

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ВАРВАРОВ ВАЛЕРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.891

**ДИСЕРТАЦІЯ**

ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ТРИБОСИСТЕМ В АГРЕГАТОБУДУВАННІ  
ПЕРЕВЕДЕННЯМ ЇХ В РЕЖИМ АНОМАЛЬНО НИЗЬКОГО ТЕРТЯ ТА  
ЗНОШУВАННЯ

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування у машинах

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

В.В. Варваров

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Войтов Віктор Анатолійович, д.т.н., професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Харків – 2021

## АНОТАЦІЯ

*Варваров В.В.* Підвищення ресурсу трибосистем в агрегатобудуванні переведенням їх в режим аномально низького тертя та зношування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах». – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Харків, 2021.

В роботі на основі аналізу механізмів дисипації зовнішньої енергії, що підводиться до трибосистеми (ТС), як факторів зниження тертя в різноманітних областях живої та неживої природи визначено роль хвильової складової тертя та зношування. На даний час в експериментальній і теоретичній трибології наявність хвильової складової представляється як додатковий фактор дисипації енергії, що підводиться ззовні, який не має значного впливу. В той же час при певних термодинамічних умовах в трибосистемах формується достатньо значна хвильова складова сили тертя, яка істотно зменшує молекулярно-механічну складову.

Теоретично визначено, що перехід від нормального механохімічного тертя та зношування до аномально низького тертя та зношування можливий після формування поверхневого шару з певними реологічними характеристиками. В якості основного джерела перетворення енергії виступають енергетичні дефекти – фонони – кванти хвиль розтягування-стиснення і зсуву (звукові хвилі), які являються основною причиною енергетичного знищення. Величина енергії в умовах аномально низького тертя та зношування оцінюється з точки зору квантової теорії величиною механічного кванту  $\hat{\epsilon}$  – мінімального числа атомів, здатних забезпечувати такий їх конфігураційний розподіл, який має властивості зворотно сприймати і розсіювати (повертати) енергію зовнішнього механічного руху.

Теоретично визначено, що саморегулювання трибосистем в умовах аномально низького тертя та зношування відбувається за каналом

надлишкового виробництва структурної ентропії, яка визначає вид стійкості і може приймати як позитивні, так і негативні значення. В той же час в умовах нормального механохімічного зношування саморегулювання відбувається за каналом термодинамічної ентропії, виробництво якої для досягнення рівноваги прагне до мінімуму. Визначено теоретичний підхід для розробки структурно-енергетичної моделі перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування.

Експериментально визначено основні напрямки та методи дослідження механізмів дисипації енергії в умовах аномально низького тертя та зношування. Обрано комплексні металофізичні дослідження для розкриття суті фізичних процесів, які відбуваються при переході від нормального механохімічного тертя та зношування до аномально низького при проведенні комплексних досліджень. Визначено, що основною причиною переходу трибосистем до аномально низького тертя та зношування є реологічні властивості поверхневого шару трибосистеми.

Оптимізацією реологічної будови поверхневого шару реальних трибосистем вдалося досягти умов, коли дисипативний об'єм в умовах контактної взаємодії здатний зворотно трансформувати (розсіювати) енергію зовнішнього руху. Практично вдалося реалізувати «ідеальні» умови дисипації зовнішньої енергії, що підводиться, по хвильовому каналу і уникнути процесу зношування в трибосистемі та позбавитися від зовнішнього тертя. Дану технологію можна віднести до розряду ресурсозберігаючих з високим ступенем енергоефективності.

Аналіз контактної взаємодії шорсткостей за моделлю твердого тіла у вигляді міжатомних зв'язків дав можливість оцінити пружну енергію, яка виділяється при руйнуванні зв'язків у результаті проковзування мікрошорсткостей. Вона складає чверть від величини енергії, яка витрачена на подолання сил тертя.

Оцінка взаємодії, як марківського процесу з двома двосторонніми станами (розпад і відновлення), дозволила отримати математичну залежність

узагальненої складової імпульсу сили на плямі контакту від енергії контакту в стані зчеплення і параметру розподілення плям контакту за модулем канонічного розподілу енергії по лінії (поверхні) контакту.

Дослідження амплітудно-частотних характеристик пружних коливань досліджуваних трибосистем в діапазоні частот від 0 до 10 кГц показав (при одних і тих же умовах роботи на тертя та зношування), що максимальне значення амплітуд коливань при нормальному механохімічному зношуванні знаходиться в діапазоні 400...500 Гц. При дослідженні аномально низького тертя та зношування на діаграмі спостерігаються два характерні максимуми: перший від 500 до 700 Гц, другий від 6 до 7 кГц, тобто на порядок вище. Причому максимальні значення амплітуд для даних ділянок мають рівні значення і становлять 42 дБ. Пік у першому діапазоні відображає енергетику від молекулярно-механічної складової сили тертя, а другий – візуалізує хвильову складову сили тертя. Наявність практичної рівності максимальних значень амплітуд свідчить про досягнення рівності між імпульсами сили від молекулярно-механічної та хвильової складових сили тертя, що дає пояснення наявності аномально низького тертя та зношування.

Експериментально доведено, що головною умовою для переходу до аномально низького тертя та зношування є формування на поверхні тертя певного градієнта фізико-механічних властивостей, які описані реологічною моделлю Шведова. Експериментально визначено, що використання технології модифікації поверхневого шару бронзових зразків шляхом послідовної фінішної обробки спочатку карбідом кремнію, а потім мінералом групи амфіболів (нефрити) дозволяє змінити реологічну будову поверхневого шару, яка може бути описана моделлю Шведова, і дає можливість перетворювати підведену ззовні енергію по хвильовому каналу (наявність хвильової складової зовнішнього тертя). Комплексні фізичні дослідження доказали, що при нормальному механохімічному зношуванні формується позитивний градієнт твердості по глибині поверхневого шару, у той час як при аномально низькому терті та зношуванні спостерігається від'ємний

градієнт: поверхневий шар – пружний, підповерхневий – пружно-пластичний, що підтверджує, що умови аномально низького тертя та зношування досягаються при реологічній будові поверхонь тертя за моделлю Шведова.

Структурна самоорганізація при досягненні аномально низького тертя та зношування направлена на підтримання трибосистеми в цьому режимі роботи шляхом структурування поверхневого шару, спрямованого на підтримання максимальної надійності. При цьому при підвищенні навантажень поверхня істотно вигладжується на відміну від нормального механохімічного зносу.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Положення, що характеризують наукову новизну дисертаційної роботи, полягають у наступному.

*Вперше:*

- проведено амплітудно-частотний аналіз коливань в умовах аномально низького тертя та зношування. Зафіксовано дві області піків амплітудно-частотної характеристики при аномально низькому терті та зношуванні: у низькочастотній області – від молекулярно-механічної складової сили тертя (яка спостерігається і при нормальному терті) та у високочастотній області – від хвильової складової сили тертя (яка притаманна тільки умовам аномально низького тертя та зношування). Зафіксовано рівність амплітудних характеристик коливань від обох складових;

- отримано експериментальні залежності, які дозволяють зафіксувати перехід трибосистеми від аномально низького тертя до негативного тертя (від’ємний коефіцієнт тертя) при зміні умов тертя двократним зниженням діючих контактних навантажень на сталому режимі аномально низького тертя та зношування. Показано, що основним механізмом руйнування поверхонь при негативному терті є значне перевищення хвильової складової сили тертя над молекулярно-механічною за рахунок накопиченої енергії у підповерхневому шарі;

- встановлено реологічну будову поверхневого шару трибосистем, при якій значно зростає хвильова складова сили тертя та виникають умови для переходу трибосистеми до аномально низького тертя та зношування. Доведено, що одна з поверхонь ТС повинна бути квазіжорстким тілом, а друга поверхня повинна мати реологічну будову за моделлю Шведова: поверхневий шар – квазіпружний (тіло Гука), підповерхневий шар – пружнопластичний (комбінація тіл Максвелла та Сен-Венана).

*Отримали подальший розвиток:*

- структурно-енергетична модель перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування. Для досягнення аномально низького тертя та зношування повинно бути два канали дисипації енергії: перший – на рівні контактної взаємодії, а другий – додатковий – за рахунок накопиченої у підповерхневому шарі енергії.

**Практична значимість отриманих результатів.** Розроблено практичні рекомендації з модифікування бронзових елементів трибосистем «сталь-бронза» за рахунок насичення їх поверхневого шару кремнієм за певною технологією на етапі фінішної обробки, при якому відбувається направлена зміна реологічної будови поверхневих шарів трибосистем «сталь-бронза» та в них виникають умови аномально низького тертя та зношування, що значно підвищує їх ресурс.

Результати роботи впроваджено на АТ «ФЕД» при виготовленні приводів-генераторів ГП21КМ літаків сімейства Ан-148/158/178, ресурс яких збільшився більш, ніж в 4 рази.

**Ключові слова:** аномально низьке тертя і знос, трибосистема, ентропійний насос, молекулярно-механічна складова сили тертя, хвильова складова сили тертя, реологія поверхневого шару, кінетична взаємодія шорсткостей, самоорганізація в трибосистемах, безабразивна фінішна обробка.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Запорожець В.В., Стадніченко В.М., Трошін О.М., Варваров В.В., Стадніченко М.Г. Прискорена методика визначення зносостійкості

нанопокриттів в трибосистемах з використанням інформативних параметрів акустичної емісії. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І.Кожедуба*. 2010. № 3(25). С. 19-24.

2. Сігайло Г.П., Кравцов А.Г., Варваров В.В. Експрес-методика визначення ресурсних показників мастильних матеріалів у процесі експлуатації. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2014. № 4(17). С. 112-114.

3. Варваров В.В., Усачева О.А., Кравцов А.Г. Ускоренные методы оценки эффективности технологических решений для повышения износостойкости агрегатов гидравлических систем авиационной техники. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І.Кожедуба*. 2015. № 1(42). С. 22-24.

4. Войтов В.А., Стадніченко В.М., Варваров В.В. Теоретичні та природні передумови досягнення аномально низького тертя та зношування в трибології. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2019. № 2(60). С. 113-125.

5. Стадніченко В.М., Варваров В.В., Вахнюк С.А. Структурно-енергетична модель перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2019. №16. С. 88-101.

6. Варваров В.В. Механізми самоорганізації в трибосистемах, які працюють в умовах аномально низького тертя та зношування. *Системи озброєння і військова техніка*. 2019. № 2(58). С. 70-79.

7. Варваров В.В. Про фізичний сенс коефіцієнта тертя в умовах аномально низького тертя та зношування. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2020, №189. С. 6-12.

8. Stadnychenko V., Varvarov V. Results of Theoretical and Experimental Researches of Anomalous Low Friction and Wear in Tribosystems. *Advances in Materials*. 2019. Vol. 8. №4. P. 156-165.

9. Viktor Voitov, Viacheslav Stadnychenko, Valeriy Varvarov, Nikolay Stadnychenko. Mechanisms of self-organization in tribosystems operating under conditions of abnormally low friction and wear. *Advances in Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 12 (10). P. 1-18. (в базі SCOPUS).

*Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

1. Стадніченко В. М., Стадніченко М. Г., Прогнозування ресурсу трибосистем з використанням інформативних параметрів акустичної емісії. *Новітні технології для захисту повітряного простору : тези доповідей Шостої наукової конференції ХУПС*. 2010. С. 55.

2. Стадніченко Н. Г. Трошин О. Н., Стадніченко В. Н., Варваров В. В. Границы применения параметра PV при выборе режимов испытаний на трение и износ, моделирующих работу реальных трибосистем при модернизации военной техники. *Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки : Тези доповіді наук.-техніч. конф. ЦНДІ ОВТ*, м. Київ, 16-17 грудня 2010 р. Київ, 2010. С. 38.

3. Стадніченко Н. Г. Трошин О. Н., Стадніченко В. Н., Варваров В. В. Методические аспекты применения метода акустической эмиссии в трибодиагностике. *Новітні технології – для захисту повітряного простору» : тези доповідей Дев'ятої наукова конференція ХУПС*, м. Харків, 17-18 квітня 2013 р. Харків, 2013. С. 76–77.

4. Стадніченко В. Н., Варваров В. В. Методология применения метода акустической эмиссии для прогнозирования ресурса агрегатов авиационной техники. *Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки : наук. практич. конф.* Київ : ДНДІА, 2013. С. 27.

5. Варваров В.В. Методология прогнозування ресурсу трибосистем по результатам прискорених лабораторних і стендових випробувань. *Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки : наук. практич. конф.* Київ: ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2013. С. 358–359.

6. Варваров В. В., Фененко О. О. Прогнозування ресурсу конструкційних матеріалів силових елементів планера. *Створення та*



*модернізація озброєння та військової техніки в сучасних умовах : XV науково-технічна конференція.* Чернігів: ДНВЦ ЗСУ. 2015. С. 180-181.

7. Войтов В. А., Варваров В. В., Стадніченко М. Г. Методика прискореної оцінки ресурсних показників агрегатів паливної автоматики на стадії їх розробки. *Перспективи розвитку озброєння і військової техніки : Міжнародна наукова конференція.* Львів: НАСВ, 2017. С. 24-25.

8. Стадніченко В. М., Варваров В. В. Перспектива створення в агрегатобудуванні матеріалів, що працюють в умовах аномально низького тертя та зношування. *Промислова гідравліка і пневматика : XX міжнар. науково-технічна конференція.* Київ : НАУ, 2019. С. 20-21.

9. Варваров В.В. Аналіз механізмів дисипації зовнішньої енергії при аномально низькому терті та зношуванні. *Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі : XV Міжнар. форум молоді.* Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2019. С. 11.

## SUMMARY

*Varvarov V.V.* Increasing the tribosystems resource in aggregation by switching them to abnormally low friction and wear. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the scientific degree of the candidate of technical sciences (PhD) in specialty 05.02.20 "Rubbing and wearing in machines", – Kharkivskiy natsionalniy tekhnichniy universitet silskogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka, Ukraine, Kharkiv, 2021.

The role of the wave component of friction and wear is determined on the basis of the analysis of the mechanisms of dissipation of external energy supplied to the tribosystem as factors of friction reduction in various areas of living and inanimate nature. At present, in the experimental and theoretical tribology, the presence of the wave component is represented as an additional factor of dissipation of energy supplied from the outside, which has no significant effect. At the same time, under certain thermodynamic conditions, a sufficiently significant wave component of friction force is formed in tribosystems, which significantly reduces the molecular-mechanical component.

It is theoretically determined that the transition from normal mechanochemical friction to abnormally low friction and wear is possible after formation of a surface layer with certain rheological characteristics. As the main source of energy transformation are energy defects - phonons - quanta of tensile-compression and shear waves (sound waves), which are the main cause of energy destruction. The magnitude of energy in the conditions of anomalously low friction and wear is estimated from the point of view of quantum theory by the magnitude of a mechanical quantum - the minimum number of atoms capable of providing such a configurationally distribution that has the properties of the external mechanical motion to perceive and dissipate (rotate) the energy.

It is theoretically determined that the self-regulation of tribosystems under

abnormally low friction and wear occurs through a channel of excess production of structural entropy, which determines the type of stability and can take both positive and negative values. At the same time, under normal mechanochemical wear, self-regulation occurs via a thermodynamic entropy channel whose production tends to be minimized to achieve equilibrium. A theoretical approach for the development of a structural-energy model of energy conversion under conditions of abnormally low friction and wear is determined.

The basic directions and methods of investigation of mechanisms of energy dissipation under conditions of abnormally low friction and wear have been experimentally determined. The complex metal-physical studies were chosen to reveal the essence of the physical processes that occur during the transition from normal mechanochemical friction and wear to the abnormally low during complex studies. It is determined that the rheological properties of the tribosystem surface layer are the main cause of the tribosystems transition to abnormally low friction and wear.

By optimizing the rheological construction of the surface layer of real tribosystems, we succeeded in achieving conditions where dissipative volume in terms of contact interaction is able to reverse (dissipate) the energy of external motion. It was practically possible to realize the "ideal" conditions of dissipation of the external energy supplied by the wave channel and to avoid the process of wear in the tribosystem and to get rid of external friction. This technology can be attributed to the category of energy-efficient resources.

The analysis of the contact interaction of roughnesses by the solid-state model in the form of interatomic bonds has made it possible to estimate the elastic energy released by the destruction of the bonds due to the slipping of the micro roughnesses. It is a quarter of the amount of energy expended to overcome friction.

The evaluation of interaction as a Markov process with two bilateral states (decay and recovery) made it possible to obtain a mathematical dependence of the generalized component of the momentum of contact on the contact energy in the coupling state and the parameter of the distribution of contact spots by the modulus

of canonical energy distribution along the line (surface).

Investigation of the amplitude-frequency characteristics of the elastic oscillations of the tribosystems under study in the frequency range from 0 to 10 kHz showed (under the same friction and wear conditions) that the maximum value of the oscillation amplitudes in normal mechanochemical wear is in the range 400...500 Hz. And in the study of abnormally low friction and wear on the diagram, there are two characteristic maxima: the first from 500 to 700 Hz, the second from 6 to 7 kHz, that is an order of magnitude higher. Moreover, the maximum amplitude values for these sites have equal values and are 42 dBs. The peak in the first range reflects, in our view, the energy from the molecular-mechanical component of the friction force, and the second - visualizes the wave component of the friction force. The presence of practical equality of the maximum values of the amplitudes indicates the achievement of equality between the pulses of force from the molecular-mechanical and wave components of the friction force, which explains the presence of abnormally low friction and wear.

It is experimentally proved that the main condition for the transition to abnormally low friction and wear is the formation on the friction surface of a certain gradient of physical and mechanical properties, which are described by the rheological model of Shvedov. In the course of the research it is experimentally determined that the use of surface layer modification technology for bronze specimens by sequential finishing first with silicon carbide, and then with the mineral of the amphibole group (jade) allows to change the rheological structure of the surface layer, which can be described by the Schwedov model, and to transform energy through the wave channel (the presence of the wave component of external friction). Complex physical studies have shown that under normal mechanochemical wear, a positive hardness gradient is formed along the depth of the surface layer, while at an abnormally low friction and wear, a negative gradient is observed: surface layer is elastic, surface is elastic and plastic abnormally low friction and wear conditions are achieved by rheological construction of the friction surfaces by the Shvedov model.

Structural self-organization upon reaching abnormally low friction and wear is aimed at maintaining the tribosystem in this mode of operation by structuring a surface layer aimed at maintaining maximum reliability. In this case, with increasing loads, the surface is significantly smoothed, unlike normal mechanochemical wear.

**Scientific novelty of the obtained results.** Provisions characterizing the scientific novelty of the dissertation are as follows.

*For the first time:*

- the amplitude-frequency analysis of oscillations in the conditions of abnormally low friction and wear. Two peak areas of the amplitude-frequency characteristic were recorded at anomalously low friction and wear: in the low-frequency region - from the molecular-mechanical component of friction force (which is observed at normal friction) and in the high-frequency region - from the wave component at friction and low friction and wear). Equality of amplitude characteristics of oscillations from both components was fixed;

- experimental dependences were obtained, which allow to record the transition of the tribosystem from abnormally low friction to negative friction (negative coefficient of friction) by changing the friction conditions by twice reducing the existing contact loads at a constant mode of abnormally low friction and wear. It is shown that the main mechanism of surface destruction at negative friction is a significant excess of the wave component of friction force over molecular-mechanical due to the accumulated energy in the subsurface layer;

- found out rheological construction of the surface layer of tribosystems, which significantly increases the wave component of the friction force and conditions for the transition of the tribosystem to abnormally low friction and wear. It is proved that one of the surfaces of the TS must be a quasi-rigid body, and the second surface should have a rheological construction by the model of Shvedov: the surface layer is quasi-elastic (Hooke body), the subsurface layer is elastic-plastic (a combination of Maxwell and Saint-Venant bodies).

*Has been further developed:*

- a structural-energy model of energy conversion under conditions of

abnormally low friction and wear. To achieve anomalously low friction and wear, there must be two channels of energy dissipation: one at the level of contact interaction and the second at the expense of the energy stored in the subsurface layer.

**The practical significance of the results obtained:**

- practical recommendations on modification of bronze elements of tribosystems "steel-bronze" due to saturation of their surface layer with silicon by a certain technology at the stage of finishing, which directs the change of rheological construction of surface layers of tribosystems "steel-bronze" and in them conditions arise low friction and wear, which greatly increases their resource.

The results of the work were introduced at the PJSC "ФЕД (FED)" in the manufacture of actuators generators GP21KM aircraft of the family An-148/158/178, whose resource increased more than 4 times.

**Keywords:** abnormally low friction and wear, tribosystem, entropy pump, molecular-mechanical component of friction force, wave component of friction force, rheology of surface layer, kinetic interaction of roughness, self-organization in tribosystems, non-abrasive finishing processing.

**LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THEME OF THE THESIS**

*List of publications in which the main scientific results of the thesis are published:*

1. Zaporozhets V.V., Stadnychenko V.M., Troshin O.M., Varvarov V.V., Stadnichenko M.H. Pryskena metodyka vyznachennia znosostiikosti nanopokryttiv v tribosystemakh z vykorystanniam informatyvnykh parametriv akustychnoi emisii. Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl im. I.Kozheduba. 2010. № 3(25). S. 19-24.

2. Sihailo H.P., Kravtsov A.H., Varvarov V.V. Ekspres-metodyka vyznachennia resursnykh pokaznykiv mastylnykh materialiv u protsesi ekspluatatsii. Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy. 2014. № 4(17). S. 112-114.

3. Varvarov V.V. Usacheva O.A. Kravtsov A.G. Uskorennyye metody otsenki effektivnosti tekhnologicheskikh resheniy dlya povysheniya

iznosostoykosti agregatov gidravlicheskikh sistem aviatsionnoy tekhniki Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl im. I.Kozheduba. 2015. № 1(42). S. 22-24.

4. Voitov V.A., Stadnychenko V.M., Varvarov V.V. Teoretychni ta pryrodni peredumovy dosiahnennia anomalno nyzkoho tertia ta znoshuvannia v trybolohii. Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl. 2019. № 2(60). S. 113-125.

5. Stadnichenko V.M., Varvarov V.V., Vakhniuk S.A. Strukturno-enerhetychna model peretvorennia enerhii v umovakh anomalno nyzkoho tertia ta znoshuvannia. Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv. 2019. №16. – S. 88-101.

6. Varvarov V.V. Mekhanizmy samoorhanizatsii v trybosystemakh, yaki pratsiuiut v umovakh anomalno nyzkoho tertia ta znoshuvannia. Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. 2019. № 2(58). S. 70-79.

7. Varvarov V.V. Pro fizychnyi sens koefitsiienta tertia v umovakh anomalno nyzkoho tertia ta znoshuvannia. Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu. 2020, №189. S. 6-12. Varvarov V.V. On the physical meaning of the coefficient of friction in conditions of abnormally low friction and wear. Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport. 2020, №189, P. 6-12.

8. Stadnychenko V., Varvarov V. Results of Theoretical and Experimental Researches of Anomalous Low Friction and Wear in Tribosystems / *Advances in Materials*, 2019; Vol. 8, №4, pp. 156-165.

9. Viktor Voitov, Viacheslav Stadnychenko, Valeriy Varvarov, Nikolay Stadnychenko. Mechanisms of self-organization in tribosystems operating under conditions of abnormally low friction and wear / *Advances in Mechanical Engineering*, 2020; Vol. 12(10), pp. 1-18. (SCOPUS).

*Works certifying approbation of the thesis materials:*

1. Stadnichenko V.M. Prohnozuvannia resursu trybosystem z vykorystanniam informatyvnykh parametriv akustychnoi emisii / V.M.

Stadnychenko, M.H. Stadnichenko, V.V. Varvarov // Shosta naukova konferentsiia KhUPS «Novitni tekhnologii – dlia zakhystu povitrianoho prostoru». – Kh.: KhUPS, 2010. – P. 55.

2. Stadnychenko N.H. Hranytsy pryimeneniya parametrov PV pri vybore rezhymov yspytanyi na trenye y yznos, modelyruyushchykh rabotu realnykh trybosystem pry modeonyzatsyy voennoi tekhniky / M.H. Stadnichenko, V.M. Stadnychenko, V.V. Varvarov // Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Problemni pytannia rozvytku ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky». – K: TsNDI OVT ZSU, 2010. P. 243–244.

3. Stadnychenko N.H. Metodicheskye aspekty pryimeneniya metoda akustycheskoi emissiyi v trybodyahnostyke / N.H. Stadnychenko, O.N. Troshyn, V.N. Stadnychenko, V.V. Varvarov y dr. // Deviata naukova konferentsiia KhUPS «Novitni tekhnologii – dlia zakhystu povitrianoho prostoru». – Kh.: KhUPS, 2013. – P. 76–77.

4. Stadnychenko V.N. Metodolohiya pryimeneniya metoda akustycheskoi emysiyi dlia prohnozyrovannya resursa ahrehatov avyatsyonnoi tekhniki / V.N. Stadnychenko, V.V. Varvarov // Naukova praktychna konferentsiia «Aktualni problemy rozvytku aviatsiinoi tekhniky» – K: DNDIA, 2013. P. 27.

5. Varvarov V.V. Metodolohiia prohnozuvannya resursu trybosystem po rezultatam pryskorenykh laboratornykh i stendovykh vyprobuvan / V.V. Varvarov // Naukova praktychna konferentsiia «Problemni pytannia rozvytku ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky» – K: TsNDI OVT ZSU, 2013. P. 358–359.

6. Varvarov V.V. Prohnozuvannya resursu konstruktsiinykh materialiv sylovykh elementiv planera / V.V. Varvarov, O.O. Fenenko // XV naukovo-tekhnichna konferentsiia "Stvorennia ta modernizatsiia ozbroiennia i viiskovoi tekhniky v suchasnykh umovakh". – Chernihiv: DNVTs ZSU. – 2015. – P. 180-181.

7. Vojtov V.A. Metodika pryskorenoyi ocinki resursnih pokaznikov agregativ palyvnoyi avtomatiki na stadiyi yih rozrobki / V.A. Vojtov, V.V. Varvarov, M.G. Stadnichenko // Mizhnarodna naukova konferenciya “Perspektivi rozvitku



OVT SV". L'viv: NASV, 2017. P. 24-25.

8. Stadnychenko V.M. Perspektyva stvorennia v ahrehatobuduvanni materialiv, shcho pratsiuiut v umovakh anomalno nyzkoho tertia ta znoshuvannia / V.M. Stadnychenko, V.V. Varvarov // XX mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia AS PHP «Promyslova hidravlika i pnevmatyka». – K.: NAU, 2019. – P. 20-21.

9. Varvarov V.V. Analiz mekhanizmiv dysypatsii zovnishnoi enerhii pry anomalno nyzkomu tertii ta znoshuvanni / V.V.Varvarov // KhV Mizhnarodnyi forum molodi «Molod i silskohospodarska tekhnika u XXI storichchi». – Kh.: KhNTUSH, 2019. – P. 11.

## ЗМІСТ

|   | с. |
|---|----|
| ВСТУП.....  | 21 |
| РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ УМОВИ ДОСЯГНЕННЯ АНОМАЛЬНО<br>НИЗЬКОГО ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ В ТРИБОЛОГІЇ .....  | 29 |
| 1.1. Аналіз механізмів накопичення та дисипації енергії, що<br>підводиться ззовні до трибосистеми як фактор зниження тертя та<br>зношування ..... | 29 |
| 1.2. Аналіз термодинамічних умов переходу трибосистем до<br>аномально низького тертя та зношування .....  | 43 |
| 1.3. Аналіз фізичних основ хвильового тертя, шляхи досягнення<br>аномально низького тертя та зношування.....                                      | 51 |
| 1.4. Методи контролю аномально низького тертя та зношування .....   | 54 |
| 1.5. Висновки по першому розділу та завдання досліджень.....  | 57 |
| РОЗДІЛ 2 МЕТОДИЧНІ РІШЕННЯ ПРИ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА<br>ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ АНОМАЛЬНО<br>НИЗЬКОГО ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ .....                   | 59 |
| 2.1 Вибір матеріалів для досліджень .....   | 62 |
| 2.2. Обладнання для випробувань на тертя та зношування.....   | 64 |
| 2.2.1 Випробування по визначенню коефіцієнту тертя і на<br>задиростійкість.....   | 66 |
| 2.2.2 Випробування на зношування .....  | 66 |
| 2.3. Фізичні методи досліджень .....  | 67 |
| 2.3.1 Вимірювання макро- і мікротвердості .....   | 67 |
| 2.3.2 Вимірювання шорсткості і профілю поверхні .....   | 69 |
| 2.3.3 Використання електронної мікроскопії та<br>мікрорентгеноспектрального аналізу .....   | 70 |
| 2.3.4 Вимірювання пружних коливань в трибосистемі .....   | 71 |
| 2.3.5 Статистична обробка результатів досліджень .....  | 72 |
| 2.3.6 Акустико-емісійний метод контролю зношування .....  | 73 |

|   |  |     |
|---|--|-----|
| 2.4   | Планування експерименту та обробка результатів .....   | 79  |
| 2.5   | Висновки по другому розділу .....  | 83  |
| РОЗДІЛ 3 СТРУКТУРНО-ЕНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕТВОРЕННЯ |  |     |
| ЕНЕРГІЇ В УМОВАХ АНОМАЛЬНО НИЗЬКОГО ТЕРТЯ ТА        |  |     |
| ЗНОШУВАННЯ .....                                    |  |     |
| 3.1   | Допущення та обмеження, прийняті при розробці моделі .....   | 84  |
| 3.2   | Модель контактної взаємодії мікронерівностей трибоелементів<br>при формуванні хвильової складової сили тертя .....                                   | 87  |
| 3.3   | Механізм накопичення енергії у підповерхневому шарі в умовах<br>контактної взаємодії мікронерівностей .....  | 90  |
| 3.4   | Модель дисипації енергії в умовах мікроконтактної взаємодії<br>поверхонь, сформованих за реологічним принципом Шведова .....                         | 95  |
| 3.5   | Висновки по третьому розділу.....  | 106 |
| РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СПОСОБУ МОДИФІКАЦІЇ               |  |     |
| ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ТРИБОСИСТЕМ ДЛЯ ПОДОВЖЕННЯ        |  |     |
| ЇХ РЕСУРСНИХ ПОКАЗНИКІВ .....                       |  |     |
| 4.1.  | Експериментальні дослідження з модифікації поверхневого<br>шару бронзових зразків досліджуваних трибосистем .....                                    | 108 |
| 4.2.  | Оптимізація параметрів модифікування бронзових зразків на<br>завершальному етапі фінішної обробки (обробка нефритом) .....                           | 123 |
| 4.3.  | Визначення зносостійкості та задиростійкості (несучої здатності)<br>трибосистем після модифікації поверхневого шару за технологією<br>ПИ 02-17 ..... | 131 |
| 4.3.1.  | Результати досліджень на зносостійкість .....  | 131 |
| 4.3.2.  | Результати досліджень на задиростійкість .....   | 134 |
| 4.4.  | Дослідження амплітудно-частотних характеристик при<br>нормальному механохімічному та при аномально низькому<br>терті та зношуванні .....             | 142 |
| 4.5   | Висновки по четвертому розділу .....   | 146 |

|  |     |
|--|-----|
| РОЗДІЛ 5 МЕХАНІЗМИ САМООРГАНІЗАЦІЇ В<br>ТРИБОСИСТЕМАХ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ АНОМАЛЬНО<br>НИЗЬКОГО ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ .....                     | 148 |
| 5.1 Експериментальні дослідження поверхонь тертя при аномально<br>низькому терті та зношуванні.....  | 149 |
| 5.2 Умови самоорганізації поверхневих структур при аномально<br>низькому терті та зношуванні.....  | 160 |
| 5.3 Висновки по п'ятому розділу .....  | 167 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....   | 168 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....  | 172 |
| ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та<br>відомості про апробацію результатів дисертації .....                            | 186 |
| ДОДАТОК Б. Розробка на АТ «ФЕД» приводів-генераторів<br>ГП21КМ з підвищеним ресурсом (технологія ПИ 02-17) для<br>поставки на ДП «Антонов» ..... | 189 |
| ДОДАТОК В. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи...  | 191 |

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Тертя присутнє в численних фізичних явищах, у всіх масштабах. Іноді воно використовується, щоб поліпшити наше життя, але у більшості випадків необхідно зменшити його для того, щоб зменшити механічну енергію дисипації та зношування поверхонь тертя. Близько від однієї третини до половини всієї світової енергії перетворюється в механічне тертя. Втрати у промисловості розвинених країн внаслідок тертя й супутнього зношування машин і механізмів становлять 4...5 % національного доходу. Більшість машин (80 %) виходять із ладу через зношеність механізмів. Витрати на ремонт і технічне обслуговування машини в кілька разів перевищують її вартість: для автомобілів в 6 разів; для літаків до 5 разів; для металорізальних верстатів до 8 разів.

Особливо гостро ця проблема стоїть в агрегатобудуванні, перш за все в авіаційному. Наявність прецизійних пар тертя з високолегованих та кольорових металів вимагає використання високоточного обладнання та високої кваліфікації спеціалістів, ця обставина призводить до високої вартості виготовлення агрегатів. Так для сучасних літальних апаратів вартість виготовлення паливного насоса коливається в межах 50...70 тис. дол. США, а ремонт даних типів насосів займає практично половину цієї вартості. Тому вимоги до ресурсу агрегатів надзвичайно високі і зростають з кожним роком. Як приклад, за рішенням ДП «Антонов» ресурс сучасних агрегатів аксіально-поршневої групи (паливні насоси, гідравлічні насоси, гідроприводи і т.д.) повинен складати без ремонту не менше 12 000 годин, що призвело до необхідності розробки та використання у цьому напрямку нових технологій, які ґрунтуються на нанесенні зносостійких покриттів.

Сучасні досягнення структурно-енергетичної і молекулярно-механічної теорій тертя та зношування дозволяють розглядати трибосистему як генератор з перетворення механічної енергії в теплову. Всі заходи, що

направлені на підвищення зносостійкості трибосистем, прямо або побічно спрямовані на підвищення коефіцієнту корисної дії (ККД) даного теплового генератора, і в цьому напрямку визначилося два основні шляхи. Перший – зменшення частки енергії, яка витрачається на руйнування поверхневого шару за рахунок вдосконалення мастильного матеріалу, структур матеріалів, нанесення різного роду зносостійких покриттів. Другий – вдосконалення умов контактної взаємодії, зменшення коефіцієнта тертя і, як наслідок, зменшення абсолютної величини зовнішньої енергії, що потрапляє до трибосистеми при терті.

Другий шлях є більш перспективним. Сучасний розвиток трибоматеріалознавства дозволив сформулювати новий, достатньо ефективний спосіб зниження тертя та зношування різних трибосистем шляхом трибомодифікування поверхневого шару. Метою такого трибомодифікування є створення найбільш сприятливих умов мікроконтактної квазіпружної взаємодії, що виникає на рівні мікрорельєфу.

