. Методический подход к определению реологических свойств структуры сопряженных материалов в трибосистеме // Проблемитертя та зношування. 2020. – №. 2 (87). – С. 4-10. DOI: 10.18372/0370-2197.2(87).14719
8. Войтов В.А., Захарченко М.Б. Моделирование процессов трения изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 1. Расчет скорости работы диссипации в трибосистемах / Проблемитрибології. – 2015. – № 1. – С. 49-57.

A. V. VOITOV

DEPENDENCES OF CHANGE OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF STRUCTURE OF COMBINED MATERIALS IN TRIBOSYSTEM DURING RUNNING-IN

The paper presents experimental dependences of the change in the rheological properties of the structure of materials of the surface layers of triboelements in the tribosystem during running-in, methodical approach to determination of such properties with the use of transverse ultrasonic waves at the operating frequency of the flaw detector is substantiated $f_d = 5$ MHz. In the process of research, the piezoelectric transducer was installed on a fixed triboelement of the tribosystem so that the first and third (reverse wave) reflections fell on the contact zone of movable and immovable triboelements. The analysis of the presented experimental dependences allows to draw a conclusion that in the course of running-in rheological properties of structure of materials increase.

For example, for steels, the logarithmic decrement of attenuation increases with values $\delta_0 = 374 \dots 443$ dB/m to values $\delta_{\max} = 493 \dots 584$ dB/m, which is 32 %.

For different grades of cast iron, the logarithmic decrement of attenuation increases with values $\delta_0 = 619 \dots 729$ dB/m to values $\delta_{\max} = 854 \dots 1006$ dB/m, which is 38 %. For different brands of bronze and brass, the logarithmic decrement of attenuation increases with values $\delta_0 = 679 \dots 840$ dB/m to values $\delta_{\max} = 984 \dots 1218$ dB/m, which is 45 %.

On the basis of experimental data the mathematical expression which allows to define increase in rheological properties of structure of materials of triboelements for the period of running-in is received, which reflects the ratio of the rate of dissipation in the material of the fixed triboelement to the rate of change of the friction of the tribosystem. It is proved that the value of dissipation speed is influenced by the parameters of friction surface roughness, physical and mechanical properties of materials (modulus of elasticity and Poisson's ratio), load and sliding speed, tribosystem design (the area of friction and the volume of material involved in the deformation), tribological properties of the lubricating medium.

The use of such dependences will increase the accuracy of modeling the processes of friction and wear.

Keywords: rheological properties of the structure of materials; internal friction; logarithmic decrement of attenuation; tribosystem; durability; coefficient of friction.

References

1. Shevelya V.V., Oleksandrenko V.P., Kalda G.S. O roli relaksatsionnykh yavleniy i substrukturnykh prevrashcheniy pri trenii metallov / Problemy 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. Reologiyavyazkouprugogofriktsionnogokontakta / Problemy tribologii. – 2010. – № 4. – S. 6-16.
4. Shevelya V.V., Oleksandrenko V.P. Tribokhimiya i reologiya iznosostoykosti. – Khmel'nitskiy: KHNU, 2006. – 278 s.
5. Gryaznov M.YU., Chuvil'deyev V.N., Sysoyev A.N., Kopylov V.I. Zernogranichnoyevnutrenneyetreniye i sverkhplastichnost' nano- i mikrokristallicheskiykh metallov i splavov / Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. – 2010. – № 5(2). – S. 147-158.
6. Shevelya V.V., Vojtov V.A., Sukhanov M.I., Isakov D.I. Zakonomernosti izmeneniya vnutrennegotreniya v protsesseraboty tribosistemy i yegouchet privyboresovmestimykh materialov / Treniye i iznos. – 1995. – T. 16, № 4. – S. 734-744.
7. Vojtov V.A., Voitov A.V. Metodicheskiy podkhod k opredeleniyu reologicheskikh svoystv struktury sopryazhennykh materialov v tribosisteme // Problemy tribologii. – 2020. – № 2 (87). – S. 4-10. DOI: 10.18372/0370-2197.2(87).14719

8. Vojtov V.A., Zakharchenko M.B. Modelirovaniye protsessov treniya i znashivaniya v tribo sistemakh v usloviyakh granichnoy mazki. Chast' 1. Raschets korostiraboty dissipatsii v tribo sistemakh / Problemy tribologii. – 2015. – № 1. – S. 49-57.

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.