Розгляд квазіпружної взаємодії з позиції нерівноважної термодинаміки дозволив висунути гіпотезу, що така взаємодія може бути антидисипативним фактором, який призводить до виведення з трибосистеми накопиченої внутрішньої енергії. Серед цих факторів основний вклад приходить на кінетичну (хвильову) складову сили тертя, що формується при різниці швидкостей гальмування при молекулярно-механічній взаємодії мікронерівностей поверхонь, і проковзуванні при їх розгоні.

Докладне вивчення теоретичних досліджень у цьому напрямку, разом з аналізом відомих природних дисипативних властивостей квазіпружної взаємодії може дати більш глибоке розуміння цього ефекту. Це дає більш широке розуміння умов досягнення аномально низького тертя та зношування (АНЗ) та може дозволити розробити універсальну теорію застосування цього явища у трибології. Таким чином, дослідження у цій галузі є актуальними та присвячені розв'язанню важливої науково-технічної проблеми.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» від 08.09.2011р. № 3715-VI та п.2 постанови Кабінету Міністрів України від 17.05.2012 р. № 397 «Деякі питання визначення середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності галузевого рівня на 2012-2016 рр.», планом науково-дослідних робіт ХНТУСГ ім. Петра Василенка та ХНУПС ім. Івана Кожедуба і була складовою частиною НДР «Діагностика-В», ДР №0101U001463.

**Мета і завдання дослідження.**

Виходячи з вищесказаного, **метою цієї роботи** є підвищення зносостійкості (ресурсу) трибосистем в агрегатобудуванні переведенням їх в режим аномально низького тертя та зношування (АНТЗ).

Для досягнення поставленої мети було визначено наступні **завдання**.

1. Розробити модель контактної взаємодії мікронерівностей поверхонь трибоелементів та механізмів накопичення енергії у підповерхневому шарі, сформованому за реологічним принципом Шведова, та визначити механізм формування хвильової складової сили тертя.

2. Розробити та обґрунтувати механізм структурування поверхневого шару ТС для дисипації накопиченої енергії в умовах аномально низького тертя та зношування. Удосконалити структурно-енергетичну модель перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування.

3. Розробити методичний підхід для розробки способу модифікації поверхневого шару досліджуваних трибосистем для досягнення в них передумов переведення в режим аномально низького тертя та зношування з метою подовження їх ресурсних показників.

4. Виконати комплекс триботехнічних досліджень та провести спільно з АТ «ФЕД» стендові випробування агрегатів з модифікованими трибосистемами за розробленою технологією, розрахувати економічний ефект.

5. Виконати порівняльні дослідження амплітудно-частотних

характеристик при нормальному механохімічному терті та зношуванні та при аномально низькому терті та зношуванні, обґрунтувати механізми самоорганізації трибосистем, що працюють в умовах аномально низького тертя та зношування.

*Об'єкт дослідження* – процеси тертя та зношування в трибосистемах, які працюють в режимі аномально низького тертя та зношування.

*Предмет дослідження* – підвищення зносостійкості трибосистем шляхом поверхневого модифікування для досягнення умов АНТЗ.

**Методи досліджень.** Теоретичні дослідження базувалися на системному аналізі та теорії надійності технічних систем. Експериментальні дослідження ґрунтувалися на теорії планування експерименту та математичної статистики.

Трибологічні дослідження на тертя та зношування проводились на модернізованій серійній машині тертя 2070 СМТ-1 у поєднанні з комплексними металофізичними дослідженнями поверхневого шару трибосистем (ТС), що працюють в умовах АНТЗ. Металофізичні дослідження включали наступні методи.

Вимірювання твердості трибоелементів проводили за методом Роквелла, а після механічної обробки – за методом Віккерса. Вимірювання твердості по Роквеллу здійснювали на автоматичному стаціонарному твердомірі УІТ НR-300 відповідно до ГОСТ 9013-59 і ISO 6508.2. Вимірювання твердості за Віккерсом проводили на стаціонарному твердомірі УІТ НV-10/30/50 відповідно до ГОСТ 2999-75.

Мікротвердість вимірювали за допомогою твердоміра ПМТ-3 відповідно до ГОСТ 9450-60.

Шорсткість і профіль поверхні зразків перед випробуваннями, а також при оптимізації режимів фінішної обробки визначали за допомогою профілометра-профілографа TR200 фірми JENOPTIK, відповідного стандартам ISO 4287-1997.

Дослідження проводились у лабораторії АТ «ФЕД».



При проведенні порівняльних випробувань проводили дослідження на мікроскопі ЛСДФПМ центру нанотехнологій Національного авіаційного університету, м. Київ.

Мікроструктура при великих збільшеннях і з високою глибиною різкості вивчалася на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106 виробництва ОАО SELMI з приставкою для мікрорентгеноспектрального аналізу. З метою отримання розподілу компонентів і їх ідентифікації в поверхневих шарах трибоелементів, оброблених потоком низькоенергетичної плазми, використовували мікрорентгеноспектральний аналіз (МРА). Для цього застосовували енергодисперсійну спектральну приставку ЭДС-1 до мікроскопа РЕМ-106.

Вивчення морфології і структури поверхні виробів проводили за допомогою скануючого зондового мікроскопа Solver P47H-PRO (NT-MDT).

Вимірювання пружних коливань проводили в діапазоні частот від 0 до 10 кГц широкосмуговим датчиком акселерометром фірми Brüel & Kjær типу 4335.

Для реєстрації інтенсивності зношування було використано метод реєстрації швидкості зношування ТС у реальному масштабі часу за допомогою методу акустичної емісії (АЕ).

Обробка результатів експериментів виконувалася із застосуванням стандартних комп'ютерних програм, розроблених на базі математичної статистики.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Положення, що характеризують наукову новизну дисертаційної роботи, полягають у наступному.

*Вперше:*

- проведено амплітудно-частотний аналіз коливань в умовах аномально низького тертя та зношування. Зафіксовано дві області піків амплітудно-частотної характеристики при аномально низькому терті та зношуванні: у низькочастотній області – від молекулярно-механічної складової сили тертя

(яка спостерігається і при нормальному терті) та у високочастотній області – від хвильової складової сили тертя (яка притаманна тільки умовам аномально низького тертя та зношування). Зафіксовано рівність амплітудних характеристик коливань від обох складових;

- отримано експериментальні залежності, які дозволяють зафіксувати перехід ТС від аномально низького тертя до негативного тертя (від'ємний коефіцієнт тертя) при зміні умов тертя двократним зниженням діючих контактних навантажень на сталому режимі аномально низького тертя та зношування. Показано, що основним механізмом руйнування поверхонь при негативному терті є значне перевищення хвильової складової сили тертя над молекулярно-механічною за рахунок накопиченої енергії у підповерхневому шарі.

- встановлено реологічну будову поверхневого шару трибосистем, при якій значно зростає хвильова складова сили тертя та виникають умови для переходу трибосистеми до аномально низького тертя та зношування. Доведено, що одна з поверхонь ТС повинна бути квазіжорстким тілом, а друга поверхня повинна мати реологічну будову за моделлю Шведова: поверхневий шар – квазіпружний (тіло Гука), підповерхневий шар – пружнопластичний (комбінація тіл Максвелла та Сен-Венана).

*Отримали подальший розвиток:*

- структурно-енергетична модель перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування. Для досягнення аномально низького тертя та зношування повинно бути два канали дисипації енергії: перший – на рівні контактної взаємодії, а другий – додатковий – за рахунок накопиченої у підповерхневому шарі енергії.

### **Практична значимість отриманих результатів.**

Розроблено практичні рекомендації з модифікування бронзових елементів трибосистем «сталь-бронза» за рахунок насичення їх поверхневого шару кремнієм за певною технологією на етапі фінішної обробки, при якому відбувається направлена зміна реологічної будови поверхневих шарів

трибосистем «сталь-бронза» та в них виникають умови аномально низького тертя та зношування, що значно підвищує їх ресурс.

Результати роботи впроваджено на АТ «ФЕД» при виготовленні приводів-генераторів ГП21КМ літаків сімейства Ан-148/158/178, ресурс яких збільшився більш, ніж в 4 рази.

### **Особистий внесок здобувача.**

Особисто опубліковані наукові праці [7, 8] (5 розд). У наукових працях, опублікованих у співавторстві здобувачу належать: порівняльна оцінка методом АЕ ресурсних показників ТС після модифікування поверхневого шару [3] (1, 2 розд); методологія використання акустичної емісії для реєстрації аномально низького тертя та зношування [2] (1, 2 розд); визначено реологічну будову поверхневих шарів трибосистем при досягненні АНТЗ [4] (1 розд); визначено умови формування імпульсу сили кінетичної взаємодії мікрошорсткостей при настанні рівноваги між хвильовою та молекулярно-механічною складовою сили тертя та запропоновано розрахункову залежність імпульсу сили від хвильової складової, яка враховує вплив зовнішніх факторів [5, 9] (3 розд); спосіб порівняльної оцінки зносостійкості трибосистем, які працюють в режимі АНТЗ [1] (4 розд); визначено роль шорсткості поверхонь як фактора саморегулювання при зміні зовнішніх умов тертя та проведено амплітудно-частотний аналіз коливань в умовах аномально низького тертя та зношування [6] (4 розд).

**Апробація результатів дисертації.** Результати роботи доповідалися та обговорювалися на: *VI науковій конференції ХУПС «Новітні технології для захисту повітряного простору» (Харків, ХУПС, 2010 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки» (Київ, ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2010 р.); IX науковій конференції ХУПС «Новітні технології для захисту повітряного простору» (Харків, ХУПС, 2013 р.); Науково-практичній конференції «Актуальні проблеми розвитку АТ» (Київ, ДНДІА, 2013 р.); Науково-практичній конференції «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки», (Київ,*

ЦНДІ ОВТ, 2013 р.); XV науково-технічній конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» (Чернігів, ДНВЦ ЗСУ, 2015 р.); Міжнародній науковій конференції «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ», ( Львів, НАСВ, 2017); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології на автомобільному транспорті та машинобудуванні», (Харків, ХНАДУ, 2019 р); XX міжнародній науково-технічній конференції «Промислова гідравліка і пневматика», (Київ, НАУ, 2019 р); XV Міжнародному форумі молоді «Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі» (Харків, ХНТУСГ ім. Петра Василенка).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 192 сторінки, у тому числі 3 додатка. Обсяг основного тексту дисертації становить 184 сторінки, 63 рисунка, 16 таблиць. Список використаних джерел нараховує 171 найменування.

## **РОЗДІЛ 1**

### **ТЕОРЕТИЧНІ УМОВИ ДОСЯГНЕННЯ АНОМАЛЬНО НИЗЬКОГО ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ В ТРИБОЛОГІЇ**

В даному розділі проаналізована інформація щодо аналізу механізмів накопичення та дисипації енергії, що підводиться ззовні до трибосистеми як фактор зниження тертя та зношування. Проаналізовано термодинамічні умови переходу трибосистем до аномально низького тертя та зношування (АНТЗ). Визначено фізичні основи хвильового тертя, шляхи досягнення аномально низького тертя та зношування при зовнішньому терті. Систематизовано відомості про методи контролю аномально низького тертя та зношування.

#### **1.1 Аналіз механізмів накопичення та дисипації енергії, що підводиться ззовні до трибосистеми як фактор зниження тертя та зношування**

Проведемо аналіз механізмів дисипації енергії, що підводиться ззовні до трибосистеми, як фактор зниження тертя в різноманітних областях живої та неживої природи.

Працездатність устаткування, що використовується в нафтохімічній, газопереробній, енергетичній, аерокосмічній і інших галузях народного господарства, в значній мірі залежить від гарантованої надійності виробів, що працюють в умовах високих механічних і температурних навантажень, та в умовах агресивних середовищ.

Використовування таких ефектів, як «нанозносне тертя» («від'ємне тертя», «нульове тертя») [1, 2] може бути покладено в основу створення трибосистем, що мають високий ресурс і максимальну надійність. При цьому, найбільше значення набувають питання утворення на поверхнях фрикційного контакту різних тонких плівкових шарів, особливостей їх

мастильної дії, а також процесів самовпорядкування поверхонь фрикційного контакту, наслідком яких є утворення на поверхнях тертя фрактальних просторових і тимчасових структур, у тому числі ротаційних [3, 4].

Автор робіт із нелінійної термодинаміки і самовпорядкування нерівноважних систем Ілля Пригожин встановив, що деякі відкриті системи в умовах, далеких від рівноваги, стають нестабільними [5, 6], їх макроскопічні властивості при цьому радикально змінюються. В триботехнічних системах це проявляється в утворенні дисипативних структур двох типів.

До першого типу відносяться рівноважні структури, що утворюються в процесі припрацювання, їх формування досягається мінімальним виробництвом ентропії. До дисипативних структур другого типу відносять не рівноважні, що визначаються знаком надмірного виробництва ентропії, умовою утворення яких є підведення додаткової зовнішньої енергії [7, 8]. Дані структури працюють за принципом підтримки максимальної надійності при зміні зовнішніх умов тертя, це досягається підтримкою рівності динамічних процесів «плюс-» і «мінус дисипації» [9, 10]. Як показано в роботах [3, 4, 11], кожному окремому випадку відповідає свій термодинамічний поріг самовпорядкування, який чітко розділяє класи рівноважних і не рівноважних дисипативних структур, що виникають при великих відхиленнях від положення рівноваги. Саме тут виявляється ефект самовпорядкування і когерентна поведінка підсистем, яка виражається в переході трибосистеми до роботи в умовах нанозношування. По суті, це відкриття нових областей у трибофізиці.

Під самовпорядкуванням в синергетиці розуміється здатність будь-яких об'єктів проявляти властивості, характерні для поведінки біологічних і соціальних об'єктів, причому їх зусилля мають чітко виражену спрямованість на підтримку порядку і організованості [11, 12].

Слід зазначити, що самовпорядкування не є універсальною властивістю матерії, а існує лише за певних внутрішніх і зовнішніх умов. Разом з тим, ця властивість не пов'язана з яким-небудь особливим класом речовин: ефект

Бенара, феномен Гюйгенса, лазери, перехід від ламінарної течії до турбулентної, і є доказом цього твердження.

Останній приклад особливо цікавий стосовно триботехніки. Було помічено, що дельфіни при плаванні розвивають швидкість, значно більшу тієї, яку можна було чекати з урахуванням їх геометричної форми. Цей феномен обумовлений тим, що тіло дельфіна володіє малим опором тертя, і пояснюється пружністю шкіри, яка дозволяє граничному шару води на тілі дельфіна залишатися ламінарним навіть при дуже великих числах Рейнольдса [13]. На підставі приведеного вище ефекту, проводяться розробки перспективних літальних і підводних апаратів з повною ламінаризацією граничного шару. Це дає можливість знизити коефіцієнт опору тіла до оточуючого середовища у вісім і більше разів. Дана ідея, що підказана самою природою, використана авторами роботи [14] для пояснення ефектів АНТЗ при застосуванні ревіталізаторів. Сучасна теоретична і експериментальна трибологія все частіше звертається до пояснення природних феноменів зниження сили тертя для застосування у техніці.

Американськими вченими Баретом і Тріатафілом створені моделі риб, які розвивають велику швидкість і ілюструють механізми зниження опору тертя [15]. У процесі руху, зниження коефіцієнта опору моделі досягало 70% у порівнянні з опором обтічної нерухомої моделі. При аналізі отриманих результатів був зроблений висновок про існування двох механізмів зниження коефіцієнта опору тертя моделі: перший механізм пов'язаний з виникаючим уздовж тіла моделі негативним градієнтом динамічного тиску, другий (гіпотетичний) – із системою вихорів, які формуються поблизу тіла моделі, що коливається (хвильова складова опору тертя).

Інший природний феномен аномально низького тертя, відомий як Парадокс Грея. Між поверхнею носової частини дельфіна і зустрічною водою в русі якимось чином виникає і постійно діє негативний градієнт гідродинамічного тиску, тобто дельфін в русі як би наздоганяє постійно тікаючу від нього зустрічну воду [15]. Для здійснення подібного характеру

взаємодії об'єктів, що рухаються в рідині, А.Ф.Дзюбою розроблена технологія, суть якої полягає в тому, що зменшення гідродинамічного опору при русі судна досягається за рахунок створення хвиль пружного стиснення від носової частини по зустрічній рідині [16]. Реалізація даного підходу в сучасному суднобудуванні дозволяє при існуючій потужності двигунів і тому ж споживанні палива збільшити більш ніж в два рази їх швидкість ходу.

На підставі приведеного вище ефекту проводяться розробки перспективних літальних і підводних апаратів з повною ламінаризацією граничного шару. Це дає можливість знизити коефіцієнт опору тіла до оточуючого середовища у вісім і більше разів.

Подібний підхід був використаний і при проектуванні та створенні нових костюмів LZR Racer для спортсменів-пловців [17]. Їх виготовляють з особливої високотехнологічної тканини, що складається з переплечених ниток еластану-нейлону і поліуретану. Технологія запатентована фірмою Speedo. Для тестування костюма використовувалася аеродинамічна труба і інше випробувальне обладнання NASA, а для аналізу течії потоку рідини – програмне забезпечення фірми ANSYS.

Дещо іншим способом зменшується тертя при рухах акул. Шкіра акул вкрита плакоїдною лускою. При кожному русі риби шкіра згинається і деформується, рифлені зубчики зміщуються один відносно одного. У переднього краю гнучкого фрагмента шкіри формується невелике завихрення. Якщо ж цей фрагмент шкіри обробити піскоструминним апаратом і тим самим зруйнувати її поверхневу мікроструктуру, то завихрення починає формуватися набагато далі від краю. Тобто наявність мікроструктури призводить до утворення зони розрідження біля поверхні об'єкта.

Таким чином, аналіз наукових публікацій, присвячених дослідженню високошвидкісного руху тіл у воді показав, що у всіх випадках ефект зниження сил тертя досягається генеруванням різними способами пружних хвиль.

М.Тесла один з перших звернув увагу в техніці, на роль хвильової



складової контактної взаємодії при русі твердих тіл [18]. На відміну від звичайних турбін, в яких рухається потік та потрапляє на лопаті або поршні, в турбіні М.Тесли застосовується безліч жорстких «ідеально» пружних металевих дисків, що не розсікають вихровий потік під гострим кутом, а ковзають паралельно потоку. При цьому вони приводяться в рух завдяки особливого роду тяжінню, яке виникає між поверхнею диска і рухомим газом або рідиною. Це тяжіння, що є гальмуючим фактором для літальних і інших рухомих апаратів, викликане «поштовхом рідини об шорстку поверхню твердої речовини» [18], по суті це і є хвильова складова сили зовнішнього тертя.

У технологіях триботехнічного відновлення на поверхні тертя створюється металокерамічний шар, верхній підшар якого є абсолютно пружним (окисел алюмінію), а підповерхневий шар знаходиться в стані, близькому до аморфного (металосилікат) [19, 20]. Дисипація зовнішньої енергії, що підводиться при терті в даній трибосистемі, відбувається за рахунок пружнопластичних циклічних деформацій металокерамічного шару в контактній області, і названа ефектом хвилі, що «біжить», яка і обумовлює практичну беззносність (нанозносність) трибосистеми [14, 21].

Зниження сили тертя за рахунок використання пружних хвиль різної природи є фактором зниження зовнішнього впливу на трибо систему, який набув поширення в трибології [22-25]. В даний час, цей ефект почав широко використовуватися при конструюванні сучасних трибоелементів озброєння (високошвидкісні судна і торпеди) [16]. У той же час внесок хвильової складової, що генерується безпосередньо при взаємодії трибоелементів при їх русі, до теперішнього часу залишається незаслужено недооціненим [1, 26, 27], і це пов'язано, перш за все, з необхідністю створення спеціальних засобів, як випробувань, так і реєстрації триботехнічних параметрів в реальному часі випробування, що дозволяють оцінювати показники аномально низького тертя та зношування.

Молекулярно-механічний підхід отримав розвиток в роботах Крагельського І.В. із співробітниками [28], в яких тертя розглядається як

процес дискретної взаємодії виступів поверхні матеріалів, що труться, за рахунок шорсткості і хвилястості. У окремих плямах контакту виникають адгезійні зв'язки. При взаємному дотичному переміщенні поверхонь тертя окрім механічного опору існує молекулярна взаємодія між ділянками поверхонь, що зближуються. Фрикційний зв'язок при цьому має подвійну, молекулярно-механічну природу [29, 30]. Співвідношення механічної і молекулярної складової визначається зовнішніми умовами і станом поверхонь тертя.

Головними механізмами рівноважного самовпорядкування матеріалів при терті, на думку Крагельського І.В. [28], є пружна і пластична деформація, що призводять з рештою до втомного характеру зносу, оскільки внаслідок цих деформацій виникають кумулятивні зміни в мікроскопічній будові приповерхневих шарів, це аналогічно змінам, що спостерігаються при втомі матеріалів [28, 31, 32].

Відповідно до молекулярно-механічної концепції, І.В.Крагельським і Швецовою Е.Н. [28] розроблено класифікацію видів зносу. Вона базується на розгляді трьох послідовних етапів: взаємодія поверхонь, що відбувається при ковзанні; зміна поверхонь; руйнування поверхонь. При цьому, відповідно до видів порушення фрикційних зв'язків спостерігаються наступні п'ять видів зносу [28]:

1. Пружне відтиснення матеріалу виступами контртіла. Руйнування матеріалу відбувається за рахунок фрикційної втоми;
2. Пластичне відтиснення металу. Знос є результатом малоциклової втоми;
3. Мікрорізання. Руйнування відбувається при перших актах взаємодії;
4. Адгезійне порушення фрикційного зв'язку;
5. Когезійний відрив, що приводить до глибинного вириву матеріалу.

Метою молекулярно-механічного підходу до процесів самовпорядкування поверхневих шарів є розробка інженерних методів розрахунку на тертя і знос. Проте головна трудність розвитку таких методів,

на думку автора роботи [33], полягає у відсутності простої залежності процесу поверхневого руйнування від об'ємних механічних і фізико-хімічних властивостей матеріалів пар тертя. Крім того, уявлення про фізику процесів деформації і руйнування при високому тиску, наявності ударних хвиль, одночасна дія ряду чинників, утрудняють використання традиційних методів зміцнення при поясненні і рішенні задач поверхневого руйнування під час зносу поверхонь тертя [34, 35].

За допомогою калориметричного методу аналізу тертя [26, 29] встановлено, що при повному рівноважному самовпорядкуванні пар тертя джерелом тепла, можна вважати пружньоколивальні процеси в поверхневому шарі. Причиною їх виникнення, є поле нормального навантаження, що „переміщується”.

Енергоємність таких супутніх явищ, як виникнення магнітних і електричних полів, протікання термопотоків, звукові явища, значно менша, в порівнянні з енергоємністю теплоти, що генерується. Поза сумнівом, меншими, в порівнянні з тепловими енерговитратами, є енергетичні складові, що витрачаються при терті, створення залишкових напружень в тілах тощо.

У найзагальнішому наближенні вираз енергетичного балансу тертя прийнято виражати у вигляді [29]:

$$\Delta A = \Delta Q + \Delta U_d + \Delta U_n + \Delta U_v, \quad (1.1)$$

де  $\Delta A$  – енергія, що витрачається на тертя за даний проміжок часу;

$\Delta Q$  – теплота, що виділилась;

$\Delta U_d$  – енергія диспергування;

$\Delta U_n$  – енергія коливань зовнішніх полів;

$\Delta U_v$  – внутрішня енергія тіл.

Аналізуючи представлений енергетичний баланс, слід мати на увазі, що навіть за відсутності динаміки зовнішніх дій енергетичні витрати протікають не лінійно і характеризуються нестационарними залежностями у функції часу. Крім того, в роботі [36] стверджується, що тертя супроводжується процесами, які протікають динамічно, а їх швидкість залежить від режиму

тертя. В той же час, дослідники утомних процесів металів вважають, що виділення теплоти має велике значення в розвитку вторинної утоми [37-40]. Основною в цій гіпотезі є думка про внутрішньоструктурну дисипацію енергії. При цьому вважається, що інтенсивність зміни внутрішньої енергії розподіляється за часом навантаження не лінійно, а супутні явища приводять до накопичення (підсумовування) пошкоджень.

Останнім часом при вивченні аномально низького тертя та зношування із залученням сучасних фізичних теорій [41-43] особливу увагу приділено саме квазіпружній імпульсній взаємодії, яка виникає в поверхневому шарі при його певній реологічній будові.

Імпульсні взаємодії викликають не тільки коливання, але і поверхневі хвилі, які при певних умовах стають основним каналом дисипації зовнішньої енергії, що підводиться при зовнішньому терті.

Проводячи аналіз роботи трибосистем в умовах аномально низького тертя та зношування рядом вчених [9, 13, 44-47], використовувалися хвилі різної природи до структурування поверхневого шару, однак, як канал дисипації зовнішньої енергії, ця складова зовнішнього тертя не розглядалася.

Одна з перших спроб залучення хвильової складової, як каналу дисипації, виконана в роботі [46]. Автор вважає, що в умовах аномально низького тертя та зношування на поверхні утворюється квазіпружний шар, в центральній частині якого гіпотетично можлива гідродинамічна деформація, а на периферії в перехідній зоні слід очікувати інтенсивну ротаційну пружнопластичу деформацію, аналогічну структурі вихреутворення в пристіночному шарі при перетіканні рідини. Такий підхід, на наш погляд, можна вважати окремим випадком прояву хвильової складової сили тертя, як каналу дисипації зовнішньої енергії, що підводиться.

Досягнення в області нанотрибології [48] широко узагальнені в роботах [49-52]. Проводячи термодинамічний аналіз умов рівноважної самоорганізації трибосистем, які піддаються вібраційним впливам, М. Носоновські і В. Мортазаві прийшли до важливого висновку, що

самоорганізація подібних трибосистем здійснюється по термодинамічному каналу виробництва надлишкової ентропії  $(1/2)\delta^2\dot{S} \geq 0$ , а досягнення умов аномально низького тертя в цьому випадку регулюється величиною імпульсу сили  $dS \geq 0 \Rightarrow \vec{F}\vec{V} \leq 0 \Rightarrow \mu \geq 0$  [15, 22, 53-55].

Даний теоретичний підхід отримав подальший розвиток в роботі [56], в якій показано вплив частотної вібрації на тертя та зношування трибосистеми «кремній по нітриду кремнію». Трибометр дозволяв генерувати як нормальні, так і тангенціальні коливання по відношенню до площини тертя. Встановлено, що в діапазоні частот від 4 до 6 кГц спостерігається зниження коефіцієнта тертя від 1 до 0,1, як для нормальної, так і для тангенціальної складової коливань, а також зменшення зносу. Причому в цьому діапазоні амплітуда коливань не становить вирішального значення на зниження сили тертя, починаючи з певної граничної величини.

Аналіз самого ефекту зниження тертя та зношування проводився без зв'язку з фізико-механічними властивостями досліджуваних матеріалів та механізмами дисипації зовнішньої енергії, що підводиться, хоча реологія поведінки матеріалів врахована на кінематичній схемі досліджуваних трибосистем. Підтвердження правильності такого підходу показано в роботі [57], в якій також, як і в роботі [56], досліджували вплив мікрозміщень трибоелемента при вібрації в умовах сухого тертя.

Як об'єкт досліджень, була взята велика група матеріалів від скла до конструкційної сталі. Встановлено оптимальну область мікрозміщень, в якій для всіх досліджуваних матеріалів спостерігалось мінімальне значення відносного коефіцієнта тертя (відношення коефіцієнта тертя при русі до коефіцієнта тертя спокою). При початкових умовах тертя він дорівнює одиниці, а при терті в певних умовах мікрозміщень досягає аномально низьких значень. На жаль пояснення цього ефекту, із залученням сучасних фізичних теорій зроблено не було.

Проводячи аналіз робіт з дослідження ультразвукових і вібраційних коливань в трибології [15, 22, 53], можна зробити висновок, що практично у

всіх цих роботах хвильова складова сили тертя введена у вираз для сили тертя зі знаком мінус, а в роботах [27, 53] присутня у вигляді кінцевого результату при зовнішньому хвильовому впливі на трибосистему.

Сила зовнішнього тертя, що направлена проти руху в трибосистемі, відповідно до молекулярно-механічної теорії тертя і зношування (узагальненою І. В. Крагельським) і прийнятою більшістю вчених світу в області трибології, складається з двох складових: молекулярної (адгезійної)  $F_a$  і механічної (деформаційної)  $F_d$ . Ці складові сили тертя  $F_{fr}$  при русі твердих тіл «конфліктують» одна з одною:

$$F_{fr} = F_a + F_d. \quad (1.2)$$

При вигладжуванні поверхні із застосуванням методів фінішної обробки, вдається істотним чином понизити механічну складову сили тертя. Але в тих же пропорціях росте молекулярна складова, яка на етапі припрацювання ініціює адгезійно-когезійне руйнування поверхневого шару трибосистеми. В результаті припрацювання формується рівноважний стан, який відповідає даним умовам тертя (навантаження, швидкість ковзання, температура і т.д.). Це, у свою чергу, визначає величину зовнішньої енергії, яка підводиться до трибосистеми, і, як наслідок, визначає швидкості утворення і руйнування вторинних структур [26] на поверхнях тертя, тобто їх зносостійкість.

Узагальнення великої кількості результатів дослідження граничного тертя [58] показує, що значення коефіцієнтів граничного тертя для різних поєднань матеріалів змащувальних середовищ, відповідно до кривої Герсі-Штрибека, знаходиться в діапазоні 0,005...0,02.

Таким чином, при найпоширеніших режимах тертя і мащення у формуванні сили тертя беруть участь як поверхневий шар елементів трибосистеми, так і змащувальне середовище. В даний час, у ряді робіт представлені результати експериментальних досліджень з показниками сили

тертя, що далеко виходять за ці рамки у бік зменшення [59, 60]. Тому пошук теоретичних передумов для переходу зовнішнього тертя з «нормальної області» до аномально низького тертя є своєчасною і актуальною задачею.

Головним аргументом противників теоретичного підходу до можливості досягнення в реальних трибосистемах аномально низького тертя та зношування (нульове тертя, від'ємне тертя) є трактування безповоротності перетворення молекулярно-механічної складової сили тертя в термічну складову.

Критерій безповоротності  $K$  відповідно до [9] визначає відносну роль ефекту тертя, тобто ступеня безповоротності процесу перенесення узагальненої кінетичної взаємодії при гальмуванні та розгоні мікронерівності на плямі контакту. При терті одночасно виконуються дві роботи. Перша здійснюється зовнішніми силами для подолання сили тертя і може бути оцінена термодинамічним потенціалом  $G_{\Pi}$ . А друга виконується внутрішніми силами (пружності) в процесі проковзування в ТС і оцінюється термодинамічним потенціалом  $G_K$ . Можливість досягнення умов АНТЗ за Вейником [9] характеризується критерієм безповоротності:

$$K = -\frac{\Delta G}{G_{\Pi}}, \quad (1.3)$$

де  $\Delta G = G_{\Pi} - G_K$ . Це відношення показує, яку частину від загальної роботи складає робота зовнішніх сил тертя ( $G_{\Pi}$ ). Таким чином, автор [9] вважав можливим досягнення АНТЗ коли робота зовнішніх сил мізерно мала у порівнянні із загальною роботою зовнішніх сил. Із зменшенням критерію  $K$ , ступінь безповоротності процесу зменшується. В межі, коли  $K \rightarrow 0$ , процес стає зворотним. Зворотному процесу відповідає умова  $K = -\frac{\Delta G}{G_{\Pi}} \ll 1$ . При цьому робота тертя мізерно мала у порівнянні із загальною роботою, виконаною над ТС при контактній взаємодії.

Із структури критерію безповоротності (1.3) безпосередньо витікає, що ефект безповоротності залежить тільки від зовнішньої сили і притому від двох її значень  $P_1$  і  $P_2$ , або, що те ж саме, від значень величин  $\Delta P$  і  $P_2$ . Ніякі інші характеристики процесу на ступінь його безповоротності не впливають.

Останнім часом для пояснення аномально низького тертя та зношування використовується хвильовий підхід при аналізі енергетичного обміну між поверхнями, що труться. Так в [45, 61-63] поверхневий шар елементів трибосистеми представляється у вигляді енергетичних осередків представлених їх шорсткістю. При русі поверхонь в кожний момент часу відбувається велика кількість зіткнень мікроступів. В кожній мікрзоні утворюється тепло, яке розсіюється за законами дисипації.

В даній роботі динаміка кінетичної взаємодії мікроступів на всій поверхні контакту не розглядалася. Відомо, що всяка система, що складається з дуже великого числа частинок, переходить від стану менш імовірного до стану більш імовірного. Термодинамічно це відповідає зменшенню ентропії системи  $S$ , відповідно до формули Больцмана [64, 65]:

$$S = k \ln W, \quad (1.4)$$

де  $k$  – постійна Больцмана;

$W$  – термодинамічна імовірність.

Якщо повернутися до реакції трибосистеми на імпульсну динамічну взаємодію, то відповідно до принципу Ле Шательє, трибосистема переходить в такий стан, в якому ефект зовнішньої взаємодії ослаблюється. Результуюча стану трибосистеми в цьому випадку диктується цими двома основоположними термодинамічними принципами. Тому зростання «вагового значення» хвильової складової сил тертя, яка входить в загальне рівняння із знаком мінус, є термодинамічно передбаченим.

В структурно-енергетичній теорії тертя та зношування [30, 32, 46] загальноприйнятим є термін механохімічний знос, який являється



результатом різних видів робіт (механічної, термічної, електричної, хімічної, кінетичної і пов'язаної з нею хвильової і т.д.). Кожний з цих видів роботи специфічний, неповторюваний і не може бути підмінений ніякою іншою. Роботі кожного даного роду відповідає пов'язана з нею і з відповідним механізмом дисипації енергія  $U$ , яка може бути представлена виразом:

$$dU = \sum_{i=1}^n \Delta A_i, \quad (1.5)$$

де  $n$  – кількість видів роботи, що здійснюються при терті;

$\Delta A_i$  – величина відповідного виду роботи.

Робота зіставляється зі зміною енергії системи. Отже, робота є кількісною мірою взаємодії системи і навколишнього середовища, тобто кількісну міру дії навколишнього середовища на систему і навпаки. На цій підставі роботу іноді називають кількістю дії [9].

Робота є характерним прикладом величини, яка не є властивістю системи в прийнятому вище значенні. Робота представляє собою функцію процесу: вона виконується в процесі перенесення і перетворення різних видів енергій трибосистеми. У момент закінчення процесу робота припиняється, а в процесі дисипації підведеної до трибосистеми енергії продовжується в достатньо тривало в часі [66]. Про якісну і кількісну сторону виконаної в закінченому процесі роботи трибосистеми можна судити по непрямим ознаках. По змінах перерахованих вище механізмів дисипації підведеної механічної енергії через узагальнену силу з урахуванням суперпозиції енергетичного складання, кожної з перерахованої раніше сил механізмів дисипації.

Так в розділі електротехніки [67], що присвячений режиму роботи довгої лінії в залежності від величини коефіцієнта віддзеркалення, виділяють три режими: перший режим хвилі, що біжить (РХБ); другий режим стоячих хвиль (РСХ); третій режим комбінованих хвиль (РКХ). Виникнення того або

іншого режиму в лінії залежить від величини і характеру опору навантаження і його співвідношення з хвильовим опором.

Виникнення стоячих хвиль в трибології пов'язано з перерозподілом енергій між зовнішнім і внутрішнім тертям в трибосистемі. Програмне навантаження в трибосистемі – це процес перетворення РКХ в РХБ за допомогою структуризації поверхневого шару. В електротехніці узгодження забезпечується перетворенням комбінованих хвиль в хвилю, що біжить, за рахунок створення штучної неоднорідності в лінії (структуризація в лінії). Таким чином, термінологія, прийнята для пояснення процесів аномально низького тертя та зношування в умовах нерівноважної самоорганізації є абсолютно логічною. Подібні явища з аналогічною термінологією спостерігаються при аналізі хвильових ефектів в гідродинаміці й інших областях фізики [24].

Результати моделювання для реальної трибосистеми [14] показали можливості досягнення трибосистеми умов рівності молекулярно-механічної і хвильової складових сили тертя, тобто досягнення аномально низького тертя та зношування.

До розвитку теоретичного і прикладного підходу до переведу роботи трибосистем з умов нормального механохімічного до аномально низького тертя та зношування необхідно притягнення більш глибоких досліджень в області фізики твердого тіла, матеріалознавства та нерівноважної термодинаміки.

Проведений аналіз аномально низького тертя в трибології [1-4] показав, що прийнята на сьогоднішній час молекулярно-механічна теорія зношування практично ставить бар'єр в отриманні нульового, а тим більше від'ємного тертя, що реєструється при випробуваннях. Для подолання даного бар'єру висунута гіпотеза про існування хвильової складової сили тертя [14, 18, 21], яка отримала подальше теоретичне обґрунтування і експериментальне підтвердження [16, 25].

Проведенні дослідження дають основу вважати, що закон збереження енергії (третій закон термодинаміки) при нульовому і від'ємному терті не порушується. Дисипація енергії відбувається по каналу хвильової складової сили тертя, яка формує на поверхні розділу кінетичне нанополе складовими якого при аномально-низькому терті та зношуванні є процеси дисипації і антидисипації, які проходять з поглинанням та виділенням енергії, по аналогії з екзотермічною і ендотермічною реакцією в хімії [68].

Таким чином, виконаний аналіз виявив необхідність розв'язання такого наукового завдання, як розробка моделі контактної взаємодії шорсткостей трибоелементів та механізмів накопичення та дисипації енергії у підповерхневому шарі, сформованому за певним реологічним принципом.

## **1.2 Аналіз термодинамічних умов переходу трибосистем до аномально низького тертя та зношування**

Грунтуючись на роботах П. Гленсдорфа [69], І. Пригожина [70-73], Г. Хакена [74-78] в області нерівноважної термодинаміки, необхідно відмітити, що досягнення умов аномально низького тертя та зношування відповідає умовам мінімального виробництва ентропії.

В той же час, для нерівноважних дисипативних структур, коли відхилення від рівноваги перевищують критичне значення, надмірне виробництво ентропії може приймати як позитивне, так і від'ємне значення. Перехід від одного стану до іншого відбувається через точку біфуркації (атрактора).

Поняття атрактора, яке широко використовується в синергетиці, авторами робіт [6, 41, 79, 80] трактується як кінцева область неминучого сходження фазових траєкторій руху складної системи. Атрактором може виступати точка (стійкий атрактор), або інше складніше утворення, тобто певна область, усередині якої траєкторії системи скоюють довільні і невіддатливі регулярному опису блукання.

Допоміжну роль грають поняття хаосу і порядку [65, 81, 82]. Вони вживаються як характеристики, що описують взаємовплив процесів, і також характеризують явище самовпорядкування. Для того, щоб у відкритій системі відбувалася структуризація, тобто радикально зростала впорядкованість, експорт ентропії повинен перевищити деяке критичне значення. Для експорту ентропії, що перевищує її внутрішнє виробництво, необхідний свого роду «ентропійний насос», що викачує ентропію з відкритої системи, або перерозподіляє її між елементами з різним ентропійним ресурсом. Такий насос може діяти ззовні, або зсередини.

Проводячи аналіз робіт [5, 7, 15, 83, 84] можна записати термодинамічні умови роботи цього насоса:

$$deF > dE + TdiS,$$

де  $deF$  – відтік вільної енергії;

$dE$  – зміна внутрішньої енергії;

$T$  – температура системи;

$diS$  – ентропія, вироблена в середині системи.

Таким чином, для того, щоб відбувся експорт ентропії, її відтік з системи, необхідним є подача вільної енергії в кількості, що перевищує зміну внутрішньої енергії і внесок, який визначається продукцією ентропії.

У зв'язку з цим надзвичайно важливою є оцінка стійкості нерівноважних станів дисипативних структур. Дана задача вирішена на основі рівняння балансу надмірного виробництва ентропії [9].

Проведений вище аналіз термодинамічних умов роботи трибосистем дає нам підставу допустити наявність двох механізмів самовпорядкування: рівноважного впорядкованого, при якому ступінь нерівноважності зменшується, а енергія виділяється, і нерівноважного впорядкованого, при якому ступінь нерівноважності зростає, а енергія затрачується. Кожній гілці самовпорядкування відповідають свої окремі види дисипативних структур,

що утворюються на поверхнях тертя. Рівноважно впорядковані, що виникають в процесі первинного і вторинного припрацювання в трибосистемах [14], і нерівноважно впорядковані, що виникають в трибосистемі за межею стійкості за рахунок цілеспрямованої дії ззовні (теплофізичної, силової, електрофізичної, радіаційної і т.д.) [15].

Цілеспрямована дія ззовні, приводить трибосистему в сильно впорядкований і далекий від початкового стан. З позиції фізики твердого тіла цей перехід пов'язаний з поступовим подоланням наявного потенційного бар'єру, і може розглядатися, як фазовий перехід другого роду. Штучно збуджену трибосистему доцільно визначати двома стабільними станами, що характеризуються відповідно рівнями енергії тертя  $E_1$  і  $E_2$ , а також енергетичним бар'єром  $Q$ . Спонтанний перехід системи з початкового положення в рівноважний стан  $E_1$ , можливий за допомогою звичайного припрацювання. Проте мимовільний перехід трибосистеми в стан  $E_2$  не відбудеться, оскільки ці стани розділяє енергетичний бар'єр  $Q > E_1$ , подолання якого за рахунок сили тертя практично неможливе. Для радикального зниження рівня сили тертя і інтенсивності зношування необхідна додаткова дія на трибосистему з енергією, що забезпечує подолання бар'єру  $Q$  і подальший перехід системи в стан  $E_2$ .

Цінність такого підходу при аналізі дисипативних структур і процесів самоорганізації трибосистем полягає в більш глибокому розумінні зв'язку тертя з основними законами природи та виробленню методичних рішень для управління процесами тертя та зношування. А це є основною задачею фундаментальних і прикладних досліджень в даній області науки і техніки.

Приведені нижче дослідження ґрунтуються на науковій гіпотезі, в основу якої покладена енергетична модель тертя та зношування [14, 30]. Дана гіпотеза дає можливість при описі динаміки будь-яких макроскопічних систем, через зміни термодинамічних потенціалів, враховувати адсорбційні, дифузійні і інші ефекти.

Принципово важливим при оцінці термодинамічних процесів в трибосистемах є врахування взаємовпливу основних факторів.

В реальній трибосистемі в силу різноманітних причин, а саме використання триботехнічних матеріалів з різним коефіцієнтом теплопередачі [83], масштабним фактором [85], який може бути оцінений коефіцієнтом форми [86-88], що оцінюється співвідношенням площ поверхонь трибоелемента та їх об'ємів, системою мащення, яка забезпечує тепловідвід. Таким чином, в трибосистемах завжди створюється тепловий потік.

Завдяки різниці температур виникає тепловий потік, відмінний від нуля. В процесах виробництва ентропії завжди присутній потік, тобто зміна деякої фізичної величини, і сила, що створює цей потік. В цьому випадку потоком є потік енергії  $dE/dt$ .

Функція дисипації виражається виробництвом потоку і силою, що його викликає. Вона є універсальною як для електричних і хімічних явищ, так і для трибосистем.

Грунтуючись на кібернетичній моделі саморегулювання трибосистем [47], слід зазначити, що в ній саморегулювання здійснюється за допомогою негативного зворотного зв'язку по каналу ентальпії. Проте дослідження процесів самовпорядкування відкритих термодинамічних систем [5, 27] дозволяють допустити можливість самовпорядкування системи і по каналу позитивного зворотного зв'язку, роль якого грає структура поверхневих шарів матеріалів, які модифікуються при терті.

Проведений аналіз різноманітних технологічних методів досягнення умов аномально низького тертя та зношування (управління тепловим потоком, програмне навантаження, модифікація поверхневого шару добавками у робочі рідин і т.д.) показав [89], що при всій значимості проведених досліджень для розвитку розділу трибології про аномально низьке тертя та зношування, перспектив практичної реалізації вони не мають. Однак у всіх перелічених методах для генерування хвильової складової сили

тертя, яка переводить ТС від умов нормального механохімічного тертя та зношування до умов АНТЗ, на одній з поверхонь ТС утворюється квазіжорстке тіло (тіло Гука), а на іншій поверхні – тіло за реологічною моделлю Шведова.

Структура підповерхневого шару відіграє важливу роль для досягнення умов АНТЗ. В даному випадку, класичний дислокаційний механізм пластичної деформації [28] замінюється на ротаційний [42, 45, 46]. Тоді відбувається перехід від мікропластичної деформації при терті до проковзування утворених ультрадисперсних фрагментів різного масштабу один відносно іншого (через точку біфуркації із зміною механізму дисипації накопиченої внутрішньої енергії) [4, 90, 91].

Іншим прикладом подібного саморегулювання трибосистем є зародження при пластичній деформації матеріалу ротаційних структур, і аномальне масоперенесення в поверхневих шарах [47]. Перехід від деформації ковзання до ротаційної деформації, аналогічний перехід від ламінарного перебігу рідини до турбулентного. Точкою біфуркації в цьому випадку є досягнення критичної густини дислокацій.

Ротаційна деформація полягає в розбитті матеріалу на взаємно розорієнтовані об'єми, подальше зменшення їх розміру і збільшення кутів їх розорієнтації. Ротаційна пластичність протікає за рахунок зародження і розповсюдження лінійних дефектів дислокацій. Останні при поворотах грають ту ж роль, що і дислокації при зсувах. З аналізу роботи [10] виходить, що великим і особливо циклічним деформаціям властиві ротаційні механізми пластичності. Існують і складніші механізми саморегулювання відкритих термодинамічних систем, які в трибології не знайшли практичного застосування. Одним з таких механізмів саморегуляції з позитивним зворотним зв'язком є механізм висхідної дифузії (ефект Горського) [92, 93]. Управляючим параметром, при якому проявляються напрями градієнта дифузії, при досягненні критичного значення між напруженнями розтягування і стискання на поверхні і в глибині деформованої пластини.

Вельми цікавим, як з теоретичної, так і з практичної сторони, є термодинамічний аналіз кінетичної взаємодії квазіпружних тіл, проведений А.І. Вейніком в роботі [9]. Виконуючи аналіз зворотних і незворотних процесів, він прийшов до висновку, що величина роботи сили тертя може розглядатися як критерій оцінки незворотності процесу («коефіцієнт незворотності»). Поняття незворотного процесу при терті є суто умовним, оскільки під незворотністю, з часів Клаузіуса, розуміють невблаганну однобічність протікання всіх реальних процесів. Насправді, в природі процеси з «мінус тертям» настільки ж широко поширені, як і процеси з «плюс тертям».

Розглядаючи механізми дисипації енергії в безопорному двигуні Толчина, автор роботи [9] прийшов до важливого висновку про можливість отримання некомпенсованої сили тільки за рахунок різниці в стані тіл, що співударяються. Розглянутий випадок недотримання закону збереження кількості руху може бути застосований для істотного зниження параметрів, що характеризують процеси зношування в трибосистемах.

Якщо розглянути локальні взаємодії мікронерівностей в контактній області трибосистеми за аналогією з прикладом, розглянутим в даній роботі, то ефект дисипації (кількість тепла дисипації  $Q_d$  при пружній взаємодії мікронерівностей за умов рівності взаємодіючих мас (мікронерівностей на поверхні) рухомого і нерухомого тіл, що труться, можна оцінити наступним виразом [9]:

$$Q_d = (1/2)\delta P_{m\delta} m = (1/2)m(v_c^2 - v^2), \quad (1.6)$$

де  $\delta P_{m\delta}$  – різниця кінетичних енергій;

$m$  – приєднана (від'єднана) маса;

$v_c$  – початкова швидкість;

$v$  – кінцева швидкість.

Розглянемо шляхи дисипації зовнішньої енергії, що підводиться до трибосистеми, при пружній взаємодії мікронерівностей. При пружному



ударі,  $Q_d$  залежить від ступеня досконалості удару. В умовах абсолютно пружного удару об нерухому перешкоду, швидкість тілу масою  $M$  до удару дорівнює його швидкості після удару.

Гальмування тіла масою  $M$  супроводжується виділенням тепла дисипації в кількості  $Q_d$ , а його розгін до колишньої швидкості – поглинанням тієї ж кількості тепла  $Q_d$ . В результаті ефект екранування (дисипації) перетворюється в нуль. Це виходить з (1.6), якщо підставити в неї сумарний потік кінетичної складової від загальної енергії тіла, то він буде рівним нулю. Окрім кінетичної складової в кожному тілі присутня субстанціональна і гравітаційна складові.

Разом з тим, наявність в (1.6) різниці квадратів швидкостей свідчить про надзвичайну важливість того факту, що при ударі початкова швидкість  $v_c$  більше кінцевої  $v$ , тобто активність кінетичної складової від загальної енергії тіла внаслідок ефекту екранування падає. Тоді теплота дисипації позитивна, вона виділяється («плюс тертя»).

Якщо початкова швидкість  $v_c$  менше кінцевої  $v$ , тобто активність кінетичної складової від загальної енергії тіла внаслідок ефекту екранування зростає, тоді теплота дисипації негативна, вона поглинається («мінус тертя»). Під «мінус тертям» необхідно розуміти зменшення сили тертя.

Енергетика поверхні не дозволяє розглядати шорсткість тільки з геометричних позицій. В теорії дисипації енергії відомий цікавий фізичний ефект створення чарунок Бенара [5]. Якщо до поверхні постійно підводиться енергія, то по досягненні її певного значення виявляється необхідною її більш інтенсивна віддача (розсіювання) в оточуюче середовище. Виникає біфуркація з подальшим самовпорядкуванням структури поверхні, при цьому мимовільно поверхня розбивається на окремі елементи, кожний з яких розсіює енергію більш інтенсивно, ніж до біфуркації [2].

Це дозволило авторам роботи [45] проаналізувати енергетичний обмін між поверхнями, що труться, шляхом представлення шорсткостей у вигляді енергетичних чарунок, кожна з яких віддає енергію в контртіло, і сприймає її

від контртіла. Даний енергетичний обмін оцінюється при усереднених по всій поверхні енергетичних потоках. У випадку, якщо розглядати ці потоки локально, то також досяжні умови «плюс тертя» і «мінус тертя» [9].

У разі кінетичного нанополя величина локальних напружень може бути представлена ефектом кавітації рідини, коли одночасно існують мікрообласті з високим і низьким тиском, підсумкова величина напружень нестационарна. Якщо реалізувати дані умови в трибосистемі, то сумарна зміна температури і сили тертя при зміні навантаження в контактній області також буде близька до нуля.

Таким чином, висунута в роботах [9, 94] гіпотеза квазіпружної взаємодії поверхонь, що супроводжується ефектами мінус-тертя містять в собі перспективи розвитку, так як дає можливість рішення основного прикладного питання – мінімізації тертя та зношування широкого кола трибосистем сучасних машин і механізмів.

Існування ефектів тертя і антитертя, дисипації і антидисипації примушує по-новому розглядати проблему безповоротності процесів в трибосистемах, і на цій основі розвивати фундаментальний підхід до тертя та зношування. Використовування цих ефектів, виходячи з роботи [41], дасть можливість, граючи на взаємному впливі різних ступенів свободи, не тільки знищувати кінетичне і механічне тертя, але і отримувати вигреш в кінетичній і механічній роботі за рахунок різних видів робіт. Самовпорядкування для такого роду трибосистем здійснюється за каналом надмірного виробництва ентропії [6]. Зміна приросту виробництва надмірної ентропії  $\delta^2 \dot{S}$  в часі для нерівноважних процесів описаних вище носить коливальний характер. Тобто знак визначатиме співвідношення процесів дисипації і антидисипації.

Фундаментальною величиною, яка визначає стійкість трибосистеми в умовах нерівноважного самовпорядкування, є виробництво надмірної ентропії [9].

Цей аналіз визначив необхідність розробки та обґрунтування механізму структурування поверхневого шару ТС для дисипації накопиченої енергії в

умовах аномально низького тертя та зношування, а також удосконалення структурно-енергетичної моделі перетворення енергії в умовах АНТЗ.

### **1.3 Аналіз фізичних основ хвильового тертя, шляхи досягнення аномально низького тертя та зношування**

Енергетичні дефекти формують хвильову складову сил тертя, яка при зміні зовнішніх умов веде себе аналогічно поведінці точкових дефектів – вакансій. Я. І. Френкелем відзначалася важлива особливість вакансій: «... для них не виконується закон збереження, вони можуть з'являтися і зникати при нагріванні і охолодженні кристалів, причому поверхня в якості стоку вакансій ефективніше, ніж в якості їхнього джерела, вона вакансії поглинає охочіше, ніж віддає їх всередину». Концентрація вакансій, що відповідає досягненню мінімуму вільної енергії [64] є результатом боротьби ентропійного виграшу і енергетичного програшу. Аналогічну картину ми спостерігаємо в процесі енергетичного обміну при зміні зовнішніх умов тертя трибосистем, що працюють в умовах аномально низького тертя та зношування.

Якщо при нормальному механохімічному зношуванні пластична деформація є причиною енергетичного накачування в підповерхневому шарі, то джерелами в даному випадку є лінійні (дислокації) і точкові дефекти. При аномальному низькому терті та зношуванні енергетичні дефекти – фонони – кванти хвиль розтягування-стиснення і зсуву (звукові хвилі) є основною причиною енергетичного знищення.

Таким чином, при нормальному механохімічному зношуванні трибосистема може бути представлена у вигляді теплового генератора з досить високим ККД (більше 95% зовнішньої енергії, що підводиться, перетворюється в тепло) [26, 95]. При аномальному низькому терті та зношуванні трибосистема представляє собою складну динамічну структуровану систему, що володіє «штучним інтелектом» і хвильова

складова в ній, по суті, представляє собою ентропійний насос, який перетворює незбалансовану частину із зовнішнього тертя у внутрішнє.

Оскільки об'ємна щільність енергії хвиль від елементарних осциляторів залежить від координат і часу, швидкість перенесення енергії хвилею дорівнює швидкості переміщення в просторі при максимальній об'ємній щільності енергії хвилі.

Принципово важливим є аналіз процесів саморегулювання при підтримці стаціонарного режиму аномально низького тертя та зношування. Для нормального механохімічного зношування саморегулювання здійснюється по каналу термодинамічної ентропії [96]:

$$\frac{dS_{Ti}}{dt} = -\frac{1}{T} \frac{dG}{dT}, \quad (1.7)$$

де  $G$  – термодинамічний потенціал Гіббса.

В цьому випадку умови стаціонарного зношування забезпечуються дотриманням рівності швидкості приросту і витрати вільної енергії. З позиції структурно-енергетичної теорії тертя та зношування [26] – це рівність швидкостей утворення і руйнування вторинних структур.

Загальною ознакою перетворень в трибосистемі є їх незворотний характер, що виражається у виробництві ентропії.

Баланс енергії при аномально низькому терті та зношуванні з позиції термодинамічного аналізу можна представити у формі, що відображає перше і друге начало термодинаміки:

$$\rho T dS = \rho dU - \sigma_{ik} d\varepsilon_{ik} - Y_j dZ_i A_k a_k,$$

де  $S$  і  $U$  – питоме значення ентропії і внутрішньої енергії матеріалу;

$\rho$  і  $T$  – густина і температура;

$\sigma_{ik}$  – тензор напружень;

$\varepsilon_{ik}$  – тензор деформацій (пружних и пластичних);

$Y_j$  і  $Z_i$  – локальні значення хімічного потенціалу і концентрації компонентів;

$A_k$  і  $a_k$  – узагальнені сили і координати.

Однією з умов самоорганізації нерівноважних дисипативних структур [25] є наявність флуктуацій  $\sigma_{ik}$  і  $\varepsilon_{ik}$ , а, отже, коефіцієнта тертя, безпосередньо пов'язаного з ними. З огляду на те, що робота з подолання сил тертя дорівнює зміні вільної енергії з протилежним знаком, можна записати ймовірність утворення флуктуацій  $W$ :

$$W = e^{-\frac{\Delta U}{RT}} = e^{-\frac{\Delta S}{R}} e^{-\frac{U}{RT}},$$

де  $\Delta U$  – зміна внутрішньої енергії;

$R$  – універсальна газова стала;

$\Delta S$  – зміна ентропії, що пов'язана з утворенням флуктуацій.

Таким чином, дотримання принципу Ле-Шательє в умовах аномально низького тертя та зношування зводиться до досягнення рівноважного стану шляхом регулювання числа механічних квантів на плямах фактичного контакту, тобто рівність імпульсів сили від молекулярно-механічної і хвильової складових сили тертя (1.5). У нашому випадку при аномально низькому терті та зношуванні доречно говорити не лише про виробництво ентропії і внутрішньої енергії матеріалу, але і про їх знищення по хвильовому каналу.

Виконаний аналіз обумовив необхідність визначення механізму формування хвильової складової сили тертя. Крім того, для досягнення умов АНТЗ необхідно розробити методичний підхід для розробки способу модифікації поверхневих шарів трибосистем для досягнення в них передумов для переведення в такий режим тертя.

## 1.4 Методи контролю аномально низького тертя та зношування

Проблеми, які потребують вирішення в ході досліджень на тертя та зношування істотно змінилися. В першу чергу це пов'язано зі значним підвищенням довговічності і надійності сучасних триботехнічних систем, що в ряді випадків вражає досягненнями. Добре відомо, що міжремонтний ресурс двигунів внутрішнього згорання виробництва концерну Фольксваген, ще тридцять років тому вимірювався десятками тисяч кілометрів пробігу, нині становить понад мільйон кілометрів пробігу легкового автомобіля [97]. Такий якісний стрибок у збільшенні ресурсу сучасних вузлів тертя став можливим завдяки новим можливостям в області синтезу, як нових матеріалів поверхонь фрикційного контакту, так і мастильного середовища.

В даний час тільки в Німеччині і тільки у виробництві автомобільних дизелів щорічно з'являється понад тисяча принципово нових багат шарових нанопокриттів і трибовідновлювальних сумішей, що дозволяють отримати аномально низькі значення інтенсивності зношування  $10^{-9} \dots 10^{-13}$  мг/км [97].

Однак методи оцінки зносостійкості і прогнозування ресурсу трибосистем практично не змінилися з кінця ХХ ст. і по своїй швидкості і точності значно стримують впровадження сучасних конструкційних і технологічних підходів [97-99]. В даний час в черзі на впровадження стоять сотні, якщо не тисячі сучасних матеріалів і мастильних матеріалів.

З огляду на вищезгадане виникає гостра необхідність принципово нової методики оцінки процесів контактної взаємодії у реальному часі в трибосистемах, що працюють в умовах нанозношування, а також розробки на її основі принципово нової методики модифікації матеріалів поверхонь фрикційного контакту та управління процесами їх самовпорядкування в процесі тертя та зношування [100, 101]. При цьому, на думку ряду вчених, одним з найбільш інформативних методів, що дає інформацію про процеси, які мають місце на поверхнях фрикційного контакту, є акустична емісія (АЕ) [102-107].

Аналіз робіт [60, 108-115] по використанню методу АЕ в трибодіагностиці дозволяє зробити висновок, що на даний час відсутня єдина методика виділення інформативних сигналів від процесів руйнування в трибосистемах. По-перше, це стосується інформативного діапазону частот реєстрованих сигналів і, по-друге, амплітудної дискримінації сигналів в цьому ж діапазоні для виключення прийому сигналів, які пов'язані з процесами поверхневого руйнування.

Перша спроба вирішення даної проблеми зроблена в роботі [116], де встановлено, що сигнали від процесів руйнування в залежності від механізму руйнування (в'язкого або крихкого) знаходяться відповідно в діапазонах частот 200...400 кГц і 400...700 кГц. У той час, як в більшості робіт інформативний діапазон робіт знаходився в діапазоні 30...300 кГц і саме в цьому діапазоні реєстрували максимальні значення АЕ. Це пов'язано з фрикційною взаємодією тіл, що труться на макрорівні, що підтверджується відсутністю кореляційного зв'язку між зносом трибосистеми і АЕ [109, 117].

Такий підхід до виділення сигналу АЕ від процесів поверхневого руйнування [116] дозволив досягти високого рівня кореляції між швидкістю зношування і інтегральною характеристикою АЕ (усередненої потужності), приведеної до певного рівня дискримінації [118-121].

Надалі на цій основі розроблений дослідний екземпляр малогабаритної інформаційно-діагностичної системи (ІДС) і багатофункціонального програмного забезпечення для вирішення завдань діагностики широкого кола об'єктів діагностування (рухомі сполучення агрегатів авіаційної техніки, двигунів внутрішнього згоряння і т.д.) [122-125].

До складу ІДС з попереднім перетворенням вимірюваної фізичної величини входять наступні основні блоки: вхідний пристрій, вимірювальний перетворювач (виконує обробку вимірюваного сигналу і формує аналогове значення потужності АЕ), аналого-цифровий перетворювач (АЦП), блок управління, блок індикації, процесор (або блок вторинної обробки сигналів), запам'ятовуючий пристрій або ЕОМ [126].

Спосіб реєстрації сигналів акустичної емісії при контролі конструкційних матеріалів дозволяє визначити та спрогнозувати швидкість процесів руйнування матеріалів з унікально високою чутливістю. Крім того, канал вимірювання та обробки акустичної емісії в більшій мірі захищений від перешкод, амплітуда яких менше кроку квантування ніж при діагностуванні безперервного сигналу. Використання запропонованого способу реєстрації акустичної емісії дозволить підвищити ефективність та точність контролю вимірювань та спростити проведення автоматичного і автоматизованого контролю.

Метод АЕ є непрямим методом і для того, щоб представити результати в одиницях вимірювання зносу необхідно встановити взаємозв'язок зносу і інтегральної характеристики АЕ у вигляді параметра питомої емісійної активності [1, 127], величина зносу в даній роботі визначалася ваговим методом, який має свою похибку.

Визначення цих похибок, які носять інструментальний характер, пов'язаних з використанням ІДС пов'язане з визначенням взаємозв'язку інформаційного параметру, реєстрованого в процесі діагностики рухомих сполучень, з величиною їх швидкості зношування [127].

Авторами роботи [128], встановлено, що похибки даного методу знаходяться в межах величини питомої емісійної активності випробовуваних матеріалів, в даній роботі вона знаходилася в межах 2...2,5% [127], яка пов'язана як з фізико-механічними властивостями матеріалів, так і з масштабом процесу зношування. Оскільки в цьому випадку випробуванням піддавалися матеріали, близькі по своїм фізико-механічним властивостям, масштаби зміни цих меж визначені не були. Подальші дослідження, проведені на матеріалах, які істотним чином відрізняються за своїми фізико-механічними властивостями, показали, що параметри питомої емісійної активності можуть відрізнятися на порядки [27].

Таким чином, найбільш прийнятним методом реєстрації АНТЗ є саме метод АЕ, який дозволяє фіксувати відсутність протікання процесів зношування в реальному масштабі часу. Проведений аналіз вимагає виконання порівняльних досліджень амплітудно-частотних характеристик при нормальному механохімічному зношуванні та при АНТЗ. Крім того, для



пояснення цього явища дуже важливим є дослідження механізму самоорганізації трибосистем, що працюють в таких умовах (АНТЗ).

### 1.5 Висновки по першому розділу та завдання досліджень

На основі аналізу механізмів дисипації зовнішньої енергії, що підводиться до трибосистеми, як факторів зниження тертя в різноманітних областях живої та неживої природи можна зробити наступні висновки.

1. В експериментальній і теоретичній трибології наявність хвильової складової тертя та зношування представляється як додатковий фактор дисипації енергії, що підводиться ззовні, який не має значного впливу. В той же час при певних термодинамічних умовах в трибосистемах формується достатньо значна хвильова складова сили тертя, яка істотно зменшує молекулярно-механічну складову.

2. Перехід від нормального механохімічного тертя та зношування до аномально низького тертя та зношування можливий після формування поверхневого шару з певними реологічними характеристиками: один з елементів ТС повинен бути квазіжорстким тілом, а другий повинен мати реологічну будову за моделлю Шведова (поверхневий шар – квазіпружний, підповерхневий шар – пружно-пластичний). В якості основного джерела перетворення енергії виступають енергетичні дефекти – фонони – кванти хвиль розтягування-стиснення і зсуву (звукові хвилі), які являються основною причиною енергетичного знищення.

Величина енергії в умовах аномально низького тертя та зношування оцінюється з точки зору квантової теорії величиною механічного кванту  $\hat{\epsilon}$  – мінімального числа атомів, здатних забезпечувати такий конфігураційний розподіл наноструктури, який має властивості зворотно сприймати і розсіювати (повертати) енергію зовнішнього механічного руху.

3. Саморегулювання трибосистем в умовах аномально низького тертя та зношування відбувається за каналом надлишкового виробництва структурної ентропії, яка визначає вид стійкості і може приймати як позитивні, так і негативні значення. В той же час в умовах нормального

механохімічного зношування саморегулювання відбувається за каналом термодинамічної ентропії, виробництво якої для досягненні рівноваги прагне до мінімуму.

Виходячи з вищесказаного, **метою цієї роботи** є підвищення зносостійкості (ресурсу) трибосистем в агрегатобудуванні переведенням їх в режим аномально низького тертя та зношування. Для досягнення цієї мети було визначено **наступні завдання:**

- розробити модель контактної взаємодії шорсткостей трибоелементів та механізмів накопичення та дисипації енергії у підповерхневому шарі, сформованому за певним реологічним принципом, та визначити механізм формування хвильової складової сили тертя;

- розробити та обґрунтувати механізм структурування поверхневого шару ТС для дисипації накопиченої енергії в умовах аномально низького тертя та зношування та удосконалити структурно-енергетичну модель перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування;

- розробити методичний підхід для розробки способу модифікації поверхневого шару досліджуваних трибосистем для досягнення в них передумов переведення в режим аномально низького тертя та зношування з метою подовження їх ресурсних показників;

- виконати комплекс триботехнічних досліджень та провести спільно з АТ «ФЕД» стендові випробування агрегатів з модифікованими парами тертя за розробленою технологією, розрахувати економічний ефект;

- виконати порівняльні дослідження амплітудно-частотних характеристик при нормальному механохімічному терті та зношуванні та при аномально низькому терті та зношуванні, обґрунтувати механізми самоорганізації трибосистем, що працюють в умовах аномально низького тертя та зношування.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИЧНІ РІШЕННЯ ПРИ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ АНОМАЛЬНО НИЗЬКОГО ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ

В даному розділі розглянуто методичний підхід, який буде використано при дослідженні досягнення аномально низького тертя та зношування в реальних ТС, які використовуються в сучасному агрегатобудуванні в Україні. Обґрунтований вибір матеріалів, які застосовуються при виконанні досліджень та методів дослідження.

Методичний підхід включає в себе системний аналіз теоретичних та експериментальних передумов досягнення аномально низького тертя та зношування в трибології з позиції сучасних фізичних теорій і квантомеханічного підходу до пояснення дисипації енергії при зовнішньому терті. Основним каналом дисипації при такому терті є хвильовий канал.

Виходячи з поставлених завдань та з метою їх вирішення було сформульовано загальну структуру використання теоретичних та експериментальних досліджень та їх взаємний зв'язок, представлений у вигляді діаграми Ісікави [129, 130] рис. 2.1.

Зазначена вище діаграма або причино-наслідкова схема дає змогу визначити основні параметри процесів, що впливають на досягнення поставленої мети дослідження – підвищення ресурсу трибосистем за рахунок переведення їх в режим аномально низького тертя та зношування.

Системний підхід, який покладено в основу причинно-наслідкової діаграми, дає можливість визначати та сформулювати основні етапи досліджень, що, в свою чергу, дозволяє вирішити поставлені завдання в даній дисертаційній роботі. Для вирішення кожної з поставлених задач необхідно встановити самий раціональний цикл досліджень, при якому етапи досліджень передбачають використання найкращих результатів на кожному етапі.

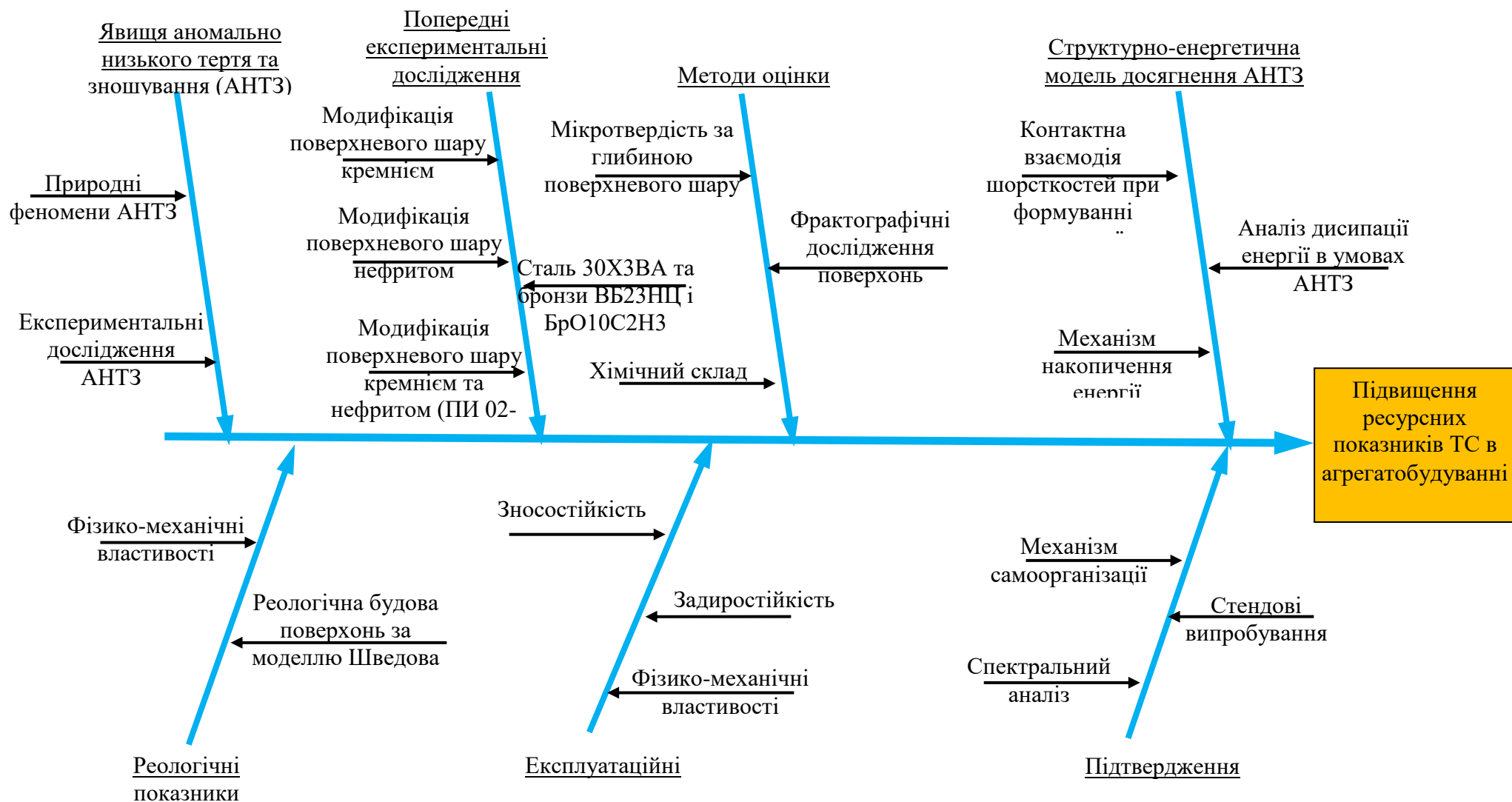


Рис. 2.1. Структурна схема теоретичних та експериментальних досліджень та їх взаємний зв'язок

При переході трибосистем з умов нормального механохімічного зношування до умов аномально низького тертя та зношування [53] механічна енергія, що підводиться, перетворюється поверхневими шарами у пружну енергію деформації, яка пов'язана з енергетичними дефектами (фононами) [131], які виводять енергію з трибосистеми при контактній взаємодії [9, 43].

Дані взаємодії відносяться до зворотної енергетичної форми. Вони контролюють процеси структурних перетворень і в своїй подальшій еволюції наближаються до необоротних форм. Зворотні енергетичні форми мають потенційні можливості для перетворення поглиненої внутрішньої енергії при зовнішньому терті в інші енергетичні види, а саме зниження накопиченої енергії в контактних шарах при припиненні енергетичної взаємодії.

Найбільш природним в поясненні квазіпружної взаємодії ефективного об'єму мікронерівностей є уявлення її як марківського процесу з двома дискретними станами, зокрема «Двосторонньої реакції», що пропонує можливість в системі тільки перехід  $1 \rightarrow 2$  (1-ий стан  $x_k$  – відновлення, 2-ий стан  $x_j$  – розпад), наприклад, деформації та відновлення початкової форми ефективного об'єму. Даний підхід використовувався для розробки структурно-енергетичної моделі перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування (розд. 3).

Аналіз умов досягнення АНТЗ (підрозд. 1.2) показав, що при цьому необхідно виконання певних реологічних умов: у трибосистемі один з елементів повинен бути квазіжорстким тілом, а другий повинен мати реологічну будову за моделлю Шведова (поверхневий шар – квазіпружний, підповерхневий шар – пружно-пластичний). Даний аналіз став основою для розробки способу модифікації поверхневих шарів ТС для досягнення в них передумов прояву АНТЗ за допомогою попередньої фінішної обробки поверхонь тертя трибосистеми «сталь-бронза», які широко застосовуються в агрегатобудуванні.

При роботі такої ТС в підповерхневому шарі акумулюється значна внутрішня енергія, яка генерує при контакті мікронерівностей пружні хвилі.

Для побудови такої ТС застосовували двохстадійне модифікування поверхневого шару бронзових трибоелементів. На першому етапі застосовували безабразивну фінішну обробку, яка використовується зараз при виготовленні елементів агрегатів аксіально-поршневих насосів та приводів генераторів літаків сімейства Ан-148/158/178 (базова ТС). На другому етапі фінішної обробки поверхні обробляли за технологією ПИ 02-17<sup>1</sup>.

Дослідження виконувались у два етапи. На першому обробка проводилась з фіксованими значеннями навантаження, швидкості ковзання та часу. Проводилася оцінка результатів випробувань на задиростійкість та зносостійкість з наступним дослідження по оптимізації цих досліджень.

На другому етапі проводились комплексні порівняльні дослідження зразків базових ТС та зразків, оброблених за технологією ПИ 02-17, при якій поверхневий шар насичується кремнієм.

## 2.1 Вибір матеріалів для досліджень

Трибологічні дослідження на тертя та зношування проводились на модернізованій серійній машині тертя 2070 СМТ-1 за схемою «кільце-кільце». Матеріалами для випробувань було обрано сталь 30Х3ВА та бронзи ВБ23НЦ і БрО10С2НЗ з огляду на їх широке використання при виготовленні агрегатів авіаційної техніки (аксіально-поршневих насосів та приводів генераторів літаків сімейству Ан-148/158/178). Причому випробування на зносостійкість проводилися з використанням бронзи ВБ23НЦ як такої, яка працює у менш навантажених умовах, а випробування на задиростійкість – з

---

<sup>1</sup> Експериментальні дослідження умов досягнення аномально низького тертя та зношування є дуже складною проблемою. Тому в її вирішенні приймали участь три організації: Національний авіаційний університет (НАУ), м. Київ, де проводилися мікроструктурні дослідження, Харківський національний університет Повітряних Сил імені І. Кожедуба (ХНУПС), де проводилися експериментальні дослідження на тертя та зношування, та ведуче агрегатобудівне підприємство України Акціонерне товариство «ФЕД» (АТ «ФЕД»), який виготовляв зразки та є одноосібним володарем технології двохстадійної фінішної обробки поверхонь тертя з використанням інструменту, виготовленого з мінералу групи амфіболів (нефрити). Дана технологія є предметом комерційної таємниці даного підприємства та (за згодою сторін – учасників наукових досліджень) не підлягає розголошенню. У процесі досліджень вона була позначена як «технологія ПИ 02-17», з якою вона входить до технологічної документації АТ «ФЕД».

використанням БрО10С2НЗ як такої, яка використовується для більш навантажених пар тертя.

Зразки для випробувань на тертя ковзання (плоскі пари) було виготовлено згідно технічній документації до машини тертя СМТ-1.

Додаткові технічні вимоги з виготовлення зразків наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Додаткові технічні вимоги з виготовлення зразків

| Матеріал            | Технічні вимоги   |
|---------------------|---|
| Бронза<br>ВБ23НЦ    | Шорсткість поверхні тертя $R_a = 0,04...0,08 \mu\text{m}$ .<br>Неплоскостність поверхні тертя не більше $0,001 \text{ мм}$ .<br>Поверхню тертя додатково обробити без використання вільного абразиву.     |
| Бронза<br>БрО10С2НЗ | Шорсткість поверхні тертя $R_a = 0,16...0,125 \mu\text{m}$ .<br>Неплоскостність поверхні тертя не більше $0,001 \text{ мм}$ .<br>Поверхню тертя додатково обробити без використання вільного абразиву.    |
| Сталь<br>30Х3ВА     | Поверхню тертя притерти алмазною пастою. Мікротріщини не допускаються. Метод контролю магнітопорошковий. Припали на поверхні не допускаються. Шорсткість поверхні тертя $R_a = 0,04...0,08 \mu\text{m}$ . |

Вихідний хімічний склад матеріалів трибосистеми представлений в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Хімічний склад матеріалів зразків з БрО10С2НЗ, ВБ23НЦ і 30Х3ВА

| Хімічний склад в % бронзи БрО10С2НЗ, % |           |         |        |           |         |         |         |          |           |        |          |
|--|-----------|---------|--------|-----------|---------|---------|---------|----------|-----------|--------|----------|
| Fe                                     | Si        | Cu      | Ni     | P         | Pb      | Zn      | Sb      | Sn       | Al        |        |          |
| до 0,2                                 | до 0,02   | 77,1-83 | 3-4    | до 0,05   | 2-3,25  | до 0,5  | до 0,3  | 9-11     | до 0,02   |        |          |
| Хімічний склад в % бронзи ВБ23НЦ, %    |           |         |        |           |         |         |         |          |           |        |          |
| Fe                                     | Si        | Cu      | Ni     | P         | Pb      | Zn      | Sb      | Sn       | Al        | As     | Bi       |
| до 0,3                                 | до 0,02   | 63,835  | 3-4    | 0,15-0,30 | 18-22   | 3-4     | 3-4     | до 0,5   | до 0,02   | до 0,1 | до 0,025 |
| Хімічний склад в % сталі 30Х3ВА, %     |           |         |        |           |         |         |         |          |           |        |          |
| Fe                                     | Si        | Cu      | Ni     | P         | Cr      | Mn      | W       | S        | C         |        |          |
| 93,5                                   | 0,17-0,37 | до 0,25 | до 0,5 | до 0,025  | 2,8-3,2 | 0,3-0,6 | 0,8-1,2 | до 0,025 | 0,27-0,35 |        |          |

Кожний зразок досліджувався приладом для вимірювання параметрів мікрогеометрії JENOPTIK (АТ «ФЕД») та виконувалися комплексні дослідження мікрорельєфу на мікроскопі ЛСДФПМ (НАУ, м. Київ). Приклад вимірювальних протоколів зразків наведено в додатку А.

Крім того, вимірювалися показники шорсткості, твердості та мікротвердості поверхонь (табл. 2.3) та за глибиною поверхневого шару. Вимірювання на бронзових зразках проводили після безабразивної фінішної обробки, а на сталі – після притирки алмазною пастою. Дослідження проводились у лабораторії АТ «ФЕД».

Таблиця 2.3

Середні значення шорсткості, твердості та мікротвердості поверхонь по п'яти зразкам кожного з матеріалів

| Матеріали зразків | Ra, μm | HRC  | Hμ (МПа) |
|-------------------|--------|------|----------|
| сталь 30Х3ВА      | 0,04   | 65,2 | 8420     |
| БрО10С2Н3         | 0,12   | 14,8 | 2170     |
| ВБ23НЦ            | 0,16   | 6    | 1660     |

## 2.2 Обладнання для випробувань на тертя та зношування

Трибологічні дослідження на тертя та зношування проводились на модернізованій серійній машині тертя 2070 СМТ-1 (рис. 2.2), за схемою «кільце-кільце» [132]. Методика проведення випробувань стандартизована [133]. Форма та розміри трибоелементів для модельних триботехнічних випробувань, які наведені на рис. 2.3, відповідали вимогам ДСТУ 30480-97.

До проведення випробувань трибоелементи промивались бензином «Калоша» ГОСТ 2603-71, висушувалися при температурі 70°C, зважувалися на аналітичних терезах ВЛР-200 с точністю до 10<sup>-4</sup> грамма.

В процесі експериментів, відповідно до вимог ДСТУ 30480-97, реєстрували:



– момент тертя (перераховували в коефіцієнт тертя), по величині якого судили про механічні втрати в трибосистемі;

– температуру елементів безперервно реєстрували в реальному масштабі часу випробувань безпосередньо в зоні тертя, з використанням пірометра.



Рис. 2.2. Модернізована стандартна машина тертя 2070 СМТ-1



Рис. 2.3. Пара трибоелементів для лабораторних випробувань

Додатково проводили вимірювання швидкості зношування методом акустичної емісії [27, 104, 105]. Даний метод дозволяє реєструвати швидкість зношування за час 20 мс у відносних одиницях при зносі. Таким чином, знос реєструється з моменту відділення перших часток зносу з поверхні тертя в реальному масштабі часу за весь період випробування.

### **2.2.1 Випробування по визначенню коефіцієнту тертя і на задиристійкість**

Режим тертя – умови граничного мащення (витрата робочої рідини – 2 л/год). Робоча рідина – авіаційне паливо ТС-1 з класом чистоти 6...8 по ГОСТ 17216–71 «Промышленная чистота. Классы чистоты жидкостей». Коефіцієнт взаємного перекриття зразків 0,85. Нерухомий трибоелемент – бронза (пряма пара). Умови тертя:

- швидкість обертання приводного вала  $500 \text{ хв}^{-1}$ ;
- температура навколишньої середовища  $+18^{\circ}\text{C}$ ;
- поетапне збільшення навантаження до досягнення задиру або до максимальної можливої величини;
- час витримки на кожному ступені навантаження 15...20 хв.

Вимірювані параметри:

- момент тертя (повинен бути перерахований в коефіцієнт тертя);
- середньоповерхнева температура в зоні контакту;
- швидкість зношування (по можливості).

Випробуванням піддаються по п'ять пар зразків.

Робоча рідина для мащення подається через внутрішні отвори зразків.

### **2.2.2 Випробування на зношування**

Випробування на зношування виконуються на парах зразків, випробуваних по п. 2.2.1. Режим тертя - умови граничного мащення (витрата робочої рідини – 2 л/год). Робоча рідина - авіаційне паливо ТС-1 з класом чистоти (6...8) по ГОСТ 17216–71. Коефіцієнт взаємного перекриття зразків 0,85. Нерухомий трибоелемент – бронза (пряма пара). Умови тертя:

- швидкість обертання приводного вала  $500 \text{ хв}^{-1}$ ;

- навантаження визначається, виходячи з результатів випробувань по п. 2.2.1;

- час випробувань – 480 хв.

Випробуванням піддаються по п'ять пар зразків.

Робоча рідина для змащення подається через внутрішні отвори зразків.

Вимірювані параметри:

- до випробувань зважування зразків і фрактографія поверхонь тертя;

- в процесі випробувань:

а) момент тертя (повинен бути перерахований в коефіцієнт тертя);

б) середньоповерхнева температура в зоні контакту;

в) швидкість зношування (по можливості);

- після випробувань зважування зразків і фрактографія поверхонь тертя.

У актах відображалися мікрофотографій зразків до та після випробувань, рівень акустичної емісії трибосистеми під час випробувань, характер зміни коефіцієнту тертя та температури в процесі випробувань, знос трибоелементів та сумарний знос ТС за 480 хвилин випробувань, визначений ваговим методом. Ваговий знос вимірювався лабораторними терезами ВЛР-200 з точністю до  $10^{-4}$  грама. Крім того, наведено висновки з аналізом результатів випробувань на задиростійкість та зносостійкість.

## **2.3 Фізичні методи досліджень**

### **2.3.1 Вимірювання макро- і мікротвердості**

Вимірювання твердості трибоелементів проводили за методом Роквелла, а після механічної обробки – за методом Віккерса. За число твердості приймалося середнє арифметичне значення результатів п'яти вимірів.

Вимірювання твердості по Роквеллу здійснювали на автоматичному стаціонарному твердомірі UIT HR-300 відповідно до ГОСТ 9013-59 (ASTM E-18) і ISO 6508.2. Індентором був стандартний алмазний конус з кутом при

вершині  $120^\circ$ . Діапазон навантажень – 98,07...1471 Н, діапазон значень твердості – 20...70 HRC. Результати випробувань статистично оброблялися за допомогою комп'ютерної програми.

Вимірювання твердості за Віккерсом проводили на стаціонарному твердомірі UIT HV-10/30/50 відповідно до ГОСТ 2999-75. У приладі застосований навантажувальний механізм зі зниженим тертям, що значно підвищує точність випробувань. Аналіз отриманих відбитків проводився за допомогою встановленого на приладі окуляр-мікрометра зі збільшенням 20 і 10 крат. Для вимірювання відбитка до його вершин підводили маркери і вимірювали діагоналі. Значення твердості розраховувалося автоматично і виводилося на екран твердоміра. Діапазон використовуваних навантажень становив 9,8...49,03 Н, час витримки під навантаженням – 10 с.

Мікротвердість вимірювали за допомогою твердоміра ПМТ-3 відповідно до ГОСТ 9450-60. Прилад призначений для визначення мікротвердості при малих навантаженнях (до 19,6 Н) з використанням стандартної алмазної піраміди Віккерса з кутом при вершині  $136^\circ$ . Діапазон навантажень – 0,098...19,61 Н, час витримки – 10...15 с, діапазон вимірювань мікротвердості – 5...2500 МПа. У приладі здійснений повністю автоматизований процес вимірювань, для ініціалізації якого досить встановити величину зусилля і вибрати необхідне місце на поверхні трибоелемента з використанням вбудованого мікроскопа (загальне збільшення  $\times 100$  і  $\times 400$ ). В твердомірі застосований навантажувальний механізм зі зниженим тертям, що забезпечує сталість прикладеного зусилля і підвищення точності випробувань.

Виконувалась скісна (непряма) оцінка мікротвердості по глибині робочого шару зразків після випробувань. Для цього проводили вимірювання мікротвердості при навантаженнях 0,5; 1 та 2 Н. Перерахунок діагоналі по глибині відбитку виконано по формулі  $h=d/7$ , де  $h$  – глибина відбитку,  $d$  – діагональ відбитку після його розвантаження [134].

Мікротвердість визначали як середнє по 10 вимірюванням<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Дослідження виконувалися в лабораторії трибології ДП «Завод ім. В.О.Малишева».

### 2.3.2 Вимірювання шорсткості і профілю поверхні

Експлуатаційні властивості виробів сильно залежать від геометричних характеристик поверхні (відхилення форми, хвилястість і шорсткість поверхні). Шорсткість впливає на коефіцієнт тертя, зносостійкість, статичну, тривалу і утомну міцність, корозійну стійкість, міцність з'єднань з натягом [135, 136]. У зв'язку з цим необхідно ретельно регламентувати основні характеристики шорсткості. Тому в даній роботі приділено увагу вивченню змін геометричних параметрів поверхні після різних обробок.

Шорсткість і профіль поверхні зразків перед випробуваннями, а також при оптимізації режимів фінішної обробки визначали за допомогою профілометра-профілографа TR200 фірми JENOPTIK, відповідного стандартам ISO 4287-1997. Прилад має вбудований стандартний RS232 порт для безпосереднього зв'язку з комп'ютером, що дає можливість систематизувати отримані дані.

Чутливість датчика профілометра становить 0,002 мкм. Це дозволяє описувати рельєф нерівностей висотою від 0,005 мкм. Діапазон вимірювань - 0,01...160 мкм, радіус опори – 125 мм, радіус вістря алмазної голки – 5 мкм. Шорсткість оцінювали середнім арифметичним абсолютних значень відхилень  $Ra$ . Похибка вимірювання  $Ra$  не перевищувала 10%, відтворюваність становила  $\leq 6\%$ . Вимірювання проводили при кімнатній температурі і відносній вологості повітря не більше 70 %.

Дослідження проводились у лабораторії АТ «ФЕД».

При проведенні порівняльних випробувань базових зразків (штатна фінішна обробка) та зразків з фінішною обробкою за технологією ПИ 02-17 проводили дослідження на мікроскопі ЛСДФПМ центру нанотехнологій Національного авіаційного університету, м. Київ. Дані дослідження дозволяли оцінювати фрактографічні особливості поверхонь (за мікрофотографіями та по 3D-зображенням), загальні параметри шорсткості (із застосуванням статистичної оцінки (довірчі межі інтервалу значень

параметру при  $p=0,97$ ). Результати вимірювань відображалися у таблицях, а також на діаграмах  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$ .

### **2.3.3 Використання електронної мікроскопії та мікрорентгеноспектрального аналізу**

*Електронна мікроскопія.* Мікроструктура при великих збільшеннях і з високою глибиною різкості вивчалася на растровому електронному мікроскопі PEM-106 виробництва ОАО SELMI з приставкою для мікрорентгеноспектрального аналізу. Прилад оснащений комп'ютерним керуванням, що значно спрощує процес дослідження і дає можливість зберігати отримані зображення безпосередньо в цифровому вигляді. Мікроскоп дозволяє вивчати структури зі збільшенням від 15 до 300 000 разів. Розподільча здатність в режимі високого вакууму становить 4 нм, в режимі низького вакууму – 6 нм. Максимальний розмір об'єкта – 55 мм.

В растровому електронному мікроскопі зображення зазвичай формується за допомогою вторинних і відбитих електронів, зона виходу яких обмежена малою областю навколо місця пучка, тому досягається висока роздільна здатність. Це дозволяє досліджувати найдрібніші деталі рельєфу поверхні, а також забезпечує більшу різкість в поєднанні з наочністю зображення, що дає можливість досліджувати об'єкти з сильно розвиненою поверхнею [137].

Досліджувані об'єкти попередньо протруюють в 4 % розчині азотної кислоти, причому тривалість травлення була збільшена, в порівнянні з підготовкою трибоелементів для оптичної мікроскопії, з метою отримання більш глибокого рельєфу. Зображення вивчали у вторинних (в режимі високого вакууму, прискорюючи напруга 30 кВ) і відображених (в режимі низького вакууму, прискорюючи напруга 20 кВ) електронах.

*Мікрорентгеноспектральний аналіз.* З метою отримання розподілу компонентів і їх ідентифікації в поверхневих шарах трибоелементів,

оброблених потоком низькоенергетичної плазми, використовували мікрорентгеноспектральний аналіз (МРА). Для цього застосовували енергодисперсійну спектральну приставку ЭДС-1 до мікроскопа РЭМ-106. Характерною особливістю МРА є локальність – максимальна область збудження емісійного рентгенівського випромінювання становить 1 мкм. Прилад вимірює дві характеристики: довжину хвилі і інтенсивність рентгенівського випромінювання. Перша характеризує тип елемента, друга, віднесена до інтенсивності еталона, – його концентрацію в досліджуваному мікрооб'ємі матеріалу [137]. МРА дозволяє проводити як якісний, так і кількісний аналіз елементів при розмірах фаз  $\sim 5$  мкм і об'ємі  $\sim 0,2$  мкм<sup>3</sup>. Розмір фокальної плями на аноді (діаметр електронного зонда) дорівнює 0,1...3,0 мкм. Відносна чутливість локального аналізу важких елементів складає 0,2...0,8 %, а легких – 1...5 %.

#### 2.3.4 Вимірювання пружних коливань в трибосистемі

Вимірювання пружних коливань проводили в діапазоні частот від 0 до 10 кГц широкосмуговим датчиком акселерометром фірми Brüel & Kjær типу 4335 (похибка вимірювання у всьому діапазоні вимірювань не більше 3,5 %), (рис. 2.4).



Рис. 2.4 Датчик акселерометр Brüel & Kjær типу 4335

Вимірювання амплітудно-частотних характеристик для досліджуваних трибосистем проводили осцилографом Rigol DS1052E з подальшим збереженням даних в ПЕОМ (рис. 2.5).

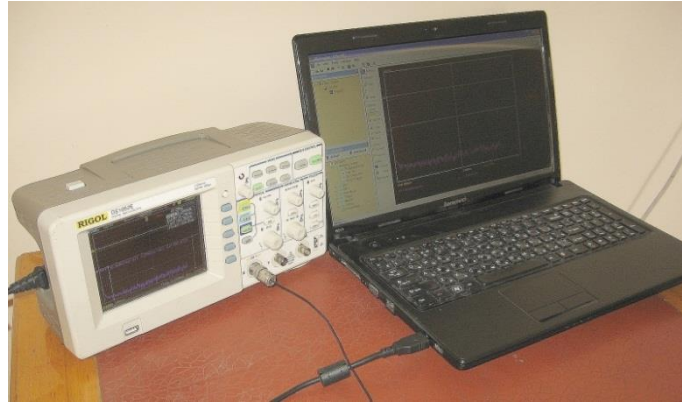


Рис. 2.5. Вимірювальний комплекс амплітудно-частотних характеристик трибосистем, що досліджуються (осцилограф Rigol DS1052E та ПЕОМ)

### 2.3.5 Статистична обробка результатів досліджень

Отримані результати випробувань обробляли методами математичної статистики з використанням « $t_c$ » – критерія Стьюдента. При цьому отримані дані розглядали як випадкову вибірку з деякої генеральної сукупності. Обсяг вибірки  $\tilde{n}$  розраховували згідно з методикою [138] за формулою:

$$\tilde{n} = (t_c^2 \cdot \Omega^2 + \zeta^2) / \zeta^2,$$

де  $t_c$  – аргумент функції Стьюдента;

$\Omega$  – середнє квадратичне відхилення;

$\zeta$  – точність, що задається, виражена в абсолютних одиницях величини, що вимірюється.

Середнє квадратичне відхилення  $\Omega$  розраховували за результатами вимірювань. Коефіцієнт  $t_c$  визначали, користуючись функцією Стьюдента з урахуванням того, що довірча ймовірність  $p = 95\%$ . Точність  $\zeta$  задавали таку, щоб її числове значення не перевищувало  $5\%$  середнього значення шуканої величини (за результатами попередніх досліджень для кожного параметра).

Таким чином, задавши певною точністю, визначали величину



математичного очікування, довірчі інтервали, розмах для основних вибірок кожного параметра.

### 2.3.6 Акустико-емісійний метод контролю зношування

Однією з найважливіших операцій, від якої істотно залежить точність і чутливість інформаційно-діагностичної системи (ІДС), є перетворення аналогового сигналу усередненої потужності АЕ в цифровий сигнал. АЦП передбачає виконання трьох операцій: дискретизацію, квантування і цифрове кодування вимірюваної величини і функціонально пов'язаної з нею інформацією. У ІДС використаний АЦП прямого перетворення, побудований за розімкнутою структурною схемою, яка не має зворотного зв'язку з виходу на вхід. У той же час окремі елементи структурної схеми ІДС охоплені зворотним зв'язком. Типова структурна схема наведена на рис. 2.6.

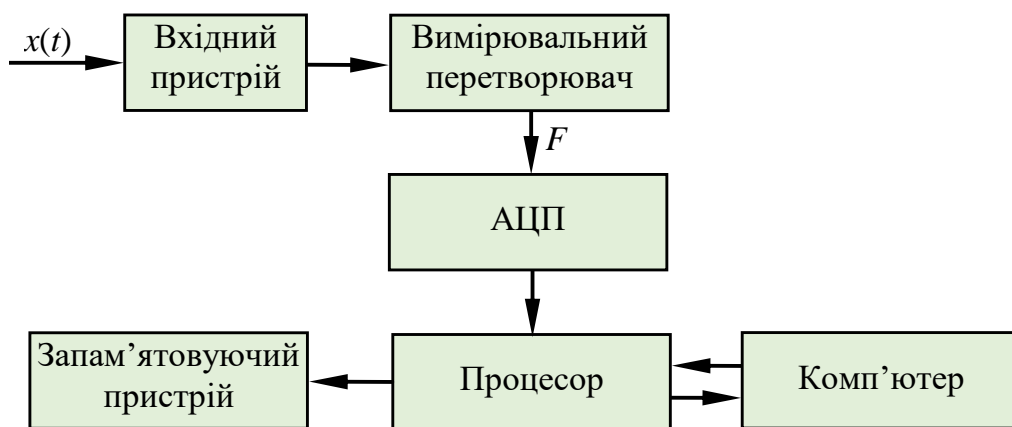


Рис. 2.6. Структурна схема одноканальної ІДС прямої дії

Вхідний пристрій для зменшення перешкод має високий вхідний опір. Лінійне перетворення вхідного сигналу  $x(t)$  з аналогового в цифровий, з урахуванням автоматичного вибору межі вимірювань, відбувається в АЦП відповідного рівня розрядності. Від рівня розрядності залежить номінальна ціна одиниці найменшого розряду, яка пов'язана з дозволом (чутливістю) ІДС, яка залишається постійною для кожної межі вимірювань.

Залежно від розділової здатності і точності в відліковому пристрої ІДС передбачено певне число десяткових розрядів відліку виміру параметру, що діагностується (усередненої спектральної потужності), від якої також залежить чутливість ІДС.

Перевагою обраної схеми ІДС є можливість функціонального перетворення вимірюваної фізичної величини  $x$  в іншу фізичну величину  $F$ , більш придатну для подальшого аналого-цифрового перетворення з урахуванням кореляційної зв'язку з процесами руйнування поверхневих шарів.

Для посилення і перетворення сигналів АЕ використані операційні підсилювачі. Ведучі позиції в цій області займає фірма Analog Devices. Широкий діапазон частот, малий рівень шумів, малі габарити, діапазон Rail-to-Rail по входу і виходу, мала споживана потужність визначили використання операційного підсилювача AD8032. Типові схемні рішення для реалізації функцій блоків на операційному підсилювачі пропонуються фірмою-виробником. АЦП із заданими характеристиками, реалізований на MCP3304 з послідовним інтерфейсом. В схемі використовується мікроконтролер з ядром AVR фірми Atmel – Attiny 2313, який має в своєму складі універсальний асинхронний приймач-передавач для зв'язку з послідовним каналом, а також інтерфейс SPI для управління АЦП.

Технічні характеристики ІДС наведено у табл. 2.4. Зовнішній вигляд блок реєстрації і обробки сигналів АЕ в ІДС представлений на рис. 2.7.

Дане конструктивне рішення блоку реєстрації і обробки ІДС дозволяє накопичувати інформацію за весь час експлуатації об'єкту контролю з урахуванням виконання ремонтно-профілактичних робіт на ньому. Тобто перейти на експлуатацію контрольованих об'єктів за технічним станом.

ІДС дозволяє, реєструвати величину зносу починаючи з відділенням першої частинки з поверхні тертя, це по суті нанотехнологія у вимірюванні швидкості зношування. При реєстрації пошкоджень рівень сигналу зростає

на порядки. Таким чином, використання ІДС заданої структурної схеми дозволяє виявити дефекти на ранній стадії їх розвитку [139].

Таблиця 2.4

## Технічні характеристики та комплектність ІДС

| Показники  | Характеристика |
|--|----------------|
| Вхідний опір .....   | 1 МОм          |
| Чутливість входу .....   | 10 мкВ         |
| Частотний діапазон .....   | 200...2000 кГц |
| Коефіцієнт посилення .....   | 65...90 дБ     |
| Динамічний діапазон .....  | 40...65 дБ     |
| Крок дискретизації .....   | 20 мс          |
| Розмір відносної похибки .....   | 0,7%           |
| Комплектність:   |                |
| 1. Датчик типу ДИСМ-1 (широкосмуговий п'єзоелектричний перетворювач) з робочою смугою частот 200...2000 кГц, вхідний опір – $2,3 \cdot 10^{-11}$ Ом, нерівномірність АЧХ – 8,5 дБ, ємність – 1,45 нФ, чутливість – 125 мВ/м·с <sup>2</sup> . |                |
| 2. Блок реєстрації обробки сигналів акустичної емісії  |                |

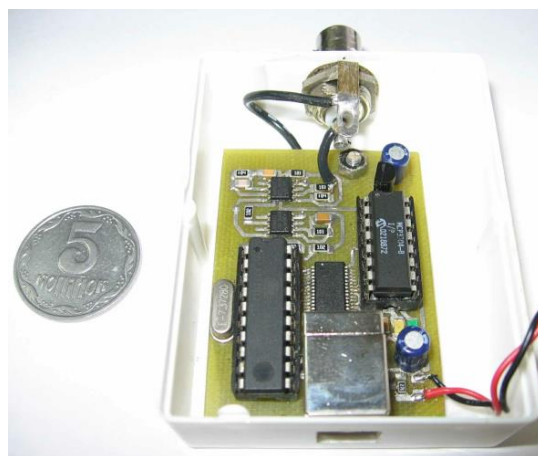


Рис. 2.7. Блок реєстрації і обробки сигналів АЕ в ІДС

Перетворення аналогового сигналу в цифровий сигнал у використаному ІДС АЦП має ряд особливостей. Механізм квантування сигналів можна представити наступною схемою, рис. 2.8. Реєстрація вимірюваних сигналів АЕ оцінюється кодом АЦП (у відносних одиницях  $n$ ), який є рівнем усередненої потужності АЕ. Час усереднювання визначається частотою зрізу фільтру низьких частот.

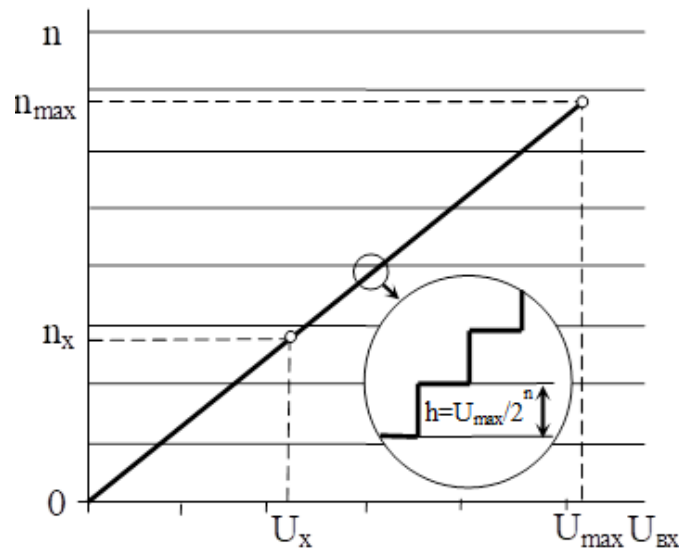


Рис. 2.8. Схема перетворення аналогового сигналу усередненої спектральної потужності в цифровий сигнал

Цифрове кодування в АЦП здійснюється двійковим кодом. Двійковий код використаний, оскільки він близький до оптимального за часом обчислювальних операцій [140]. Критерієм оптимальності двійкового коду є мінімізація утворення системи числення  $h$  на кількість розрядів  $l$ , тобто при даній системі кодування  $hl$  прагне до мінімуму.

Як метод реєстрації нанозношування в роботах [118, 119, 141, 142] запропоновано використовувати метод АЕ. Нанозношування в роботі [27] класифікується як знос, який не може бути зареєстрований традиційними методами реєстрації (ваговий, лінійний) за час 8...10 год випробувань на машині тертя при максимальних експлуатаційних навантаженнях для трибосистем певного функціонального призначення. Зокрема для трибосистем в агрегатобудуванні ця величина навантаження знаходиться в межах 28...32 МПа, а з урахуванням коефіцієнта взаємного перекриття зовнішнє питоме енергетичне навантаження  $NV=3,785 \text{ Вт/мм}^2$ . Розроблена методологія реєстрації швидкості зношування заснована на взаємозв'язку усередненої потужності АЕ і швидкості зношування ТС, яка може бути заміряна як в одиницях потужності, так і величиною інформації про знос [142, 143].

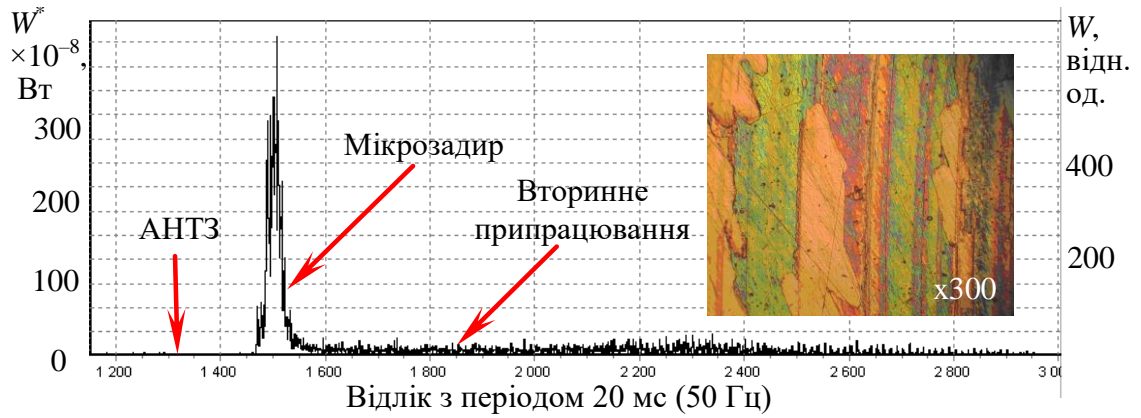
Результати математичного моделювання при оцінці швидкості

зношування методом акустичної емісії дозволили провести оцінку чутливості цього методу при реєстрації зносу в трибосполученнях, що аналізуються. Вона знаходиться в межах діапазону зміни питомої емісійної активності  $\xi_{AE} = 1,2 \cdot 10^{-11} \dots 1,45 \cdot 10^{-11}$  г/відн. од. При зростанні міцності матеріалів питома емісійна активність також зростає. При цьому похибка прогнозування забезпечується на рівні не більше 2...2,5% за умови нормального механохімічного зносу. В умовах переходу до пошкоджуваності, похибки різко зростають і застосування методу АЕ в цьому випадку обмежується діагностичними ознаками (рис. 2.9). На цих графіках  $W^*$  є величина потужності сигналу акустичної емісії у Ватах, а  $W$  – у відносних одиницях, між якими є пряма лінійна залежність [1, 27, 60].

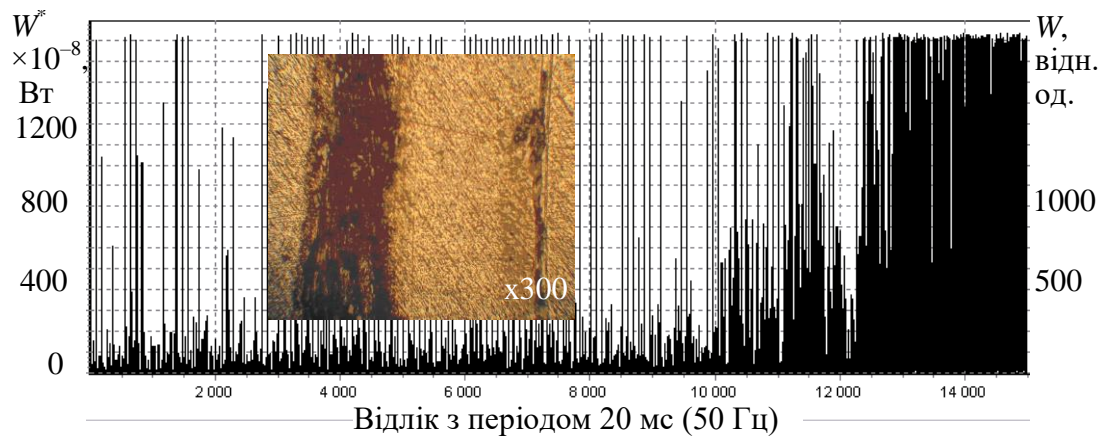
У разі наближення до межі нанозношування і допустимого зносу точність прогнозування трохи знижується. При роботі у відповідних областях запропонована методика прогнозування вагового зносу по енергетичних параметрах акустичної емісії, що забезпечує точність прогнозування на рівні 4...5%.

Розроблена методика обробки акустико-емісійного випромінювання і визначення швидкості зношування, дозволяє реєструвати швидкість зношування, починаючи з відділенням першої частинки зносу в трибосистемі в одиницях вимірювання потужності АЕ. Методика дає можливість визначити загальні закономірності механізмів зношування різних трибосистем, розробити критерії оцінки їх технічного стану, і прогнозування ресурсу машин і механізмів. Таким чином, метод акустичної емісії можна віднести до нанотехнологій у вимірюванні зношування. І цей метод може бути використаний, як для оцінки, так, і для класифікації нанозношування.

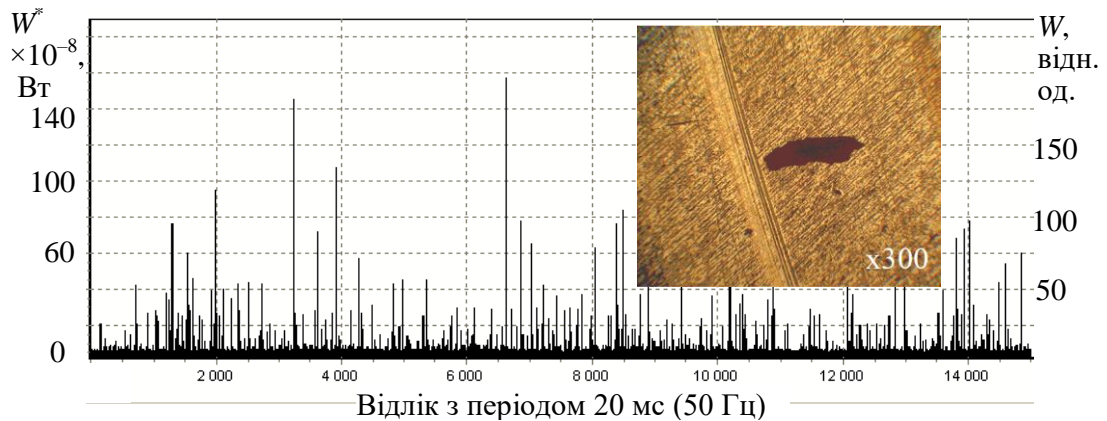
Спеціальне програмно-математичне забезпечення для персонального комп'ютера створювалося на основі комплексу алгоритмів у вибраному середовищі програмування під управлінням Windows з використанням функцій WinAPI.



а



б



в

Рис. 2.9. Діаграма зміни швидкості зношування в одиницях вимірювання потужності АЕ за наявності мікропошкоджуваності:  
 а – мікрозадир; б – перехід до задиру; в – пітингове руйнування (глибина пітингових язв складає 0,05...0,052 мм)

## 2.4 Планування експерименту та обробка результатів

При дослідженні процесів тертя та зношування в трибосистемі в процесі оптимізації режимів фінішної обробки необхідною умовою експерименту є встановлення зв'язку між величинами лінійної швидкості ковзання, прикладеного навантаження та часу припрацювання, з одного боку, і вхідними параметрами – з іншого боку – утворення відповідної шорсткості поверхні трибоелементу.

З метою зменшення трудомісткості дослідження при вивченні таких процесів застосовуються методи математичної статистики та планування експерименту. За допомогою математичних методів оптимального планування експерименту можна отримати регресивні рівняння, які пов'язують функції відгуку з вхідними факторами [144].

Матриця планування повного факторного експерименту для трьох факторів представлена в таблиці 2.5. У цьому випадку число можливих комбінацій з трьох чинників на двох рівнях дорівнює  $n^k = 2^3 = 8$  [144, 145].

Таблиця 2.5

Повний факторний експеримент для трьох факторів

| Дослід № | Фактори у натуральному масштабі |                    |                    | Фактори у безрозмірній системі координат |                |                | Вихідний параметр у |
|----------|---------------------------------|--------------------|--------------------|--|----------------|----------------|---------------------|
|          | Z <sub>1</sub>                  | Z <sub>2</sub>     | Z <sub>3</sub>     | x <sub>1</sub>                           | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> |                     |
| 1        | Z <sub>1 max</sub>              | Z <sub>2 min</sub> | Z <sub>3 min</sub> | -1                                       | -1             | -1             | y <sub>1</sub>      |
| 2        | Z <sub>1 min</sub>              | Z <sub>2 min</sub> | Z <sub>3 min</sub> | +1                                       | -1             | -1             | y <sub>2</sub>      |
| 3        | Z <sub>1 max</sub>              | Z <sub>2 max</sub> | Z <sub>3 min</sub> | -1                                       | +1             | -1             | y <sub>3</sub>      |
| 4        | Z <sub>1 min</sub>              | Z <sub>2 max</sub> | Z <sub>3 min</sub> | +1                                       | +1             | -1             | y <sub>4</sub>      |
| 5        | Z <sub>1 max</sub>              | Z <sub>2 min</sub> | Z <sub>3 max</sub> | -1                                       | -1             | +1             | y <sub>5</sub>      |
| 6        | Z <sub>1 min</sub>              | Z <sub>2 min</sub> | Z <sub>3 max</sub> | +1                                       | -1             | +1             | y <sub>6</sub>      |
| 7        | Z <sub>1 max</sub>              | Z <sub>2 max</sub> | Z <sub>3 max</sub> | -1                                       | +1             | +1             | y <sub>7</sub>      |
| 8        | Z <sub>1 min</sub>              | Z <sub>2 max</sub> | Z <sub>3 max</sub> | +1                                       | +1             | +1             | y <sub>8</sub>      |

Для отримання матриці планування з фіктивною змінною, що представлена в табл. 2.5, вводиться стовпчик з фіктивною змінною  $x_0 = 1$  [145] (табл. 2.6).

Повний факторний експеримент для трьох факторів з фіктивною змінною

| Дослід № | Фактори у безрозмірній системі координат |       |       |       | Вихідний параметр |
|----------|--|-------|-------|-------|-------------------|
|          | $x_1$                                    | $x_2$ | $x_3$ | $x_0$ | $y$               |
| 1        | -1                                       | -1    | -1    | +1    | $y_1$             |
| 2        | +1                                       | -1    | -1    | +1    | $y_2$             |
| 3        | -1                                       | +1    | -1    | +1    | $y_3$             |
| 4        | +1                                       | +1    | -1    | +1    | $y_4$             |
| 5        | -1                                       | -1    | +1    | +1    | $y_5$             |
| 6        | +1                                       | -1    | +1    | +1    | $y_6$             |
| 7        | -1                                       | +1    | +1    | +1    | $y_7$             |
| 8        | +1                                       | +1    | +1    | +1    | $y_8$             |

Коефіцієнти рівняння регресії визначаються за методом найменших квадратів, тому необхідно відзначити, що експериментальні дані повинні бути однорідними і нормально розподіленими. Будь-який коефіцієнт рівняння регресії  $b_j$  визначається скалярним множенням стовпчика  $y$  на відповідний стовпчик  $x_j$ , віднесений до числа дослідів в матриці планування  $N$  [145]:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij} y_i. \quad (2.1)$$

Для визначення коефіцієнтів взаємодії необхідно розширити таблицю 2.6 додатковими стовпцями, які враховують ефект подвійної і потрійної взаємодії факторів (табл. 2.7).

Ефекти взаємодії визначаються аналогічно лінійним ефектам. Так для повнофакторного експерименту  $2^3$  коефіцієнти визначаються наступним чином [145]:

$$\begin{aligned} b_{12} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_1 x_2)_i y_i, & b_{13} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_1 x_3)_i y_i, \\ b_{23} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_2 x_3)_i y_i, & b_{123} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_1 x_2 x_3)_i y_i. \end{aligned} \quad (2.2)$$



Розширена матриця планування повного факторного експерименту  $2^3$ 

| Дослід № | $x_0$ | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_1x_2$ | $x_1x_3$ | $x_2x_3$ | $x_1x_2x_3$ | $y$   |
|----------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|-------------|-------|
| 1        | +1    | -1    | -1    | -1    | +1       | +1       | +1       | -1          | $y_1$ |
| 2        | +1    | +1    | -1    | -1    | -1       | -1       | +1       | +1          | $y_2$ |
| 3        | +1    | -1    | +1    | -1    | -1       | +1       | -1       | +1          | $y_3$ |
| 4        | +1    | +1    | +1    | -1    | +1       | -1       | -1       | -1          | $y_4$ |
| 5        | +1    | -1    | -1    | +1    | +1       | -1       | -1       | +1          | $y_5$ |
| 6        | +1    | +1    | -1    | +1    | -1       | +1       | -1       | -1          | $y_6$ |
| 7        | +1    | -1    | +1    | +1    | -1       | -1       | +1       | -1          | $y_7$ |
| 8        | +1    | +1    | +1    | +1    | +1       | +1       | +1       | +1          | $y_8$ |

Оскільки матриця повного факторного експерименту є діагональною матрицею, то коефіцієнти регресії некорельовані між собою, отже, значимість для кожного коефіцієнта окремо можна перевіряти за критерієм Стюдента, при цьому виключення з рівняння регресії незначного коефіцієнта не позначиться на інших коефіцієнтах. Величини коефіцієнтів рівняння регресії характеризують внесок кожного фактора на величину  $y$ . Діагональні елементи матриці планування рівні між собою, тому всі коефіцієнти рівнянь визначаються з однаковою точністю [145]:

$$S_{b_j} = \frac{S_{\text{відмс}}}{\sqrt{N}}. \quad (2.3)$$

Якщо паралельні досліди проводилися в центрі плану, то дисперсія відтворюваності  $S_{\text{відмс}}$  визначається за формулою:

$$S_{\text{відмс}}^2 = \frac{1}{NN-1} \sum_{u=1}^{NN} (y_u^0 - \bar{y}^0)^2, \quad (2.4)$$

де  $NN$  – кількість паралельних дослідів;

$y_u^0$  – значення, що отримані при постановці кожного з додаткових дослідів в центрі плану;

$\bar{y}^0$  – середні значення величини  $y$ , що отримані при паралельних дослідах.

Розрахункове значення критерію Стьюдента визначається за формулою:

$$t_j = \frac{|b_j|}{S_{b_j}}. \quad (2.5)$$

Отримане значення критерію Стьюдента порівнюється з табличним значенням для відповідного рівня значущості. Якщо розрахункове значення довірчого інтервалу менше табличного, то дані коефіцієнти при роботі з моделлю виключаються з рівняння регресії [145].

Після цього необхідно перевірити адекватність отриманого рівняння регресії, використовуючи критерій Фішера [97]:

$$F = \frac{S_{ocm}^2}{S_{відтв}^2},$$

де залишкова дисперсія розраховується за формулою:

$$S_{ocm}^2 = \frac{1}{N - L} \sum_{i=1}^N (y_i - y_{r_i})^2.$$

де  $L$  – число значущих коефіцієнтів в рівнянні регресії.

Розрахункове значення критерію адекватності порівнюють з табличним значенням (при відповідному рівні значущості). При цьому, якщо розрахункове значення менше табличного, то отримане рівняння регресії адекватно описує експеримент [145].

## 2.5 Висновки по другому розділу

1. Визначено теоретичний підхід для розробки структурно-енергетичної моделі перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування.

2. Визначено основні напрямки та методи дослідження механізмів дисипації енергії в умовах аномально низького тертя та зношування.

3. Виконано вибір матеріалів та робочого середовища, кінематичних схем контакту для проведення досліджень, моделюючих роботу реальних трибосистем у агрегатобудуванні.

4. Обраний трьохфакторний план проведення експерименту, що дозволяє отримати мінімальну дисперсію значень функцій відгуку. Даний підхід використаний при оптимізації режимів двохстадійної фінішної обробки за технологією ПИ 02-17.

5. Обгрунтовано комплексні металофізичні дослідження для розкриття суті фізичних процесів, які відбуваються при переході від нормального механохімічного тертя та зношування до аномально низького при проведенні комплексних досліджень.

## РОЗДІЛ 3

### СТРУКТУРНО-ЕНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В УМОВАХ АНОМАЛЬНО НИЗЬКОГО ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ

Даний розділ дисертаційної роботи присвячений вирішенню перших двох завдань роботи. Перше завдання полягає в розробці моделі контактної взаємодії мікронерівностей (шорсткостей) трибоелементів та механізмів накопичення енергії у підповерхневому шарі, сформованому за реологічним принципом Шведова, та визначити механізм формування хвильової складової сили тертя.

В основу вирішення другого завдання покладено обґрунтування та розробка механізму структурування поверхневого шару ТС для дисипації накопиченої енергії в умовах аномально низького тертя та зношування та удосконалення структурно-енергетичної моделі перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування.

В основу перерахованих задач лягло пояснення квазіпружної взаємодії ефективного об'єму мікронерівності з використанням уявлення його як марківського процесу з двома дискретними станами, наприклад, деформації при вступі в контактну взаємодію (1-ий стан) та відновлення початкової форми (проковзування) ефективного об'єму (2-ий стан).

Було сформульовано основні допущення та обмеження, прийняті при розробці моделі. Розроблено модель контактної взаємодії мікронерівностей (мікрошорсткостей) трибоелементів при формуванні хвильової складової сили тертя.

#### **3.1 Допущення та обмеження, прийняті при розробці моделі**

Розгляд квазіпружної взаємодії з позиції нерівноважної термодинаміки дозволив А. Вейнику ще у 1973 році висунути гіпотезу, що квазіпружна взаємодія може бути антидисипативним фактором, який призводить до виведення накопиченої внутрішньої енергії з трибосистеми [9]. Серед цих факторів основний вклад приходиться на кінетичну (хвильову) складову сили

тертя, що формується при різниці швидкостей гальмування мікронерівностей при молекулярно-механічній взаємодії і проковзуванні при їх розгоні.

Теоретичну основу в розробці фізичної моделі аномально низького тертя та зношування створили роботи багатьох авторів, наприклад робота [146]. С.В. Федоровим [43] для аналізу аномально низького тертя використаний квантомеханічний підхід, введено поняття механічного кванта – мінімального числа атомів, здатних забезпечувати конфігураційний розподіл наноструктур, які володіють властивостями зворотно сприймати і розсіювати (повертати) енергію зовнішнього механічного руху. Він також являє собою найменше структурне утворення в умовах пластичної деформації і утворюється при переході трибосистеми (деформованого об'єму) через гранично активований (критичний) стан внаслідок розвитку самоорганізаційних процесів адаптації трибосистеми. В об'ємі елементарної ТС в умовах АНТЗ кількість таких механічних квантів (трибосистем)  $\hat{\varepsilon}$ , тобто безпечне число циклів утоми, дорівнює  $0,63 \cdot 10^8$ . Механічний квант сам по собі є динамічним осцилятором дисипативних структур тертя і його лінійний розмір дорівнює радіусу сферичного ідеального кристала – 7,177 нм [43].

Власне механічний квант слід розглядати як елементарну наноструктуру металевого твердого тіла [43]. Таке припущення дає підстави вважати можливим подолання сил тертя при переміщенні твердих тіл тільки за рахунок внутрішніх сил. На наш погляд, джерелом виникнення цих сил є хвильова складова зовнішнього тертя. На основі даних досліджень розроблені рекомендації щодо реологічних особливостей поверхневого шару трибосистем для створення умов, які збільшують хвильову складову і дозволяють досягнути умов аномально низького тертя та зношування. В такому випадку одна з поверхонь в трибосистемі представляє собою квазітверде тіло, а на другому трибоелементі поверхневий шар модифікований за рахунок різноманітних методів (програмне навантаження, управління тепловим потоком, трибоактивація активними елементами, технології фінішної обробки та ін.) [46, 65]. Дані дослідження представлені у вигляді наукової парадигми переводу трибосистем від нормального механохімічного тертя та зношування до аномально низького тертя та зношування [46].

Останнім часом для пояснення аномально низького тертя та зношування використовується хвильовий підхід при аналізі енергетичного обміну між контактуючими поверхнями. Поверхневий шар елементів трибосистеми представляється у вигляді енергетичних осередків, представлених їх шорсткістю. При русі поверхонь в кожний момент часу відбувається велика кількість зіткнень мікрориступів. В кожній мікрзоні утворюється тепло, яке розсіюється за законами дисипації. Разом з цим дослідники звертають увагу, що нагрівання мікрориступів відбувається зі швидкістю не більше ніж десять градусів за секунду, а охолодження – зі швидкістю тисячі градусів за секунду, що обумовлює формування структури поверхневого шару, який володіє певною гетерогенністю, що пов'язано з нерівномірністю розподілу енергії по висоті мікрориступу. Виходячи з цих міркувань, будова поверхневого шару може бути представлена у вигляді чотирьох зон. Детальний розгляд зон поверхневого шару приводить до висновку, що цей шар є композитом, властивості якого повинні враховуватися при аналізі процесів тертя та зношування [45].

Як вже зазначалося в підрозділі 1.1, в даній роботі динаміка кінетичної взаємодії мікрориступів на всій поверхні контакту не розглядалася, а всяка система, що складається з дуже великого числа елементів, переходить від стану менш імовірного до стану більш імовірного (термодинамічно це відповідає зменшенню ентропії  $S$  системи відповідно до формули Больцмана (1.4)) [64, 65].

Оскільки в результаті контактної взаємодії ідеально пружних мікрориступів формується хвиля напружень, яка бере участь в процесі дисипації енергії, що підводиться ззовні, то кількісна оцінка сили тертя  $F_{fr}$  з урахуванням її хвильової складової  $F_w$ , буде мати наступний вигляд:

$$F_{fr} = |F_a + F_d| - |F_w|, \quad F_a + F_d \approx |F_w| \quad (3.1)$$

де –  $F_a$  – молекулярна (адгезійна) складова сили тертя;

$F_d$  – механічна (деформаційна) складова сили тертя.

Хвильова складова  $F_w$  є результатом контактної взаємодії, а тому входить у склад деформаційної складової  $F_d$  як фактор впливу на силу тертя  $F_{fr}$ . Однак, враховуючи досвід американських вчених [55-57], хвильова складова  $F_w$  може бути самостійним фактором впливу на силу тертя  $F_{fr}$ . У цих експериментах  $F_w$  виникала в трибосистемах шляхом утворення в них за допомогою спеціальних генераторів поверхневих хвиль. Тому хвильова складова  $F_w$  може бути виділена у рівнянні (3.1) окремим членом, відокремленим від загальної деформаційної складової  $F_d$ . Крім того, такий підхід дає можливість пояснити короткочасний перехід ТС, яка працює в умовах АНТЗ, в область від'ємного тертя на перехідних режимах.

Хвильова складова  $F_w$  сили тертя  $F_{fr}$  є тим «ентропійним насосом», який частину зовнішнього тертя, що не компенсується, переводить у внутрішнє тертя.

Характер взаємодії одиничних мікронерівностей представлено моделлю реології Гука. Проведемо аналіз формування хвильової складової в даних умовах контакту. В умовах відсутності взаємного переміщення сили притягання і відштовхування між атомами в другому елементі урівноважені.

### **3.2 Модель контактної взаємодії мікронерівностей трибоелементів при формуванні хвильової складової сили тертя**

З робіт І.В. Крагельського, присвячених вивченню вкладу молекулярної та механічної складових сил тертя відомо, що основний вклад в ній (близько 80%) припадає на молекулярну складову. Тому для аналізу контактної взаємодії міжатомних зв'язків, які виникають за рахунок Вандерваальсових сил, використаємо модель міжатомної взаємодії, в якій енергія залежить від відстані між атомами. В процесі взаємодії мікронерівностей ця відстань  $a$  змінюється на деяку відстань  $a - a_0 = \Delta a$ . Тут  $a$  – кінцева міжатомна відстань;  $a_0$  – початкова міжатомна відстань. Розрив міжатомних зв'язків виникає при настанні проковзування. В цьому випадку атоми віддаляються на певну відстань, де сила притягування дорівнює нулю.

Для виникнення проковзування необхідно витратити певну роботу  $A_\mu$  з подолання сил тертя.

Залежність потенційної енергії  $E$  від відстані між атомами на плямах фактичного контакту мікронерівностей в процесі кінетичної взаємодії при відносному русі в ТС, можна представити емпіричним рівнянням [147]:

$$E = A_\mu ( 2e^{-b(\Delta a)} - e^{-2b(\Delta a)} ), \quad (3.2)$$

де  $b$  – постійна, що залежить від матеріалів контактної взаємодії.

Оскільки сила взаємодії  $F$  між атомами є похідною від енергії  $E(a)$  по  $a$ , то вираз для цієї сили має вигляд:

$$F = -\frac{d}{da} [E(a)].$$

Максимальне значення цієї сили  $F_{max}$  можна вважати граничним значенням, при якому виникає проковзування в процесі контактної взаємодії. В цьому випадку розмір цієї сили відображає граничний стан:

$$F(\Delta a) = 4F_{max} ( e^{-b(\Delta a)} - e^{-2b(\Delta a)} ), \quad (3.3)$$

де  $F_{max} = 0,5bA_\mu$ .

Значення максимального розтягування  $\Delta a_{max}$  відповідно:

$$\Delta a_{max} = -\frac{1}{b} \ln \frac{1}{2}.$$

Якщо  $A_\mu$  дорівнює енергії, яка вивільняється при руйнуванні зв'язків, то можна знайти величину максимального значення сили, яка виникає при проковзуванні.



Якщо позначити зовнішню силу, яка пружно деформує мікронерівності, як  $f$ , то для подолання сил молекулярної взаємодії необхідно підвести додаткову енергію  $E(f)$ . На етапі початку пружної взаємодії мікронерівностей та при проковзуванні на відстань  $\Delta a$  відповідають два значення потенційної енергії. Знайдемо їх з формул (3.2) і (3.3), замінивши  $F(\Delta a)$  на  $f$  і замінюючи  $e^{-b(\Delta a)}$  на  $z$  в (3.3), отримаємо рівняння:

$$z^2 - z + f/4F_{max} = 0.$$

Знайдемо значення відстані  $\Delta a_{1,2}$ , на якій деформуються мікронерівності при проковзуванні:

$$\Delta a_{1,2} = \frac{1}{b} \ln \frac{2}{1 \pm \sqrt{1 - \frac{f}{F_{max}}}}.$$

Таким чином, кількість енергії  $E(f)$ , що необхідна для подолання силового бар'єру, дорівнює:

$$E(f) = E(\Delta a_{1,2}) - E_0 = 0,25 A_{\mu} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{f}{F_{max}}} \right), \quad (3.4)$$

де  $E_0$  – мінімальне значення потенційної енергії на початковому етапі взаємодії.

З цього виразу витікає, що для досягнення межі міцності зв'язку необхідно підвести кількість енергії, що дорівнює лише чверті енергії, витраченої на подолання сил тертя при проковзуванні  $A_{\mu}$ , тобто молекулярна складова у випадку квазіпружної взаємодії значно менша, ніж

механічна (деформаційна) складова, на долю якої припадає до 75% енергії від загальної при контактній взаємодії.

Таким чином, повертаючись до визначення потенційної енергії контактної взаємодії  $E$ , (3.2), яка накопичується при контактній взаємодії, на відстані  $\Delta a$  вона складає  $0,25 A_{\mu}$  і є достатньо енергоємною умовою виникнення хвильової складової сил тертя  $F_w$  з (3.1). Частина енергії контактної взаємодії накопичується поверхневим шаром. Проведені розрахунки показують, що ця частина енергії недостатня для досягнення балансу (3.1) між молекулярно-механічною та хвильової складовими сили тертя, який має місце при АНТЗ. Потрібно додаткове джерело енергії, яка піде на генерування саме хвильової складової. Таким джерелом виступає підповерхневий пружно-пластичний шар ТС. В ньому при контактній взаємодії при терті накопичується та частка енергії, яка йде на утворення хвильової складової сили тертя  $F_w$ . Сам механізм такого накопичення розглянемо далі.

### **3.3 Механізм накопичення енергії у підповерхневому шарі в умовах контактної взаємодії мікронерівностей**

Сформульовані умови досягнення рівності хвильової і молекулярно-механічної складової сили тертя, тобто досягнення нульового тертя, при поверхневому аналізі дозволяють зробити висновок, що дана трибосистема є вічним двигуном третього роду. Проте це не так. Проводячи аналіз механізмів дисипації енергії, що ззовні підводиться до трибосистеми, необхідно враховувати як зовнішнє тертя, так і внутрішнє. Внутрішнє тертя визначається фізико-механічними властивостями матеріалів, визначаючи можливість їх взаємодії з навколишнім середовищем. Зовнішнє тертя відповідає фактичній реалізації взаємодії в трибосистемі і навколишнім середовищем.

Отже, різниця між внутрішніми і зовнішніми ступенями свободи полягає в тому, що внутрішні ступені свободи визначаються можливостями взаємодій (потенційно закладеними в системі) з навколишнім середовищем. Зовнішні ж ступені свободи відповідають фактично взаємодіям, що реалізуються між системою і навколишнім середовищем.

Оскільки критерієм безповоротності трибосистем є робота сил тертя, то її виробництво розглянемо на рівні елементарної взаємодії мікронерівностей. Одну з них представимо у вигляді абсолютно жорсткого тіла, яке при дії на нього сил молекулярно-механічної взаємодії не деформується. А другу мікронерівність можна представити у вигляді пружини з певною жорсткістю  $c$ , яка за рахунок сил молекулярно-механічної взаємодії періодично займає два положення, в одному з яких пружина не напружена, а в іншому стисла або розтягнута на величину  $\Delta l$ . При цьому робота пружної сили пружини  $A$ , між двома її положеннями може бути визначена по формулі:

$$A = \pm \frac{1}{2} c (\Delta l)^2. \quad (3.5)$$

Знак плюс береться у разі розвантаження пружини (деформація змінюється від  $\Delta l$  до 0), знак мінус – при навантаженні (деформація змінюється від 0 до  $\Delta l$ ).

Отримана формула залишається справедливою і у тому випадку, коли вільний кінець пружини рухається вздовж будь-якої криволінійної траєкторії, послідовно займаючи положення  $m_1$  і  $m_2$ .

Якщо пружина деформована в обох даних положеннях (в кінцевому – на величину  $\Delta l_2$ , в початковому – на  $\Delta l_1$ ), то має місце формула:

$$A_{m_1 m_2} = -\frac{c}{2} \left[ (\Delta l_2)^2 - (\Delta l_1)^2 \right]. \quad (3.6)$$

З урахуванням прийнятої моделі, формула (3.6) представляє собою елементарну роботу кінетичного нанополя.

Узагальнену роботу  $\Delta A$  сил тертя, можна представити добутком узагальненої сили  $P$  на узагальнену кінетичну взаємодію  $\Delta E$  за певний період роботи трибосистеми:

$$\Delta A = P \Delta E. \quad (3.7)$$

Як зазначалося у підрозділі 1.1, механохімічний знос являється результатом різних видів робіт, пов'язаних з відповідним механізмом дисипації енергії  $U$  (1.5).

З цієї формули видно, що позитивна робота супроводжується збільшенням енергії системи, при цьому обидві величини  $dU$  і  $\Delta A$  являються позитивними. Енергія зростає, якщо над системою роботу виконує навколишнє середовище. Отже, позитивною вважається робота, що виконується навколишнім середовищем.

Як вже зазначалося (підрозд.1.1), Погодаєвим Л.І. [46] наведена реологічна будова поверхні та механізм дисипації зовнішньої енергії в умовах аномально низького тертя та зношування, як квазіпружна взаємодія поверхневого шару і ротаційно-пластична деформація підповерхневого шару, засновані на реологічній моделі Шведова, (рис. 3.1). Цей підхід є обґрунтованим в описі картини такої взаємодії і можна вважати окремим випадком прояву хвильової складової сили тертя, як каналу дисипації зовнішньої енергії, що підводиться.

Мірою енергії хвиль є об'ємна щільність кінетичної енергії середовища  $I$  (рис. 3.1), а об'ємна щільність потенційної енергії середовища запасастся комбінацією тіла Ньютона і Гука в підповерхневому шарі 2 (рис. 3.1). При досягненні цією енергією критичної величини відбувається дисипація в тілі Сен-Венана, яка частково перетворюється в кінетичну при подальшій взаємодії, і частково перетворюється в тепло в результаті ротаційної

рухомості, а також накопичується у вигляді внутрішньої енергії в результаті мікроструктурних змін (по суті, відбувається наноструктурування в цій області). Таким чином, ротаційна рухомість представляє собою також імпульсний (хвильовий) процес.

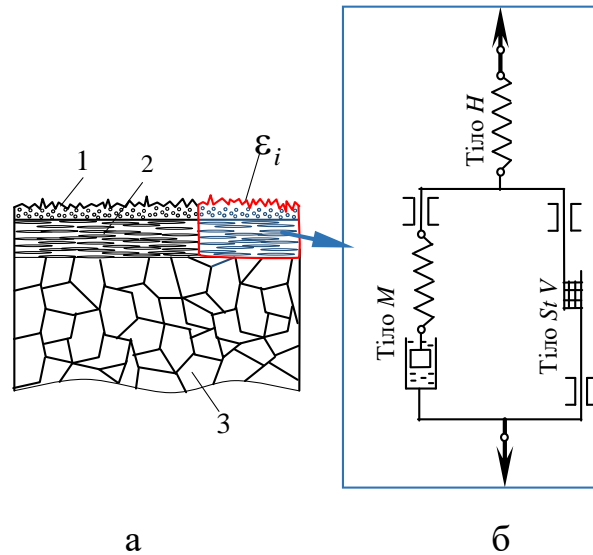


Рис. 3.1. Реологічні і фрактографічні особливості поверхневого шару трибоелементів, що працюють в умовах аномально низького тертя та зношування:

- а – реологічні особливості (1 – квазіпружний поверхневий шар тіло  $H$  (Гука);  
 2 – наноструктурований шар ( $\epsilon_i$  – окремо взаємодіючі елементи ансамблю);  
 3 – основа);
- б – реологічна модель (Шведова) лінійного осцилятора в поверхневому шарі, що працює за принципом аномально низького тертя та зношування ( $M$  – тіло Максвелла,  $StV$  – тіло Сен-Венана)

Як відомо, в теорії коливань найпоширеніша характеристика динаміки взаємодії мас описуються рівняннями Лагранжа. Класичним прикладом такої характеристики є врівноваження лінійного осцилятора, вимушеною гармонічною силою  $P(t) = P \sin \omega t$  і здійсненням пружних коливань з амплітудою  $X(t)$ .

Енергетичний обмін в цьому випадку може бути оцінений за схемою, запропонованою Дубініним А.Д. [148].

Пружне середовище (трибоелементи, робоче середовище), в якому генеруються і поширюються поперечні та поверхневі хвилі, оцінюється

мірою об'ємної щільності кінетичної енергії середовища  $E_k$ :

$$E_k = \frac{dE_k}{dV} = \frac{\rho v_1^2}{2}, \quad (3.8)$$

де  $dE_k$  – кінетична енергія елементарних об'ємів  $dV$ ;

$\rho$  – щільність середовища;

$v$  – фазова швидкість хвиль у середовищі ( $v_1$  – при проковзуванні мікронерівності,  $v_2$  – при її гальмуванні).

А об'ємна щільність потенційної енергії  $E_p$ , яка накопичується в підповерхневому шарі трибоелементів в результаті адгезійної та деформаційної взаємодії, оцінюється так:

$$E_p = \frac{dE_p}{dV} = \frac{\rho v_2^2 \delta}{2}, \quad (3.9)$$

де  $dE_p$  – потенційна енергія елементарних об'ємів  $dV$ ;

$\delta$  – відносна деформація.

Загальна енергія в результаті пружної взаємодії мікронерівності дорівнює:

$$E = E_k + E_p = \frac{\rho(v_1^2 + v_2^2 \delta)}{2}. \quad (3.10)$$

Так як об'ємна щільність енергії хвиль залежить від координат і часу, то швидкість її перенесення дорівнює швидкості переміщення в просторі. Досягнення квантової теорії дозволяє стверджувати, що енергія хвиль переноситься дискретно – фононами.

Основною формою поглиненої внутрішньої енергії при зовнішньому терті є тепловиділення. При наявності «ідеальної» дисипативної структури в умовах аномально низького тертя та зношування має місце повний баланс між поглинутою внутрішньою енергією і виділеним теплом, що підтверджено результатами експериментальних досліджень [149]. Такий термодинамічний цикл відноситься до сталого режиму тертя з мінімальною інтенсивністю зношування, енергетичні витрати на який практично дорівнюють нулю [150-152].

При порушенні балансу, коли зовнішня енергетична взаємодія буде перевищувати виробництво тепла, частина поглиненої енергії почне накопичуватися в контактних шарах і трансформуватися в інші недисипативні форми. Цей ланцюжок енергетичних перетворень буде відбуватися доти, поки поглинена внутрішня енергія не виродиться в дисипативний вид і відновиться баланс між енергією, що підводиться і виділеним теплом.

### **3.4 Модель дисипації енергії в умовах мікроконтактної взаємодії поверхонь, сформованих за реологічним принципом Шведова**

При переході трибосистем з умов нормального механохімічного зношування до умов аномально низького тертя та зношування [53] механічна енергія, що підводиться, поглинається поверхневим шаром у вигляді пружної енергії деформації. Пружні коливання на плямах фактичного контакту мають потенційні можливості для перетворення в інші енергетичні види.

Так, проведені теоретичні оцінки показали, що дисипативний об'єм тертя в умовах аномально низького тертя здійснює зворотну пружну трансформацію енергії зовнішнього механічного руху [44].

Дані взаємодії наближені до зворотної енергетичної форми. Вони контролюють процеси структурних перетворень і в своїй подальшій еволюції наближаються до необоротних форм. Зворотні енергетичні форми мають

потенційні можливості для перетворення поглиненої внутрішньої енергії при зовнішньому терті в інші енергетичні види, а саме зниження накопиченої енергії в контактних шарах при припиненні енергетичної взаємодії.

Такий стан дисипативної структури тертя, з позицій С.В.Федорова описується рівнянням стану квазіідеального твердого тіла. Це стан, коли взаємодія між елементами структури (механічними квантами) мінімізована – стан ідеальної пружності квазів'язкої течії. Розрахунковий коефіцієнт тертя у цьому випадку дорівнює  $\approx 10^{-8}$ . Таким чином теоретичні дослідження С.В.Федорова [44] підтверджують правомірність розроблених нами моделей контактної взаємодії.

Найбільш природним в поясненні квазіпружної взаємодії ефективного об'єму мікронерівності, є уявлення його як марківського процесу з двома дискретними станами [153], зокрема «двосторонньої реакції», що пропонує можливість в системі тільки перехід  $1 \rightarrow 2$  (1-ий стан  $x_k$  – відновлення, 2-ий стан  $x_j$  – розпад), наприклад, деформації та відновлення початкової форми ефективного об'єму [154].

Для зазначеного процесу справедливе рівняння А. М. Колмогорова:

$$\frac{\partial p_1(t_1 x_k)}{\partial t} = \sum_i A_{jk}(t) p_1(t_1 x_j), \quad (3.11)$$

де  $p_1(t_1 x_k)$  – одномірна ймовірність стану;

$$A_{jk} = \left[ \frac{\partial p(u_1 x_k / t_1 x_j)}{\partial u} \right]_{u=t};$$

де  $p(u_1 x_k / t_1 x_j)$  – ймовірність переходу із стану  $x_k$  у стан  $x_j$ , так що з урахуванням нормування  $A_{jk}(t) \geq 0 (j \neq k)$  [152];

$$\sum_k A_{jk}(t) = 0.$$



Стосовно до безлічі локальних взаємодій, мікронерівність розглядають як в теоретичному, так і в експериментальному ключі. Ймовірність знаходження елементарного контакту в одному зі станів двохстадійної моделі залежить від останнього стану в момент часу  $t_n$  і не залежить від передісторії. Рішення раніше сформульованого рівняння є дифузійним марківським процесом.

Умови нерівноважної самоорганізації в цьому випадку супроводжуються процесами, неузгодженими з традиційними принципами термодинаміки рівноважних систем, зокрема в даному випадку виникає стан авторегулювання ентропії, що обумовлений процесами симетрії флуктуацій відповідно до принципів найменшої дії (за Ніколісом Г. та Пригожином І.) [5, 53].

Вводячи позначення  $p_1(t,1) = p_1(t)$  – ймовірність існування в системі стану 1 (відновлення), вважаючи процес однорідним в часі і  $\alpha, \beta$  – постійними величинами:

$$A_{12} = \alpha \delta t; A_{21} = \beta \delta t; \alpha + \beta = \lambda,$$

де  $\alpha \delta t; \beta \delta t$  – ймовірності переходів  $1 \rightarrow 2$  (розпад) і  $2 \rightarrow 1$  (відновлення) за час  $\delta t$ .

Рівняння (3.11) можна записати у вигляді системи [153]:

$$\begin{cases} \frac{\partial p_1}{\partial t} = -\alpha p_1 + \beta p_2 \\ \frac{\partial p_2}{\partial t} = -\alpha p_2 + \beta p_1 \end{cases} \quad (3.12)$$

Вирішуючи рівняння (3.11) при початковій умові  $t=0, p_1=1$  (відновлення), отримаємо:

$$p_1(t) = e^{-\lambda t} + \frac{\beta}{\lambda(1 - e^{-\lambda t})}; \quad (3.13)$$

$$p_2(t) = \frac{\beta}{\lambda(1 - e^{-\lambda t})}. \quad (3.14)$$

Двостадійна модель ототожнює стан 1 (відновлення) з контактом, що знаходиться в стані зчеплення, а стан 2 (розпаду зв'язку) – з контактом в стані проковзування. Рівняння (3.13) і (3.14) можна трактувати як ймовірності знаходження контактів в зазначених станах або як відносні числа таких контактів, що знаходяться в системі в кожен даний момент часу  $t$ .

Таким чином, оцінюючи стаціонарність і, отже, ергодичність [155, 156], розглядаючи моделі мікроконтакту і моделі шорсткості відповідно виразами (3.13) і (3.14) видно, що при  $t \rightarrow \infty$  дане рівняння має стаціонарні рішення:

$$p_1(\infty) = \frac{\beta}{\lambda}; \quad p_2(\infty) = \frac{\beta}{\lambda}.$$

Так як ймовірність  $p_1(t)$  пропорційна числу контактів, що знаходяться в стані зчеплення (якщо ввести елементарну силу тертя зчеплення, що припадає на один контакт), то вираз (3.13) аналогічний залежності сили тертя спокою  $F_{\text{тсп}}$  (і коефіцієнта тертя  $\mu$ ) від тривалості нерухомого контакту, встановлену І. В. Крагельським:

$$F_{\text{тсп}} = F_{\infty} - (F_{\infty} - F_0)e^{-\nu t} = F_0 e^{-\nu t} + F_{\infty}(1 - e^{-\nu t}), \quad (3.15)$$

де  $F_{\infty}$  – сила тертя, що відповідає нескінченно тривалому контакту;

$F_0$  – сила тертя при нульовому часі контакту.

Так, для оцінки відносного числа (ймовірності)  $p$  зв'язків, що існують в системі і розриваються в момент їх проковзування по поверхні абсолютно пружного тіла при постійній швидкості ковзання  $v$  можна записати:

$$p = p_{01}e^{-\alpha v} + p_{02}(1 - e^{-\beta v}),$$

де  $p_{01}$ ,  $p_{02}$  – відносне число мікронерівностей, що знаходяться в кожному із станів при  $v = 0$ ,  $v = \infty$  відповідно.

Із порівняння (3.15) з (3.13) після переходу до коефіцієнта тертя  $\mu$  отримаємо:

$$\mu_{\infty} = \frac{\beta}{\lambda} = \frac{\beta}{\alpha + \beta}.$$

Система (3.12) відноситься до сили тертя руху. При числі станів моделі з великою кількістю мікроконтактів, рівняння містять коливальне рішення, що, безумовно, повинно супроводжуватися зменшенням сили тертя.

З огляду на різницю висот мікронерівностей при русі, формується дискретна послідовність імпульсів сили тертя з випадковими амплітудами  $\alpha_v$  і моментами виникнення  $t_v$ , що відповідає елементарним зсувам взаємодіючих мікроскопічних зон, що труться. На основі цієї системи імпульсів, що апроксимуються, наприклад,  $\delta$ -імпульсами [147], можна побудувати безперервну випадкову функцію  $x(t)$  і відповідний їй випадковий процес шляхом усереднення по досить великим інтервалам часу  $\partial t'$ , між окремими елементарними імпульсами:

$$x(t) = \int \sum_v \alpha_v \delta(t' - t) \partial t'. \quad (3.16)$$

Фізично це відповідає фіксуванню результуючих зсувів (пружна хвиля) на досить великих мікроділянках поверхонь тертя. У свою чергу, цей усереднений по інтервалах часу випадковий процес апроксимується марківським, тобто передбачається, що його функція розподілу  $\nu(tx/t_0x_0)$  описується рівнянням Фокера-Планка:

$$\frac{\partial \nu}{\partial t} = \frac{\partial A(x_1 t) \nu}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 B(x_1 t) \nu}{\partial x^2}, \quad (3.17)$$

де  $A$ ,  $B$  – коефіцієнти [157].

Далі вводимо умовне середнє  $\bar{x}(t)$  по зсувах, але вже для процесу (3.16) в припущенні, що в момент  $t_0$ :

$$\bar{x} = x_0; \quad \bar{x}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \nu \left( \frac{t_1 x}{t_0 x_0} \right) dx.$$

Побудуємо феноменологічне рівняння руху:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} A \nu dx = A(\bar{x}_1 t), \quad (3.18)$$

шляхом множення рівняння (3.16) на  $x$  і інтегрування по  $x$  в межах від  $-\infty$  до  $+\infty$ , припускаючи, що проінтегровані члени в нескінченності прагнуть до нуля.

При цьому рівняння (3.18) збігається зі звичайним рівнянням динаміки для деякої матеріальної точки за умови  $A(\bar{x}_1 t) = a(t)\bar{x} + b(t)$ .

Таким чином, рівняння Фокера-Планка-Колмогорова еквівалентне стохастичному рівнянню динаміки [116], тобто використання при фізико-статистичному трактуванні стохастичного рівняння для опису руху ефективного об'єму взаємодії, що знаходиться в стані зчеплення, так само, як і розбиття діючої на нього стохастичної сили реакції на середню і флуктуючу

частини в зазначених рамках, видається цілком зрозумілим і допустимим. При цьому ефективну масу можна розглядати просто як якийсь коефіцієнт пропорційності, що входить в  $A(\overline{x_1 t})$ . З урахуванням зв'язку рівнянь (3.16) і (3.18) можна сформулювати сенс експоненціального розподілу по енергіях для системи мікроконтактів, що знаходяться в стані зчеплення.

Оскільки існує стаціонарне рішення рівняння Фокера-Планка (3.17)  $\partial v / \partial t = 0$ , то:

$$j = -Av + \frac{1}{2} \frac{\partial Bv}{\partial x} = \text{const}.$$

Припустимо, що стаціонарний потік  $j$  на межі  $x(t)$  області зміни дорівнює нулю, тоді після інтегрування отримаємо імпульс сили тертя:

$$v(x) = \frac{C}{B(x)} e^{\int_0^x \frac{A(S)}{2B(S)} ds}, \quad (3.19)$$

де  $C$  – постійна, що визначається з умов нормування;

$S$  – питома значення ентропії (розд. 1).

При постійних  $A, B$  можна припустити, що:

$$\int_0^{x(t)} \frac{A(S)}{2B(S)} dS = \frac{Ax}{2B} = -\frac{\Delta E_w}{\Theta},$$

де  $\Delta E_w$  – енергія розсіювання при контактній взаємодії;

$\Theta$  – модуль канонічного розподілу енергії по лінії (поверхні) контакту [158].

Розглянемо більш докладно перетворення енергії  $\Delta E_w$  при контактній взаємодії. В процесі проковзування на кожному елементарному контакті генерується пружна хвиля. Згідно квантової механіки, енергія та імпульс,

пов'язані з кожним нормальним коливанням (з кожною хвилею) квантуються, тобто можуть приймати лише дискретні значення. Вони стають кратними ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) рівностям Луї де Бройля (дуалізм енергії та імпульсу частки, що рухається) [131], які приймають фізичний сенс відповідно енергії та імпульсу «елементарного збудження» коливального руху у кристалі. Таке елементарне збудження можна розглядати як квазічастку – фонон (енергетичний дефект твердого тіла) з квазіімпульсом  $\vec{v}$  та енергією:

$$\varepsilon(\vec{v}) = \hbar\omega(\vec{v}/\hbar),$$

де  $\varepsilon$  – енергія частки, що рухається;

$\vec{v}$  – імпульс руху частки;

$\hbar$  – стала Планка;

$\omega$  – частота коливального руху хвилі.

Ці квазічастки (фонони) являють собою найпростіший тип елементарних збуджень в твердих тілах [131].

З урахуванням прийнятого нами структурування поверхні в умовах АНТЗ енергія розсіювання кожного механічного кванту дорівнює:

$$\Delta E_{MK} = n(\hbar\omega(\vec{v}/\hbar)),$$

де  $n$  – ступінь збудження нормального коливання. Це кількість фононів з імпульсом  $\hbar\vec{q}$  (де  $\vec{q}$  – хвильовий вектор, напрям якого співпадає з напрямом розповсюдження хвилі) та енергією  $\hbar\omega$ .

Для всієї ТС, яка працює в умовах АНТЗ, її енергія розсіювання дорівнює:

$$\Delta E_{TC} = \Delta E_{MK} \hat{\varepsilon},$$

де  $\hat{\varepsilon}$  – кількість механічних квантів, приймаючих участь у взаємодії.

Так як  $n$  – будь яке ціле число, то фонони, як і фотони, підпорядковуються статистиці Бозе-Ейнштейна.

Використовуючи даний підхід, функція розподілу імпульсів сили тертя на локальних ділянках апроксимується марківським процесом і описується

рівнянням Фокера-Планка [157]. На підставі рішення цього рівняння отримано вираз результуючого імпульсу сили тертя для стаціонарних умов роботи трибосистеми в умовах аномально низького тертя та зношування. Вираз імпульсу сили в цьому випадку не відображає саморегулювання при досягненні рівності між молекулярно-механічною і хвильовою складових сил тертя при зміні зовнішніх умов, наприклад, при зміні навантаження. Тому підсумковий вираз для імпульсу  $\vec{v}_{TC}$  сили тертя трибосистеми матиме такий вигляд:

$$\vec{v}_{TC} = e \frac{-\Delta E_{mk} \hat{\epsilon}}{\Theta} . \quad (3.20)$$

По суті ця величина накладає граничні умови на швидкість взаємного переміщення, достатню для квантування енергетичного обміну. Вона є фактором переходу до АНТЗ, якщо імпульс сили від молекулярно-механічної та хвильової складової близькі за абсолютним значенням [159].

Враховуючи вищевикладене, можна дати фізичне пояснення коефіцієнта тертя для нормального механохімічного зношування  $\mu_{fr}$  та АНТЗ  $\mu_w$ :

$$\mu_{fr} = \frac{F}{N} = \frac{\Delta U}{Nl} ,$$

де  $F = \frac{\Delta U}{l}$  – сила тертя;

$N$  – нормальне навантаження на трибосистему;

$\Delta U$  – зміна внутрішньої енергії поверхневого шару;

$l$  – шлях тертя.

Таким чином, фізичне пояснення коефіцієнта тертя нормального механохімічного зношування  $\mu_{fr}$  має дуалізм, присутній в молекулярно-механічній теорії тертя та зношування [43, 44, 49]. З однієї сторони, це параметр, який характеризує опір відносному переміщенню поверхонь, бо він позначає долю енергії, яка «знищується» тертям у вигляді запасеної прихованої енергії  $\Delta U$  по відношенню до роботи зовнішніх сил (параметр  $Nl$

узагальнено характеризує роботу зовнішніх сил, які виконують на шляху  $l$  роботу). З іншої сторони, це узагальнена характеристика пошкоджуваності, бо він визначається щільністю прихованої енергії, пов'язаної з пошкоджуваністю.

Аналогічно визначимо коефіцієнт тертя хвильової складової  $\mu_w$ :

$$\mu_w = \frac{\Delta E_{TC}}{Nl} = \frac{\Delta E_{МК} \hat{\varepsilon}}{Nl}.$$

Фізичне пояснення в даному випадку характеризує розсіювання кінетичної енергії  $\Delta E_{TC}$  сил, яка виникає при квазіпружній взаємодії, по відношенню до параметру  $Nl$ , який узагальнено характеризує роботу внутрішніх сил, які роблять роботу на шляху тертя  $l$ . З іншої сторони, це узагальнена характеристика безносності. При АНТЗ основна складова сили тертя приходиться на кінетичну (хвильову) складову, що формується при різниці швидкостей гальмування при молекулярно-механічній взаємодії мікронерівностей і проковзуванні при їх розгоні.

За даною моделлю формується так само імпульс сили і від молекулярно-механічної складової сили тертя. Відмінністю є лише те, що від хвильової складової джерелом цього імпульсу  $\vec{v}_{TC,к}$  є зміна кінетичної енергії  $\Delta E_k$ , а джерелом імпульсу сили  $\vec{v}_{TC,п}$  від молекулярно-механічної складової є зміна потенційної енергії  $\Delta E_n$ .

Всі процеси, що протікають у ТС, які працюють в умовах АНТЗ, можна представити у вигляді термодинамічного рівняння:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S,$$

де  $\Delta G$  – зміна термодинамічного потенціалу ТС, який оцінює роботу при протіканні всіх процесів в ТС на всіх етапах (утворення та руйнування вторинних структур, дифузійні, хімічні та мікрометалургійні процеси тощо). Відображає максимальну роботу процесу;

$\Delta H$  – зміна ентальпії (тепловміст) ТС, характеризує зміну внутрішньої



енергії ТС при перетвореннях (або тепловий ефект перетворення).  
Енергетична складова;

$T$  – температура ТС;

$\Delta S$  – зміна ентропії ТС.

Тут  $T\Delta S$  – ентропійний член, з яким пов'язана енергія.

В умовах АНТЗ одночасно виконуються дві роботи. Перша робота з подолання сил тертя від молекулярно-механічної складової сили тертя, яка оцінюється зміною термодинамічного потенціалу  $\Delta G_n$ . Результатом цієї роботи є зміна (накопичення) потенційної енергії  $\Delta E_n$  з виділенням тепла  $Q_n$ . У результаті взаємодії на плямах фактичного контакту формується імпульс сили  $\vec{v}_{TC.n}$ .

А в процесі проковзування в ТС виконується друга робота внутрішніх сил, яка оцінюється термодинамічним потенціалом  $\Delta G_k$ . Результатом цієї роботи є зміна кінетичної енергії  $\Delta E_k$ , яка виділяється з поглинанням із ТС тепла  $Q_k$  та формуванням імпульсу сили  $\vec{v}_{TC.k}$ .

В умовах АНТЗ  $\vec{v}_{TC.n} \approx \vec{v}_{TC.k}$  та підтримується рівновага між виділеною та поглиненою теплотою  $Q_n = Q_k$ , що пояснюється намаганням будь-якої системи до мінімуму вільної енергії.

Схематично робота ТС в умовах АНТЗ може бути пояснена рисунком 3.2.

Таким чином, в ТС, яка працює в режимі АНТЗ можлива рівноважна та зворотна зміна деякої незначної кількості енергії без виконання роботи. Даний висновок узгоджується з гіпотезою аномально низького тертя, сформульованою Вейником [9]. Тепловиділення трибосистеми в даному випадку наближається до нуля.

При зміні зовнішніх умов тертя змінюється ступінь збудження ТС –  $n$ , яка залежить від кількості механічних квантів  $\hat{\varepsilon}$ . Будь-яка зміна в ТС, яка виводить її з рівноваги, згідно принципу Ле Шательє ініціює в ТС процеси, які намагаються повернути її у вихідне положення. За ці процеси у нашій моделі відповідає модуль канонічного розподілу енергії  $\Theta$ , який регулюється мікрогеометрією поверхневого шару ТС.

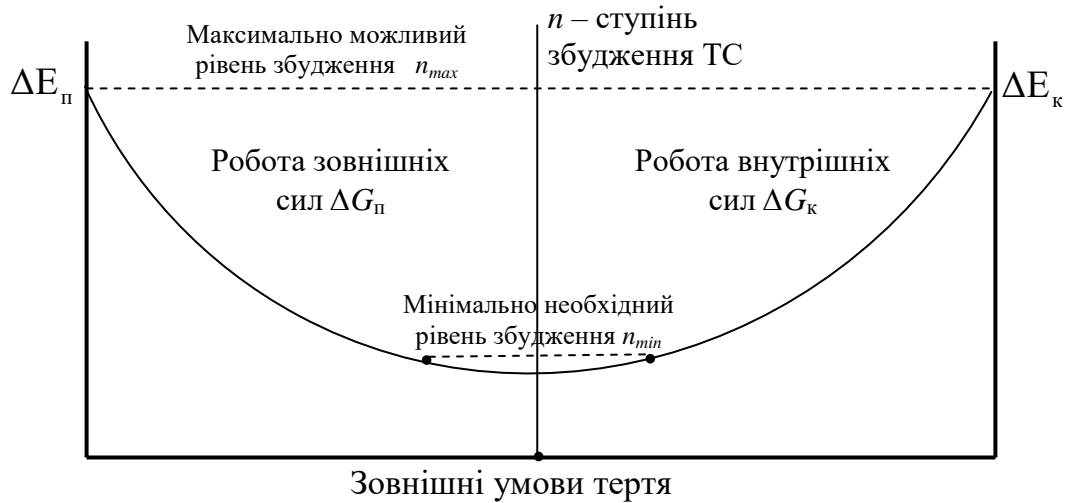


Рисунок 3.2. – Схематичне зображення роботи ТС в умовах АНТЗ

### 3.5 Висновки по третьому розділу

Проведені теоретичні дослідження показують, що основною причиною переходу трибосистем до аномально низького тертя та зношування є реологічні властивості поверхневого шару трибосистеми.

Проведений аналіз дозволяє зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що контактна взаємодія мікронерівностей за моделлю твердого тіла у вигляді міжатомних зв'язків дає можливість оцінити співвідношення молекулярної та механічної складових енергії при квазіпружній контактній взаємодії. Основний внесок (до 75%) припадає на механічну складову, яка оцінюється імпульсом сили на плямі контакту і залежить від енергії контакту в стані зчеплення, ступеня збудження трибосистеми та енергій зовнішніх та внутрішніх сил. Умовою досягнення АНТЗ є рівність робіт, які виконують зовнішні та внутрішні сили в умовах контактної взаємодії.

2. Оцінка взаємодії як марківського процесу з двома двосторонніми станами (розпад і відновлення) дозволила отримати математичний вираз узагальненої складової імпульсу сили на плямі контакту від енергії контакту в стані зчеплення і параметру розподілення плям контакту за модулем канонічного розподілу енергії по лінії (поверхні) контакту.

3. Теоретично встановлено, що при зміні зовнішніх умов тертя змінюється ступінь збудження ТС –  $n$ , яка залежить від кількості механічних квантів  $\hat{\varepsilon}$ . Будь-яка зміна в ТС, яка виводить її з рівноваги, згідно принципу Ле Шательє ініціює в ТС процеси, які намагаються повернути її у початкове положення. За ці процеси у розробленій моделі відповідає модуль канонічного розподілу енергії  $\Theta$ , який регулюється мікрогеометрією поверхневого шару ТС. Таким чином відбувається саморегулювання в трибосистемах в умовах аномально низького тертя та зношування при зміні зовнішніх умов.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА СПОСОБУ МОДИФІКАЦІЇ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ТРИБОСИСТЕМ ДЛЯ ПОДОВЖЕННЯ ЇХ РЕСУРСНИХ ПОКАЗНИКІВ

Даний розділ присвячений вирішенню третього, четвертого та п'ятого завдань дисертаційного дослідження. Для цього було проведено експериментальні дослідження з модифікації поверхневого шару бронзових зразків досліджуваних трибосистем.

Найбільш вдалим варіантом модифікування поверхонь для реалізації АНТЗ є насичення поверхневого шару бронзових трибоелементів у процесі фінішної обробки кремнієм. Це зумовило необхідність проведення попередніх експериментальних досліджень, в яких таке модифікування проводилось різними способами (обробка карбідом кремнію, обробка нефритом та послідовна обробка за обома способами).

Проведено оптимізацію найбільш вдалого методу обробки. Виконані порівняльні випробування на зносостійкість та задиростійкість (несучу здатність) ТС, які працюють в умовах АНТЗ.

Проведено комплексні металофізичні дослідження для пояснення фізичної суті переходу трибосистеми до АНТЗ за рахунок появи хвильової складової сили тертя. Це підтверджувалось, також, проведенням порівняльних досліджень амплітудно-частотних характеристик ТС при нормальному механохімічному зношуванні та при АНТЗ.

#### **4.1 Експериментальні дослідження з модифікації поверхневого шару бронзових зразків досліджуваних трибосистем**

Дослідження проводили з метою визначення можливості формування фізико-механічних властивостей поверхневого шару бронзових зразків для досягнення умов АНТЗ, яке реєструвалося за параметрами акустичної емісії [127, 159]. Для цього проводилося модифікування поверхні тертя шляхом

насичення поверхневого шару кремнієм. При цьому використовували три шляхи. Перший – обробка поверхонь тертя карбідом кремнію за технологією АТ «ФЕД». Технологія модифікації поверхневого шару обробкою карбідом кремнію розроблена у АТ «ФЕД», є предметом комерційної таємниці підприємства та не може бути оголошеною.

Другий шлях – обробка поверхонь інструментом з нефриту. Обробка поверхонь трибоелементів проводилась на скляній плиті, навантаження  $0,1 \text{ Н/см}^2$ , швидкість ковзання  $1,35 \text{ м/с}$ , час обробки  $14 \text{ сек}$ , робоче середовище – авіаційний гас. Третій шлях – послідовне поєднання цих двох обробок.

Для оцінки ефективності кожного з цих видів модифікації поверхні, проводили випробування на зносостійкість при навантаженні  $3,0 \text{ МПа}$  (умови згідно підрозділу 2.2) та порівнювали результати з такими ж випробуваннями базової ТС (без модифікації поверхні).

Для порівняння випробували такі трибосистеми: «сталь – бронза» (база); «сталь – бронза+фінішна обробка нефритом» (далі – «бронза+нефрит»); «сталь – бронза+фінішна обробка карбідом кремнію» (далі – «бронза+карбід кремнію»); «сталь – бронза+ карбід кремнію+нефрит» (далі – бронза+ПШ 02-17).

Умови випробувань наведено у п. 2.2.2.

Середні результати досліджень базової ТС (без модифікації поверхні) наведено на рис. 4.1-4.4.

Коефіцієнт тертя в процесі зношування знижується від  $0,15$  до  $0,06$  (рис. 4.1). За весь період випробувань за параметрами АЕ (рис. 4.3) фіксувався значний рівень швидкості зношування. Зносу піддавався в основному бронзовий зразок (рис. 4.4).

Аналіз значень мікротвердості (згідно п. 2.3.1) (табл. 4.1) показує, що після випробувань у поверхневому шарі мікротвердість зменшується, а у підповерхневому – збільшується.

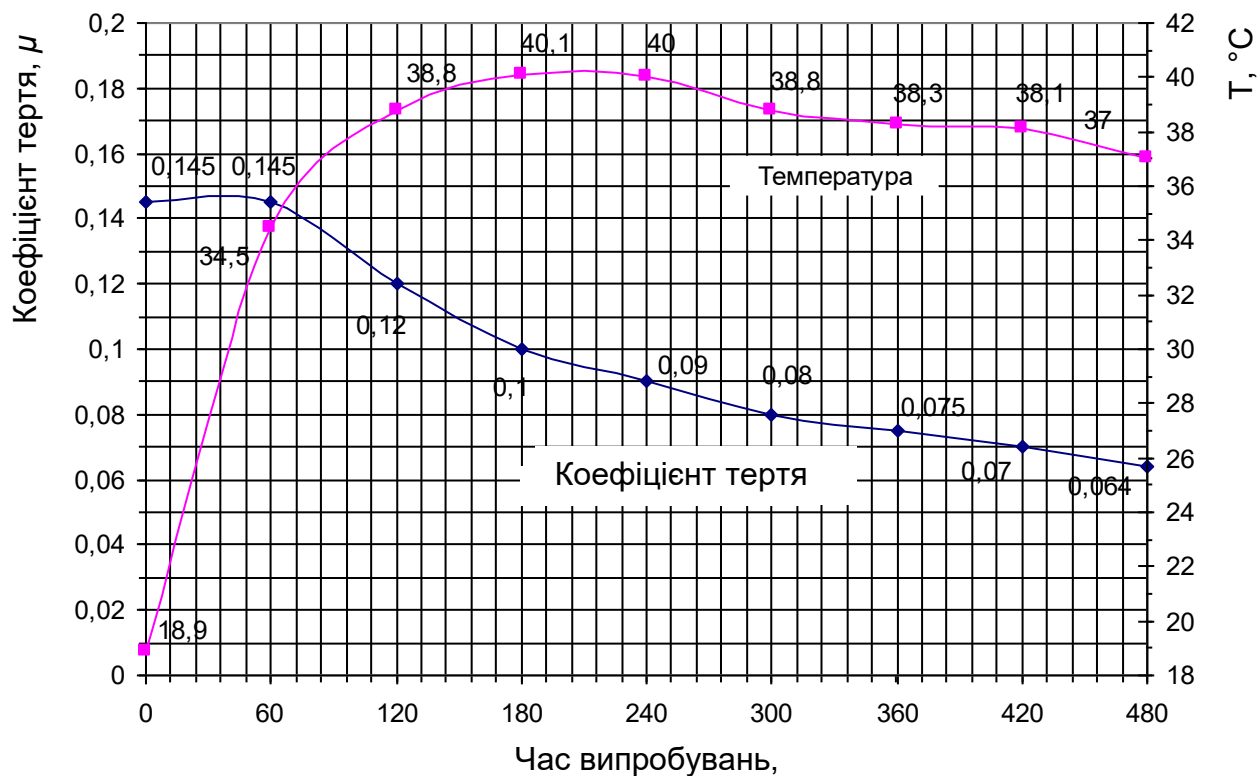


Рис. 4.1. Коефіцієнт тертя і температура в зоні контакту базової трибосистеми за часом

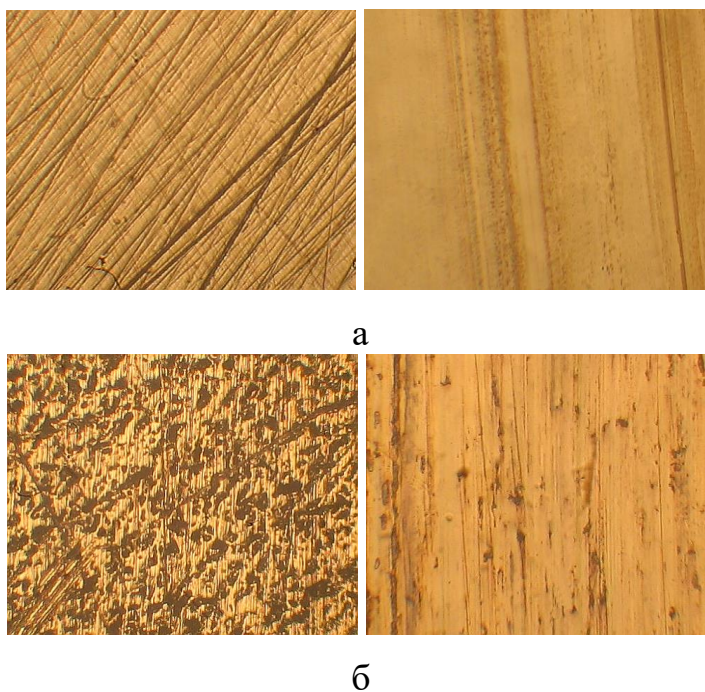


Рис. 4.2. Фрактографія поверхні трибоелементів  $\times 250$ : а – сталь до і після випробувань; б – бронза до і після випробувань

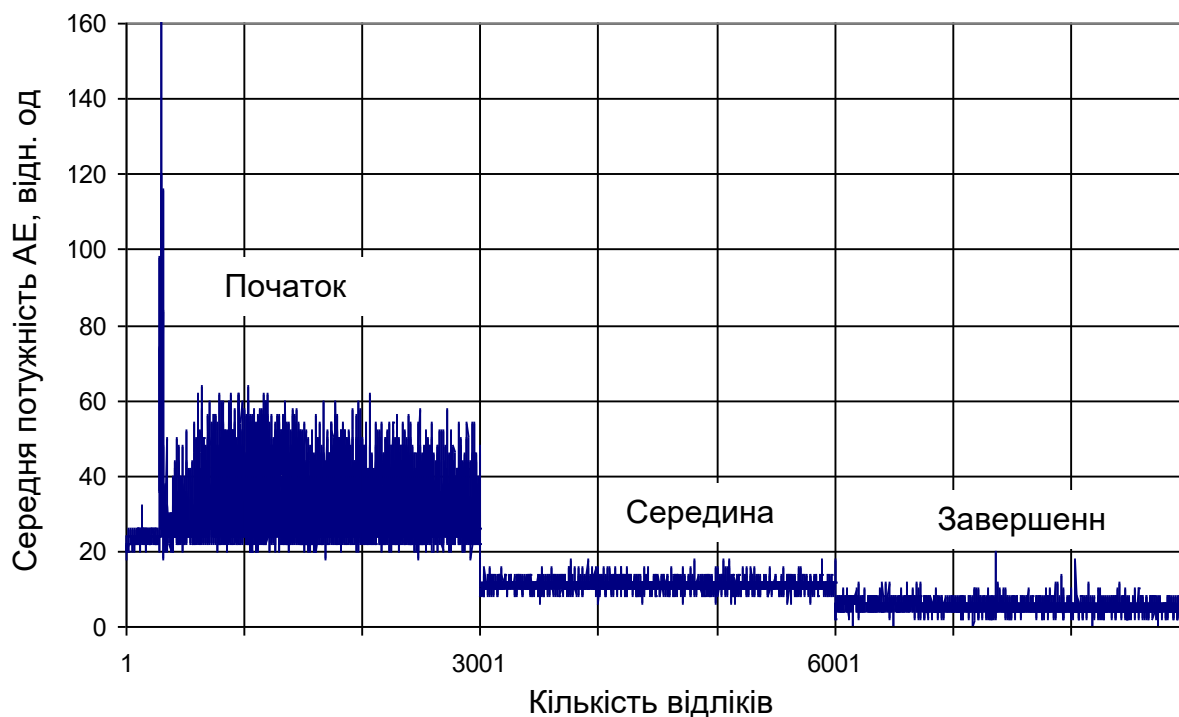


Рис. 4.3. Рівень акустичної емісії базової трибосистеми за часом випробувань

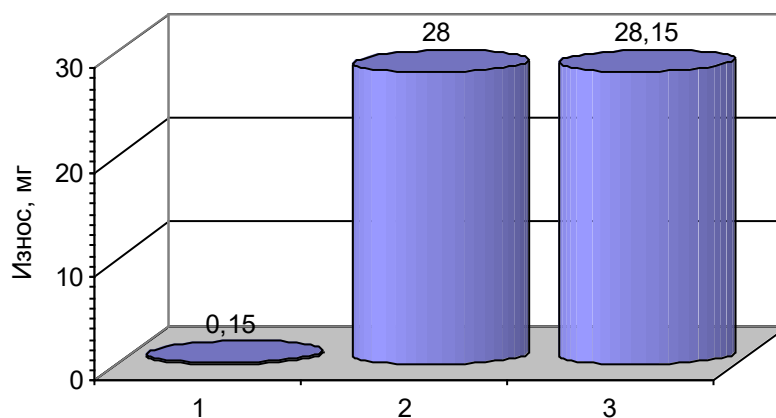


Рис. 4.4. Зношування трибоелементів базової трибосистеми «сталь 30X3BA– бронза ВБ23НЦ» за 8 годин випробувань:

1 – сталь 30X3BA; 2 – бронза ВБ23НЦ; 3 – сумарне зношування

Таблиця 4.1

Мікротвердість по глибині поверхневого шару базових бронзових зразків (без модифікування)

| Бронза ВВ23НЦ безабразивна фінішна обробка<br>(базові зразки без модифікування) | Навантаження, Н                      |      |      |
|---|--------------------------------------|------|------|
|   | 0,5                                  | 1,0  | 2,0  |
| До випробувань  | Мікротвердість, Н <sub>μ</sub> (МПА) |      |      |
|   | 2294                                 | 2966 | 2082 |
|   | Глибина відбитку, мкм                |      |      |
| Після випробувань   | Мікротвердість, Н <sub>μ</sub> (МПА) |      |      |
|   | 1984                                 | 3122 | 2406 |
|   | Глибина відбитку, мкм                |      |      |
|   | 3,1                                  | 3,8  | 5,6  |

Середні результати досліджень трибосистеми, модифікованої карбідом кремнію, наведено на рис. 4.5-4.8.

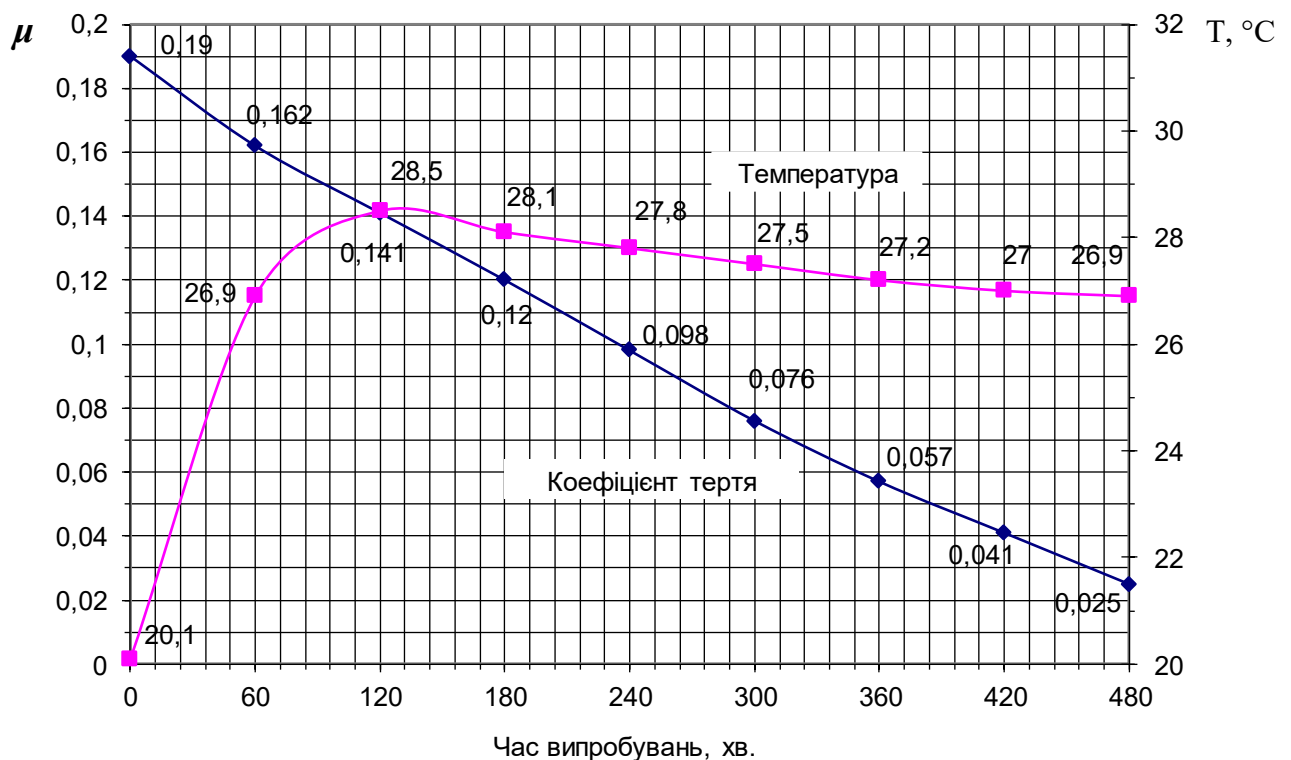


Рис. 4.5. Коефіцієнт тертя і температура в зоні контакту трибосистеми, модифікованої карбідом кремнію, за часом



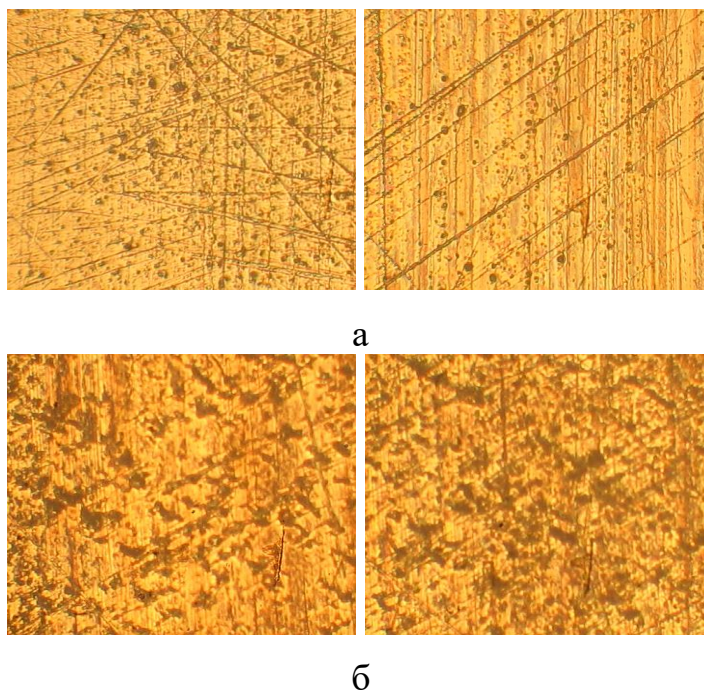


Рис. 4.6. Фрактографія поверхні трибоелементів трибосистеми, модифікованої карбідом кремнію,  $\times 250$ :

а – сталь до і після випробувань; б – бронза до і після випробувань

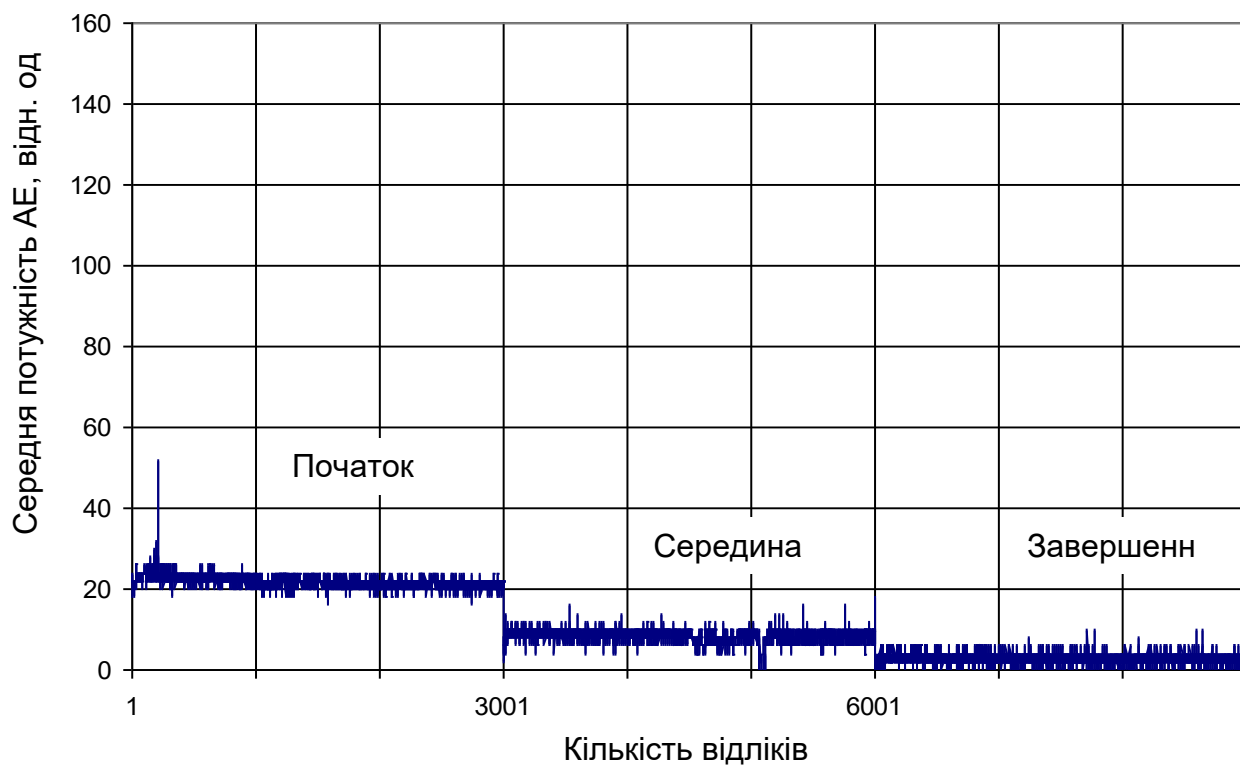


Рис. 4.7. Рівень акустичної емісії трибосистеми, модифікованої карбідом кремнію, за часом випробувань

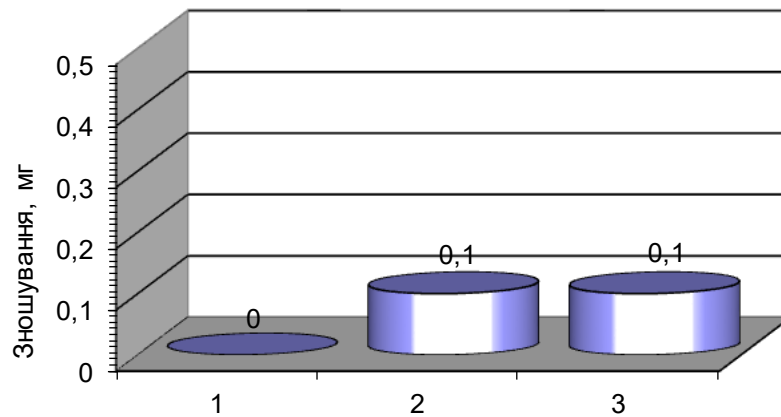


Рис. 4.8. Зношування трибоелементів трибосистеми «30X3BA–  
VB23НЦ+карбід кремнію» за 8 годин випробувань:

1 – сталь 30X3BA; 2 – бронза VB23НЦ+карбід кремнію; 3 – сумарне зношування

Дана ТС на завершальному етапі випробувань за параметрами зносостійкості має показники аномально низького тертя та зношування (рис. 4.5, 4.7, 4.8), що також підтверджується діаграмою АЕ (рис. 4.7).

Аналіз значень мікротвердості (згідно п. 2.3.1) (табл. 4.2) показує, що модифікування карбідом кремнію підвищує мікротвердість більш ніж у 2 рази і після випробувань мікротвердість поверхневого шару незначно зменшується.

Таблиця 4.2

Мікротвердість по глибині поверхневого шару бронзових зразків, модифікованих карбідом кремнію

| Бронза VB23НЦ, модифікування карбідом кремнію | Навантаження, Н                      |      |      |
|---|--------------------------------------|------|------|
|   | 0,5                                  | 1,0  | 2,0  |
| До випробувань                                | Мікротвердість, Н <sub>μ</sub> (МПА) |      |      |
|   | 7238                                 | 7133 | 6195 |
|   | Глибина відбитку, мкм                |      |      |
| Після випробувань                             | 1,71                                 | 2,4  | 3,7  |
|   | Мікротвердість, Н <sub>μ</sub> (МПА) |      |      |
|   | 7132                                 | 6970 | 5950 |
| Глибина відбитку, мкм                         |                                      |      |      |
|   | 1,86                                 | 2,46 | 3,8  |

Середні результати експериментальних досліджень ТС, модифікованої нефритом, наведено на рис. 4.9-4.12.

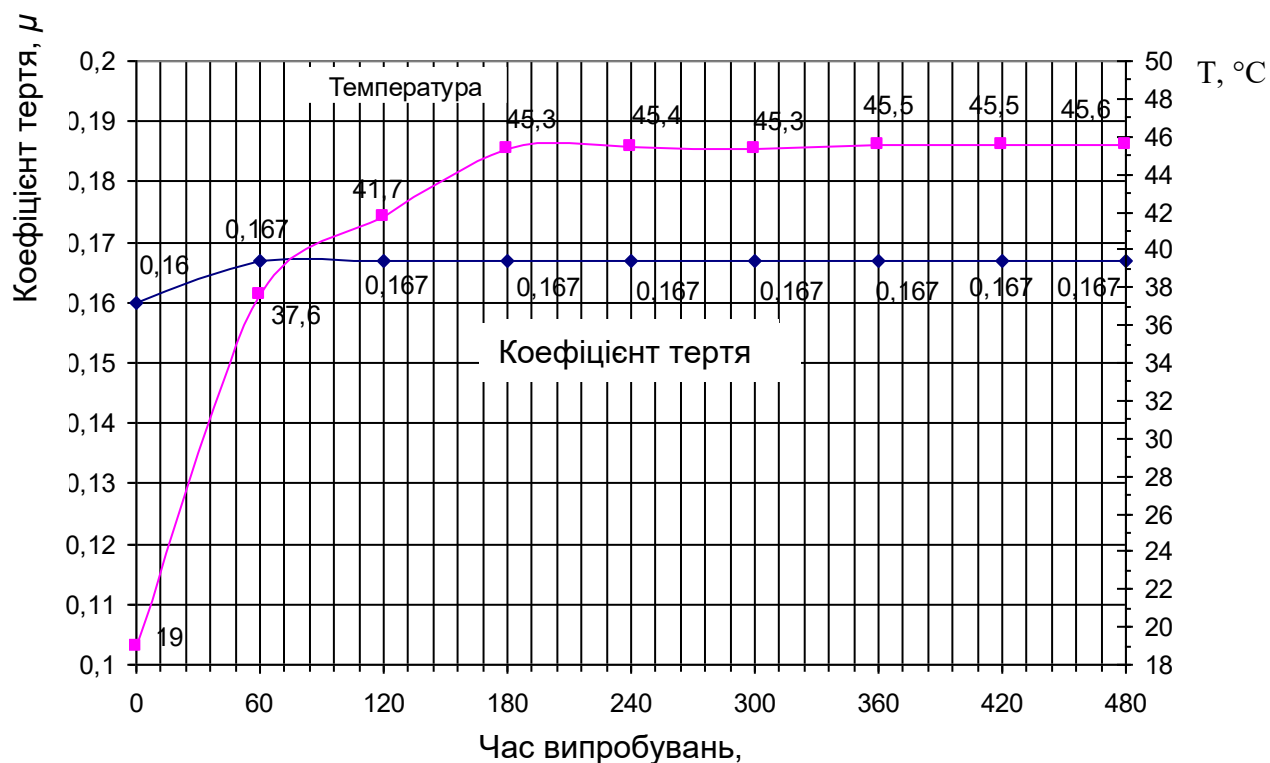


Рис. 4.9. Коефіцієнт тертя і температура в зоні контакту трибосистеми, модифікованої нефритом, за часом

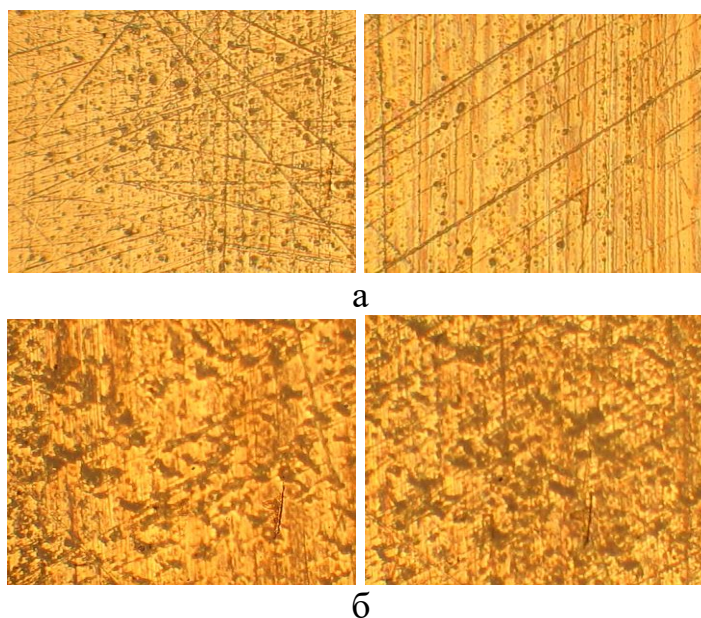


Рис. 4.10. Фрактографія поверхні трибоелементів трибосистеми, модифікованої нефритом,  $\times 250$ :

а – сталь до і після випробувань; б – бронза до і після випробувань

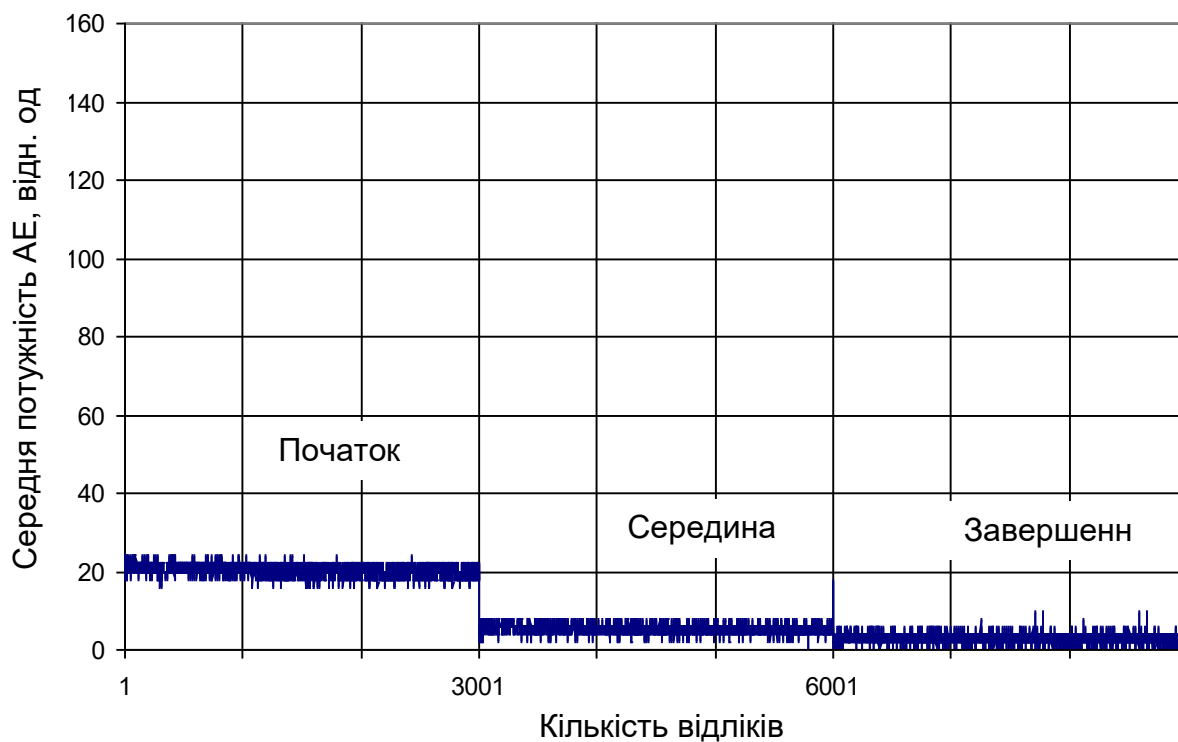


Рис. 4.11. Рівень акустичної емісії трибосистеми, модифікованої нефритом, за часом випробувань

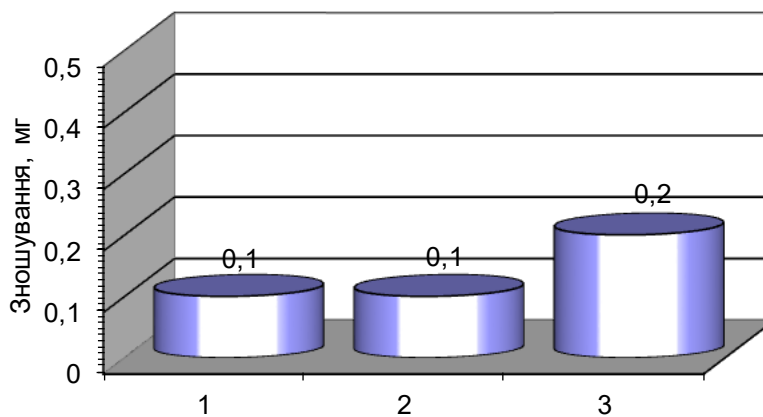


Рис. 4.12. Зношування трибоелементів трибосистеми «30X3VA–ВБ23НЦ+нефрит» за 8 годин випробувань:

1 – сталь 30X3VA; 2 – бронза ВБ23НЦ+нефрит; 3 – сумарне зношування

Аналіз значень мікротвердості (згідно п. 2.3.1) (табл. 4.3) показує, що при модифікуванні нефритом мікротвердість менше, ніж при модифікуванні карбідом кремнію і після випробувань мікротвердість поверхневого шару також незначно зменшується.

Таблиця 4.3

Мікротвердість по глибині поверхневого шару бронзових зразків, модифікованих нефритом

| Бронза ВБ23НЦ, модифікування нефритом | Навантаження, Н                      |      |      |
|---------------------------------------|--------------------------------------|------|------|
|                                       | 0,5                                  | 1,0  | 2,0  |
| До випробувань                        | Мікротвердість, Н <sub>μ</sub> (МПА) |      |      |
|                                       | 6332                                 | 5985 | 5080 |
|                                       | Глибина відбитку, мкм                |      |      |
| Після випробувань                     | Мікротвердість, Н <sub>μ</sub> (МПА) |      |      |
|                                       | 5607                                 | 5520 | 4905 |
|                                       | Глибина відбитку, мкм                |      |      |
|                                       | 2,5                                  | 3,1  | 3,9  |

ТС має високі триботехнічні показники, але гірші, ніж при модифікуванні карбідом кремнію за рахунок наявності незначного зношування сталевого зразка.

Середні результати досліджень ТС, модифікованих послідовною обробкою карбідом кремнію та нефритом, наведено на рис. 4.13-4.16.

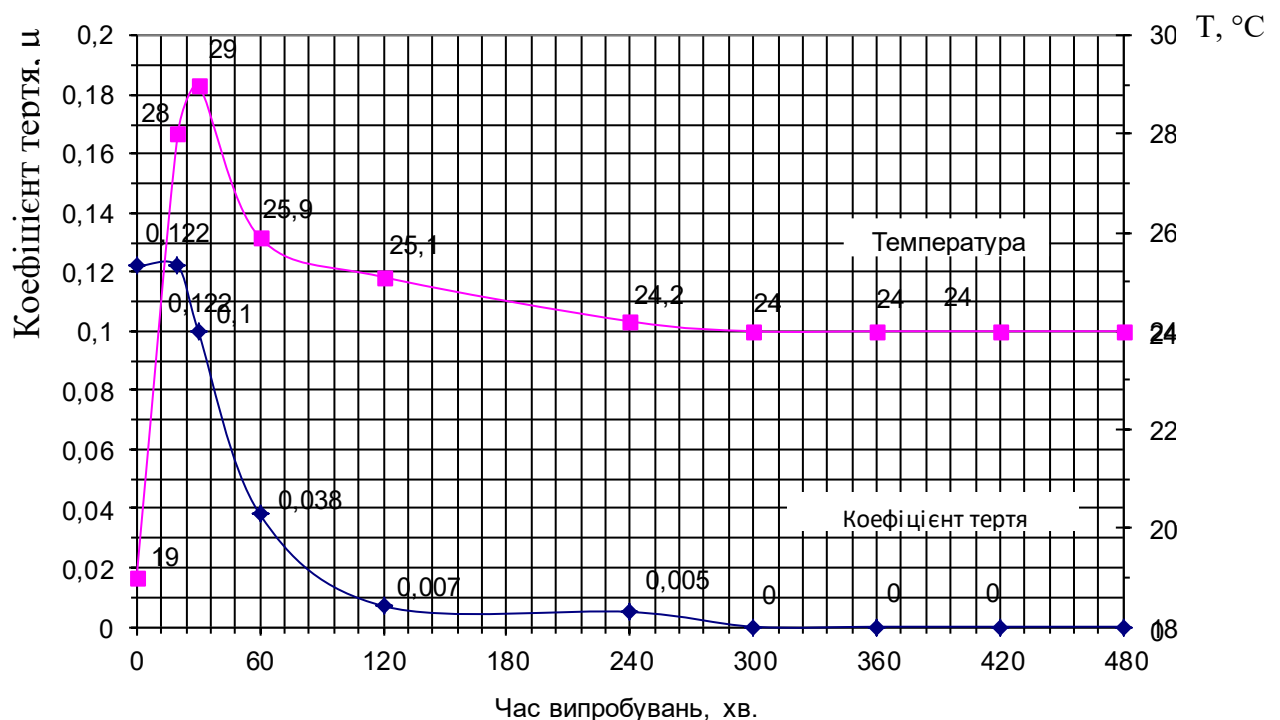


Рис. 4.13. Коефіцієнт тертя і температура в зоні контакту трибосистеми, модифікованої послідовно карбідом кремнію та нефритом, за часом

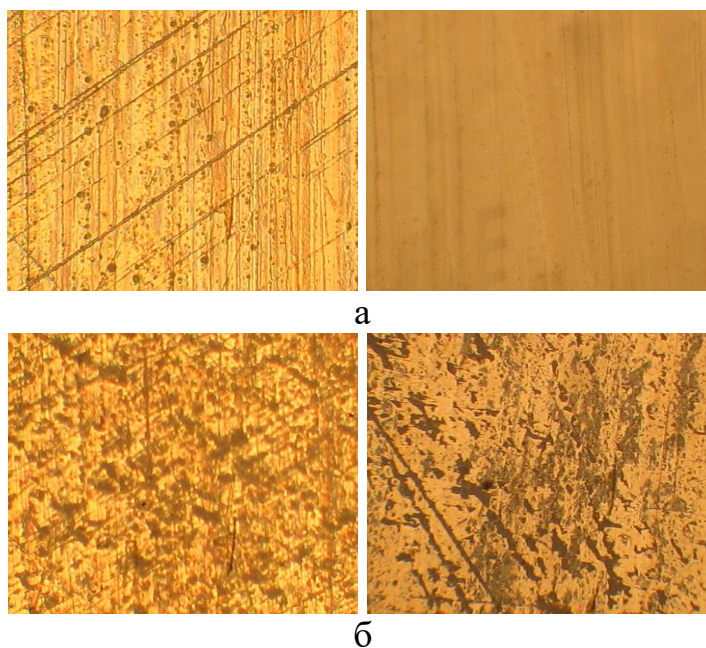


Рис. 4.14. Фрактографія поверхні трибоелементів трибосистеми, модифікованої послідовно карбідом кремнію та нефритом,  $\times 250$ : а – сталь до і після випробувань; б – бронза до і після випробувань

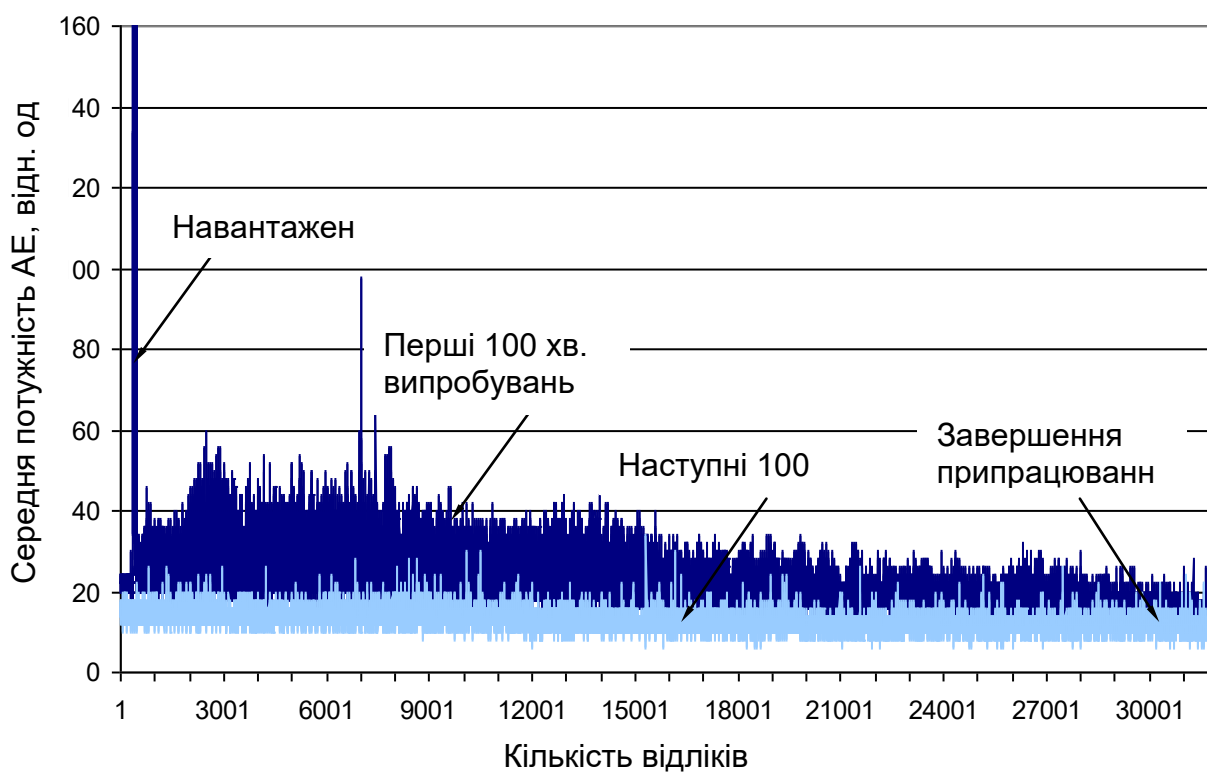


Рис. 4.15. Рівень акустичної емісії трибосистеми, модифікованої послідовно карбідом кремнію та нефритом, за часом випробувань



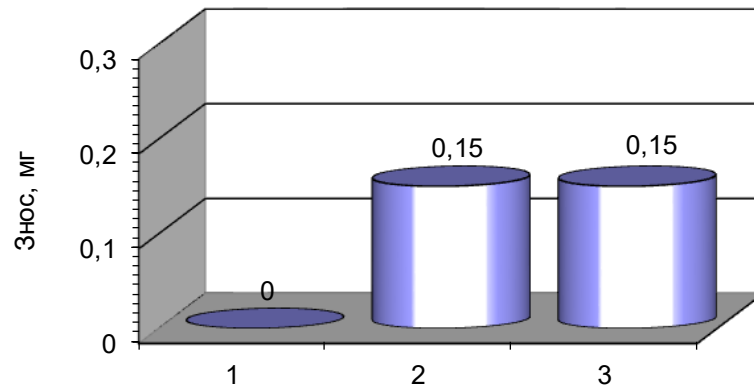


Рис. 4.16. Зношування трибоелементів ТС сталь 30X3VA азотована – бронза ВБ23НЦ+ нефрит за 8 годин випробувань:

1 – сталь 30X3VA; 2 – бронза ВБ23НЦ + нефрит; 3 – сумарне зношування

Даний вид модифікування поверхневого шару дозволяє перейти до аномально низького тертя та зношування (рис. 4.13, 4.15, 4.16).

Аналіз значень мікротвердості (згідно п. 2.3.1) (табл. 4.4) показують, що модифікування послідовною обробкою карбідом кремнію та нефритом приводить до результатів, схожих до тих, які досягаються при модифікуванні карбідом кремнію і після випробувань мікротвердість поверхневого шару також незначно зменшується. Але по глибині поверхневого шару формується підповерхневий проміжний шар зі збільшеними пружно-пластичними характеристиками. Він м'якше за поверхневий та м'якше за той, що лежить під ним.

Таблиця 4.4

Мікротвердість по глибині поверхневого шару бронзових зразків, модифікованих послідовною обробкою карбідом кремнію та нефритом

| Бронза ВБ23НЦ, модифікування послідовною обробкою карбідом кремнію та нефритом | Навантаження, Н                      |      |      |
|--|--------------------------------------|------|------|
|  | 0,5                                  | 1,0  | 2,0  |
| До випробувань   | Мікротвердість, Н <sub>μ</sub> (МПА) |      |      |
|  | 7470                                 | 5822 | 6352 |
|  | Глибина відбитку, мкм                |      |      |
|  | 1,56                                 | 2,5  | 3,9  |
| Після випробувань  | Мікротвердість, Н <sub>μ</sub> (МПА) |      |      |
|  | 7420                                 | 5936 | 6345 |
|  | Глибина відбитку, мкм                |      |      |
|  | 1,55                                 | 2,45 | 3,9  |

Результати порівняльних випробувань (рис. 4.17, 4.18) показали, що фінішна обробка бронзових зразків з використанням карбїду кремнію призводить до істотного зниження зносу (у 29 разів) та коефіцієнту тертя (у 2,7 рази); при використанні нефриту – зниження зносу (до 15 разів) та коефіцієнту тертя (у 1,4 рази).

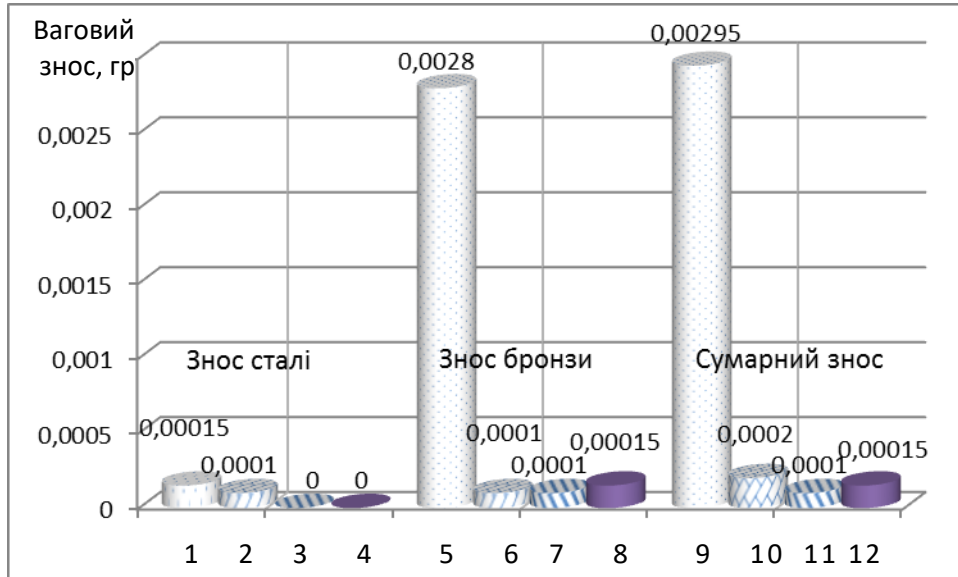


Рис. 4.17. Вагове зношування елементів трибосистем:

- 1, 5, 9 – бронза ВБ23НЦ – сталь 30Х3ВА (база);
- 2, 6, 10 – бронза ВБ23НЦ + нефрит – сталь 30Х3ВА;
- 3, 7, 11 – бронза ВБ23НЦ+карбїд кремнію – сталь 30Х3ВА;
- 4, 8, 12 – бронза ВБ23НЦ + нефрит + карбїд кремнію – сталь 30Х3ВА

Проведений аналіз мікросорсткостей поверхонь зразків до та після випробувань показав, що шорсткість сталевих зразків змінювалася незначно, тому для аналізу її не використовували. В той же час при модифікуванні бронзових зразків шорсткість значно відрізнялася (рис. 4.19). При подвійному модифікуванні карбїдом кремнію та нефритом після випробувань вона зменшувалась у 2,6 разів.

Обробка кремнієм формує підповерхневий пружно-пластичний шар (на глибині від 2,5 до 4,0 мкм), а на завершальному етапі при обробці інструментом з нефриту формується пружний поверхневий шар (до глибини 1,6 мкм), що дозволяє отримати реологічну будову поверхні тертя найбільш наближену до моделі Шведова.



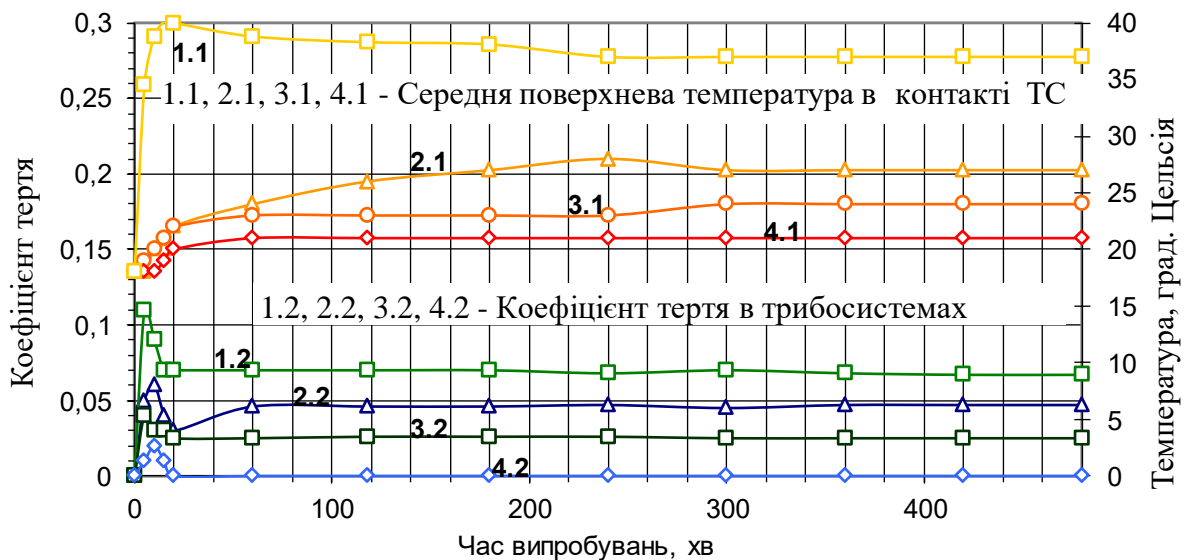


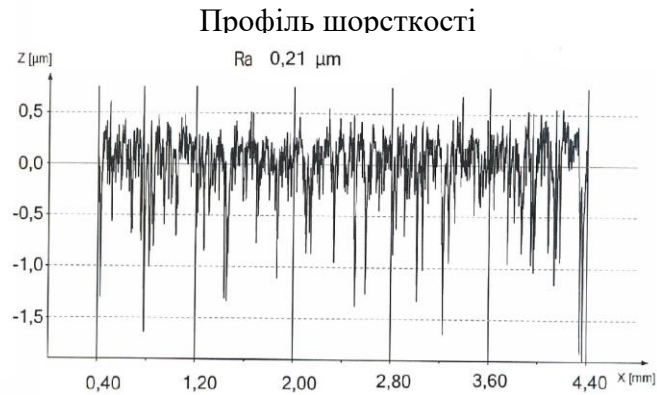
Рис. 4.18. Коефіцієнт тертя і середня поверхнева температура в зоні контактування трибосистеми «бронза ВБ23НЦ – сталь 30Х3ВА» за часом:

- 1.1, 1.2 – бронза ВБ23НЦ – сталь 30Х3ВА (база);
- 2.1, 2.2 – бронза ВБ23НЦ + нефрит – сталь 30Х3ВА;
- 3.1, 3.2 – бронза ВБ23НЦ + карбід кремнію – сталь 30Х3ВА;
- 4.1, 4.2 – бронза ВБ23НЦ+ПИ 02-17– сталь 30Х3ВА

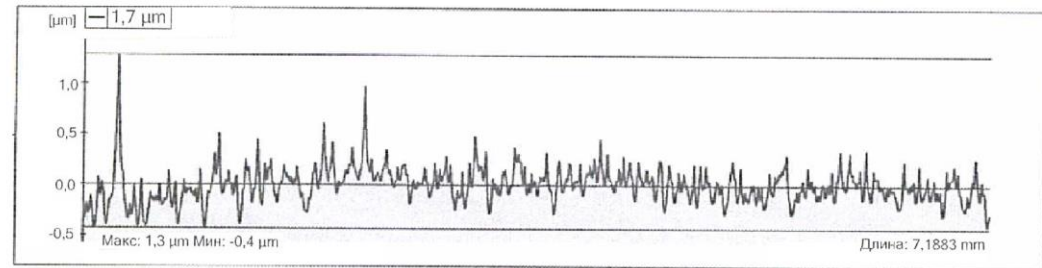
У розділі 3 було показано, при формуванні такої реологічної будови збільшується об'ємна щільність потенційної енергії  $E_p$ , яка накопичується в підповерхневому шарі трибоелементів в результаті адгезійної та деформаційної взаємодії (формула 3.9). Збільшується і загальна енергія в результаті пружної взаємодії мікрошорсткості (формула 3.10), що дає можливість досягнення рівності молекулярно-механічної та хвильової складових сили тертя, тобто досягнення умов аномально низького тертя та зношування.

Це підтверджено дослідженням мікротвердості поверхневого шару по глибині (табл. 4.1-4.4). Після подвійного послідовного модифікування мікротвердість поверхневого шару бронзи досягає значень, близьких до сталі (7470 МПа). Це пов'язано зі змінами хімічного складу поверхонь після модифікування (рис. 4.20) (збільшення вмісту кремнію у 100 разів у порівнянні з базовою бронзою до модифікування (з 0,02% (див. табл. 2.2) до 1,96%).

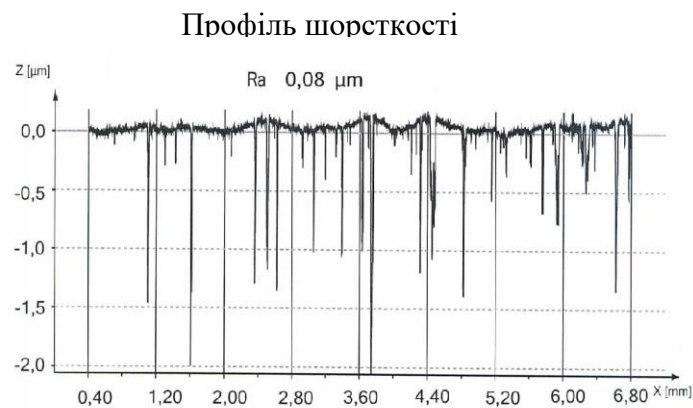
До випробувань



Профіль поверхні



Після випробувань



Профіль поверхні

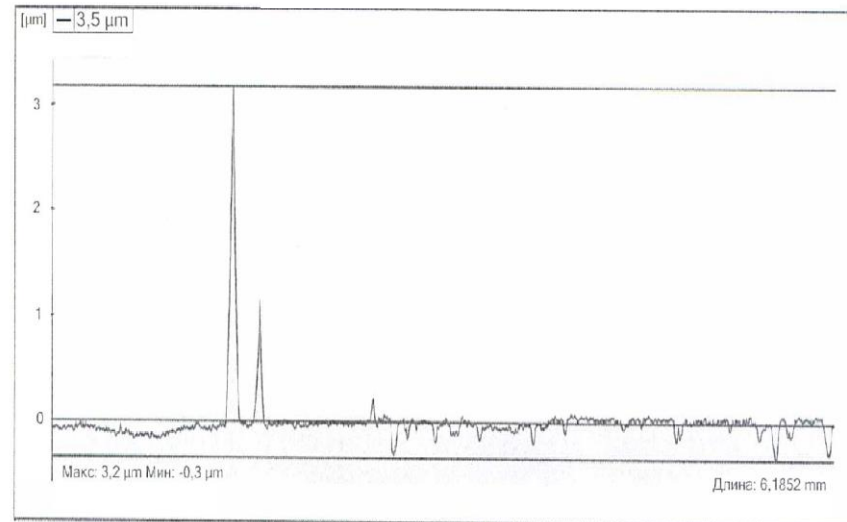


Рис. 4.19. Порівняльний аналіз шорсткостей поверхонь, модифікованих послідовною обробкою карбідом кремнію та нефритом до та після випробувань

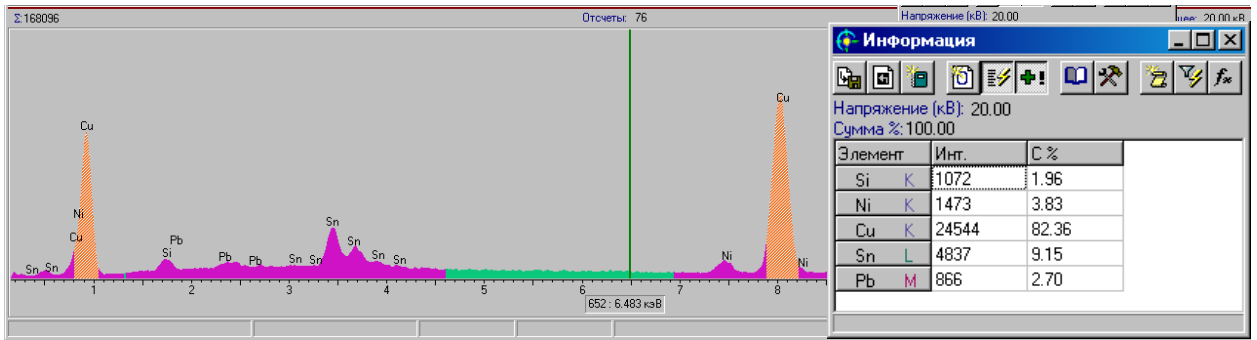


Рис. 4.20. Хімічний аналіз поверхні бронзового зразка після подвійного послідовного модифікування

Однак при модифікуванні спостерігається збільшення часу припрацювання (рис. 4.18) (він складає від 40 до 60 хвилин). Це можна пояснити тим, що шорсткість після такої обробки значно більша, ніж та, при якій досягається АНТЗ. Внаслідок цього ТС витрачає певний додатковий час на перехід до енергетично вигідних умов АНТЗ. Тобто модифікування сприяє досягненню цих умов, але за певний проміжок часу. Ці результати пояснюють наявність у модифікованих ТС зносу, який з'являється за час припрацювання. Для зменшення часу припрацювання доцільно оптимізувати режим завершальної обробки нефритом для досягнення значень шорсткості, близьких до тих, які забезпечують АНТЗ.

#### 4.2 Оптимізація параметрів модифікування бронзових зразків на завершальному етапі фінішної обробки (обробка нефритом)

Фінішну обробку поверхонь тертя при модифікуванні нефритом (після оптимізації параметрів модифікування) проводили на машині тертя 2070 СМТ-1 (рис. 4.21).

Основним параметром контролю якості безбразивної фінішної обробки, що прийнята на сьогоднішній день в агрегатобудуванні, являється шорсткість поверхневого шару трибоелементів. Тому оптимізацію параметрів режиму обробки (навантаження, швидкість ковзання, час припрацювання) проводили у відповідності до оптимізації параметрів шорсткості ( $Ra$ ) в межах 0,04...0,08, що відповідає вимогам технологічної документації з виготовлення прецизійних пар тертя в агрегатобудуванні.

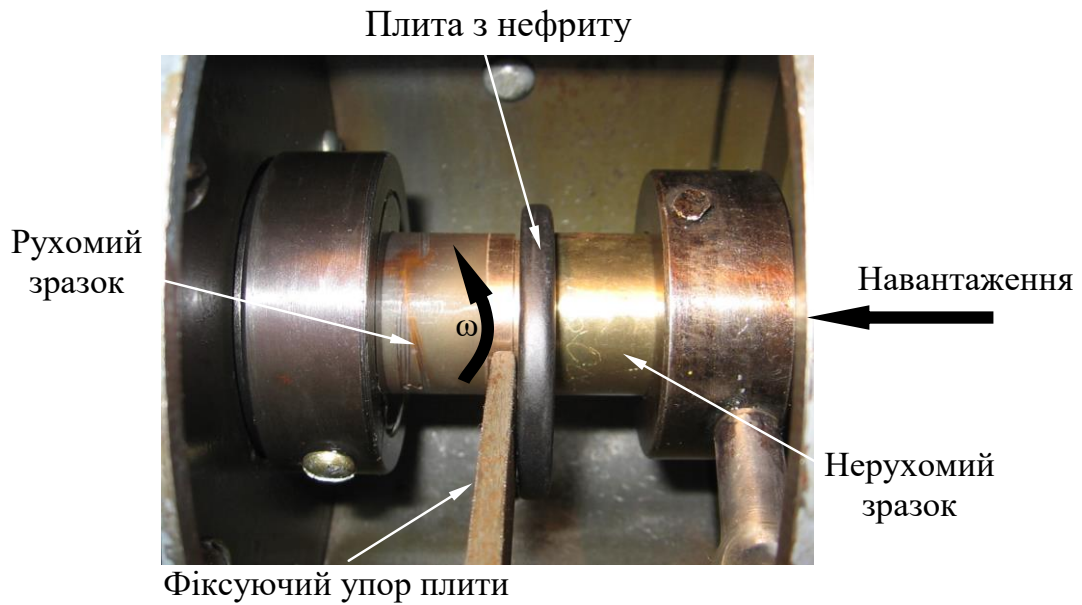


Рис. 4.21. Моделювання режимів двостадійної фінішної обробки для модифікації поверхонь на модернізованій машині тертя 2070 СМТ-1

Оптимізацію досягнення параметрів шорсткості на заключній стадії обробки проводили на зразках з бронзи ВБ23НЦ після безабразивної фінішної обробки, рис. 4.22.

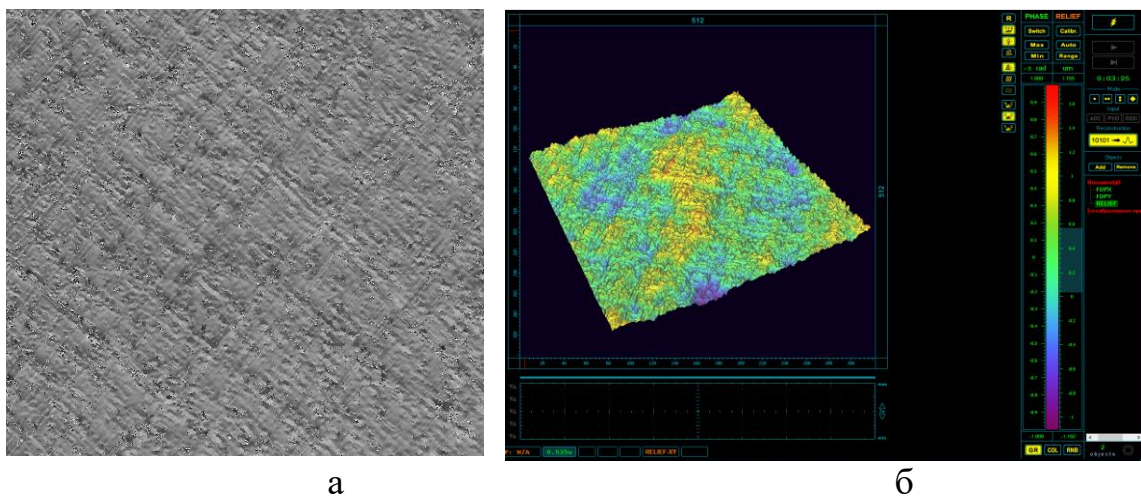


Рис. 4.22. Фрактографія поверхневого шару ВБ23НЦ після безабразивної фінішної обробки: а – мікрофотографія  $\times 500$ ; б – 3D-зображення

Загальні параметри шорсткості поверхневого шару базового бронзового зразка (після безабразивної фінішної обробки) наведено на рис. 4.23. Таблиця є сканкопією з інтерфейсу приладу TR200 JENOPTIK, тому представлена як рисунок.

| Параметры              | Количество измерений | Среднее значение | Среднеквадратическое отклонение | Доверительные границы интервала значений параметра при P=0.970 |
|------------------------|----------------------|------------------|---------------------------------|--|
| Минимум профиля, мкм   | 512                  | 0.157            | 0.044 (13.64%)                  | 0.083 (52.74%)   |
| Максимум профиля, мкм  | 512                  | 0.480            | 0.037 (11.59%)                  | 0.070 (14.69%)   |
| Диап. изм. высоты, мкм | 512                  | 0.323            | 0.050 (15.37%)                  | 0.093 (28.98%)   |
| Ra, мкм                | 512                  | 0.052            | 0.010 (19.87%)                  | 0.019 (37.45%)   |
| Rmax, мкм              | 512                  | 0.319            | 0.047 (14.73%)                  | 0.089 (27.77%)   |
| Rz, мкм                | 512                  | 0.265            | 0.040 (15.05%)                  | 0.075 (28.37%)   |
| Sm, мкм                | 512                  | 19.396           | 6.789 (35.00%)                  | 12.797 (65.97%)  |
|                        |                      |                  |                                 |  |

Надёжность: 0.970

Рис. 4.23. Загальні параметри шорсткості поверхневого шару бронзового зразка після традиційної безабразивної фінішної обробки (базовий зразок)

Розподіл параметрів шорсткості по поверхні бронзового зразка після безабразивної фінішної обробки, наведено на рис. 4.24.

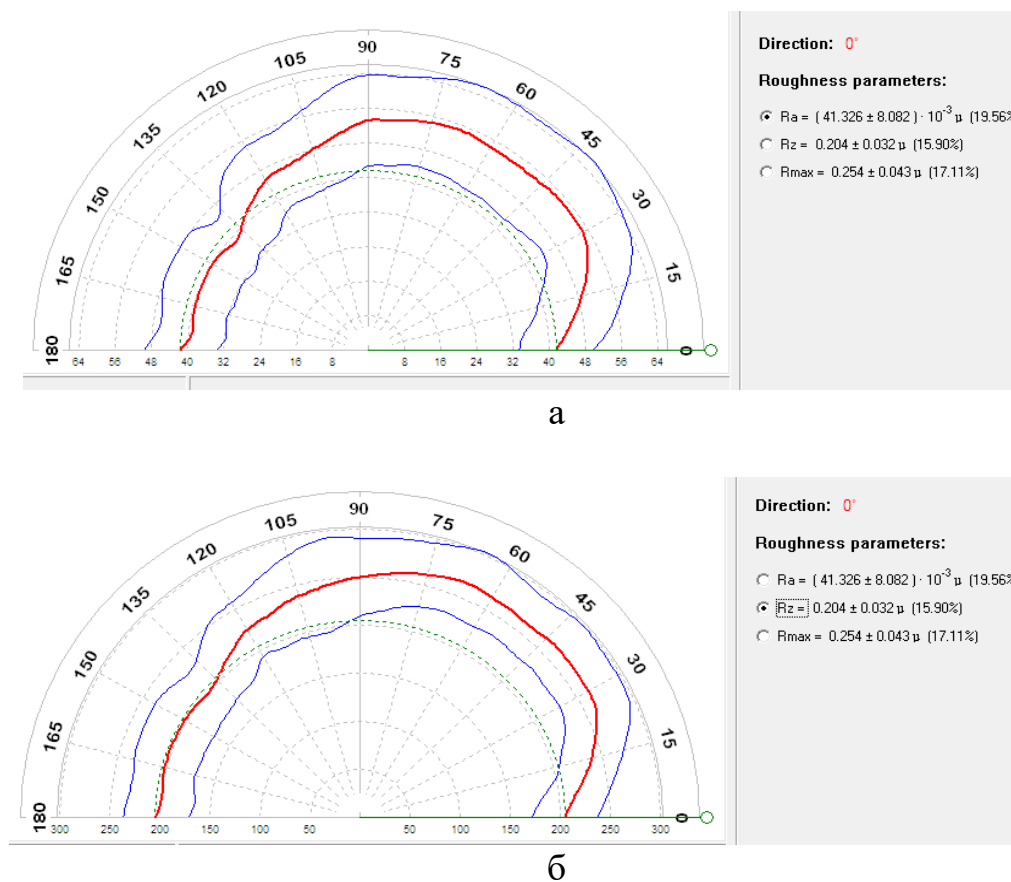


Рис. 4.24. Розподіл параметрів шорсткості по поверхні бронзового зразку після безабразивної фінішної обробки: а – параметр Ra; б – параметр Rz

Хімічний аналіз поверхні базового бронзового зразка (після безабразивної фінішної обробки) наведено на рис. 4.25.

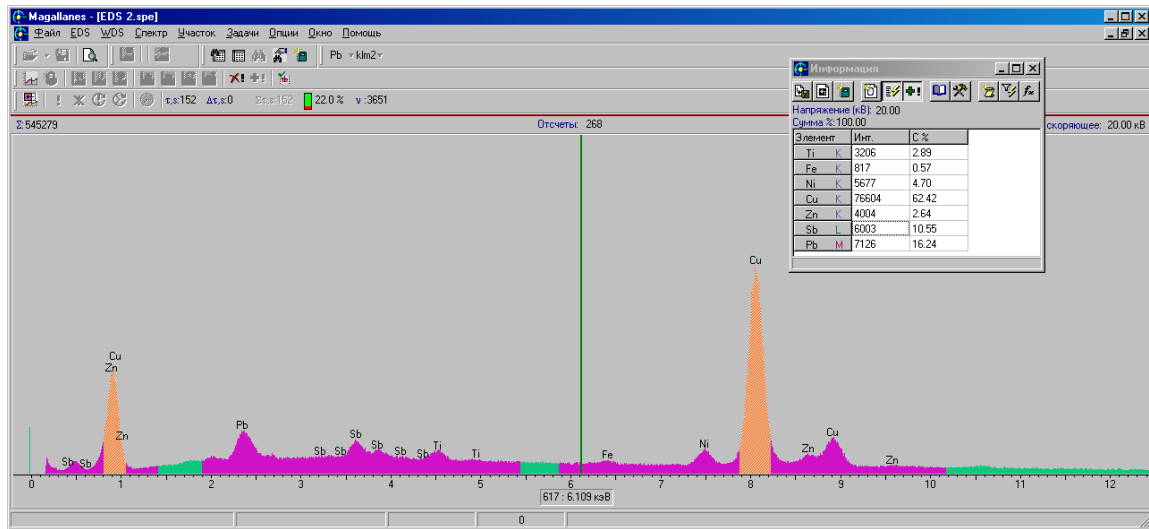


Рис. 4.25. Хімічний аналіз поверхні базового бронзового зразка

Для вирішення поставленої задачі був спланований трьохфакторний експеримент, план матриця якого представлена у другому розділі (табл. 2.6).

Перший фактор – навантаження, що прикладається до трибосистеми «нефрит-бронза» за схемою кільце-кільце, яке варіювалося від 30 до 90 Н. Другий фактор – лінійна швидкість ковзання, варіювалася від 0,5 до 1 м/с. Третій фактор – час припрацювання трибосистеми, варіювався від 3 до 10 хв. План проведення експерименту представлений в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

План проведення експерименту

| Дослід № | Фактори у натуральному масштабі |                |                | Фактори у безрозмірній системі координат |                |                |                | Вихідний параметр у |
|----------|---------------------------------|----------------|----------------|--|----------------|----------------|----------------|---------------------|
|          | Z <sub>1</sub>                  | Z <sub>2</sub> | Z <sub>3</sub> | X <sub>0</sub>                           | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> |                     |
| 1        | 30                              | 0,5            | 3              | +1                                       | -1             | -1             | -1             | 0,03                |
| 2        | 90                              | 0,5            | 3              | +1                                       | +1             | -1             | -1             | 0,044               |
| 3        | 30                              | 1              | 3              | +1                                       | -1             | +1             | -1             | 0,047               |
| 4        | 90                              | 1              | 3              | +1                                       | +1             | +1             | -1             | 0,05                |
| 5        | 30                              | 0,5            | 10             | +1                                       | -1             | -1             | +1             | 0,035               |
| 6        | 90                              | 0,5            | 10             | +1                                       | +1             | -1             | +1             | 0,03                |
| 7        | 30                              | 1              | 10             | +1                                       | -1             | +1             | +1             | 0,038               |
| 8        | 90                              | 1              | 10             | +1                                       | +1             | +1             | +1             | 0,04                |

Перевірка показала, що експериментальні дані являються нормально розподіленими і однорідними.

Розрахуємо лінійні коефіцієнти регресії за формулами (2.1):

$$b_0 = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 y_i = \frac{1}{8} (0,03 + 0,044 + 0,047 + 0,05 + 0,035 + 0,03 + 0,038 + 0,04) = 0,0393;$$

$$b_1 = \frac{1}{8} (-1 \cdot 0,03 + 1 \cdot 0,044 - 1 \cdot 0,047 + 1 \cdot 0,05 - 1 \cdot 0,035 + \\ + 1 \cdot 0,03 - 1 \cdot 0,038 + 1 \cdot 0,04) = 0,00175;$$

$$b_2 = \frac{1}{8} (-1 \cdot 0,03 - 1 \cdot 0,044 + 1 \cdot 0,047 + 1 \cdot 0,05 - 1 \cdot 0,035 - \\ - 1 \cdot 0,03 + 1 \cdot 0,038 + 1 \cdot 0,04) = 0,0045;$$

$$b_3 = \frac{1}{8} (-1 \cdot 0,03 - 1 \cdot 0,044 - 1 \cdot 0,047 - 1 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,035 + \\ + 1 \cdot 0,03 + 1 \cdot 0,038 + 1 \cdot 0,04) = -0,0035.$$

Розрахуємо коефіцієнт парної взаємодії. Для цього складемо додаткову таблицю (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

Розширена матриця планування повного факторного експерименту

| Дослід № | x <sub>0</sub> | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> | x <sub>1</sub> x <sub>3</sub> | x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> | x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> | y     |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|-------|
| 1        | +1             | -1             | -1             | -1             | +1                            | +1                            | +1                            | -1   | 0,03  |
| 2        | +1             | +1             | -1             | -1             | -1                            | -1                            | +1                            | +1   | 0,044 |
| 3        | +1             | -1             | +1             | -1             | -1                            | +1                            | -1                            | +1   | 0,047 |
| 4        | +1             | +1             | +1             | -1             | +1                            | -1                            | -1                            | -1   | 0,05  |
| 5        | +1             | -1             | -1             | +1             | +1                            | -1                            | -1                            | +1   | 0,035 |
| 6        | +1             | +1             | -1             | +1             | -1                            | +1                            | -1                            | -1   | 0,03  |
| 7        | +1             | -1             | +1             | +1             | -1                            | -1                            | +1                            | -1   | 0,038 |
| 8        | +1             | +1             | +1             | +1             | +1                            | +1                            | +1                            | +1   | 0,04  |

Коефіцієнти розрахуємо за формулами (2.2):

$$b_{12} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_1 x_2 y_i = \frac{1}{8} (+1 \cdot 0,03 - 1 \cdot 0,044 - 1 \cdot 0,047 + 1 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,035 - \\ - 1 \cdot 0,03 - 1 \cdot 0,038 + 1 \cdot 0,04) = 0,01125;$$



$$b_{13} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_1 x_3 y_i = \frac{1}{8} (+1 \cdot 0,03 - 1 \cdot 0,044 + 1 \cdot 0,047 - 1 \cdot 0,05 - 1 \cdot 0,035 + \\ + 1 \cdot 0,03 - 1 \cdot 0,038 + 1 \cdot 0,04) = -0,0025;$$

$$b_{23} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_2 x_3 y_i = \frac{1}{8} (+1 \cdot 0,03 + 1 \cdot 0,044 - 1 \cdot 0,047 - 1 \cdot 0,05 - 1 \cdot 0,035 - \\ - 1 \cdot 0,03 + 1 \cdot 0,038 + 1 \cdot 0,04) = -0,00125;$$

$$b_{123} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_1 x_2 x_3 y_i = \frac{1}{8} (-1 \cdot 0,03 + 1 \cdot 0,044 + 1 \cdot 0,047 - 1 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,035 - \\ - 1 \cdot 0,03 - 1 \cdot 0,038 + 1 \cdot 0,04) = 0,00225.$$

Отримане рівняння регресії для трьох факторів має вигляд:

$$y(x_1, x_2, x_3) = 0,0393 + 0,00175 \cdot x_1 + 0,0045 \cdot x_2 - 0,0035 \cdot x_3 + 0,01125 \cdot x_1 x_2 - \\ - 0,0025 \cdot x_1 x_3 - 0,00125 \cdot x_2 x_3 + 0,00225 \cdot x_1 x_2 x_3.$$

Перевірка значимості коефіцієнтів, що проведена за критерієм Стюдента (2.3-2.5) з використанням паралельних дослідів, показала значимість усіх коефіцієнтів отриманого рівняння. Перевірка адекватності рівняння проводилася з використанням критерію Фішера.

Після виконання перетворення з умовних значень в натуральні, визначено, що оптимальними значеннями щодо параметрів обробки поверхонь бронзових зразків нефритом до значень мікрошорсткості в межах  $Ra = 0,04 \dots 0,08$  складає: навантаження – 59 Н; лінійна швидкість ковзання – 0,816 м/с; час припрацювання – 5 хв.

Послідовність обробки поверхонь тертя бронзових зразків включала: безабразивну притирку; модифікацію поверхневого шару обробкою карбідом кремнію за технологією АТ «ФЕД»; модифікацію двохстадійною фінішною обробкою поверхневого шару карбідом кремнію та інструментом нефриту з оптимізованим режимом обробки (навантаження, швидкість ковзання, час обробки) за технологією АТ «ФЕД» (ПИ 02-17). При такій обробці відбувається додаткове насичення поверхні тертя кремнієм шляхом шаржування твердих частинок цього елемента (модуль пружності 380 ГПа, твердість 87...92 НРС) з робочої частини інструменту, виготовленого з природного мінералу групи амфіболів. Цей висновок далі було підтверджено результатами хімічного аналізу та мікротвердості за глибиною поверхневого шару. Висновок підтверджено комплексними металофізичними дослідженнями, рис. 4.26-4.29.



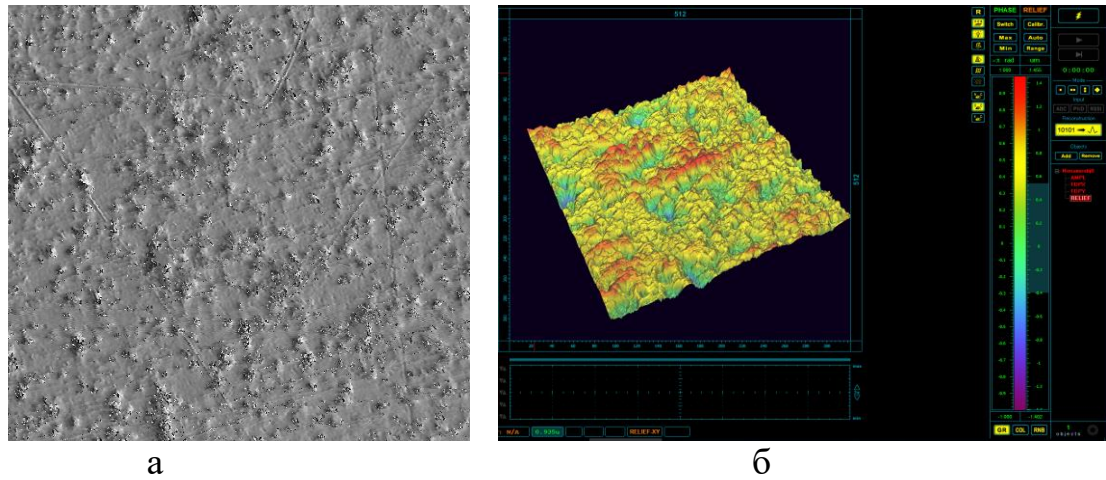


Рис. 4.26. Фрактографія поверхневого шару бронзового зразка після фінішної обробки за технологією ПИ 02-17:  
а – мікрофотографія  $\times 500$ ; б – 3D-зображення

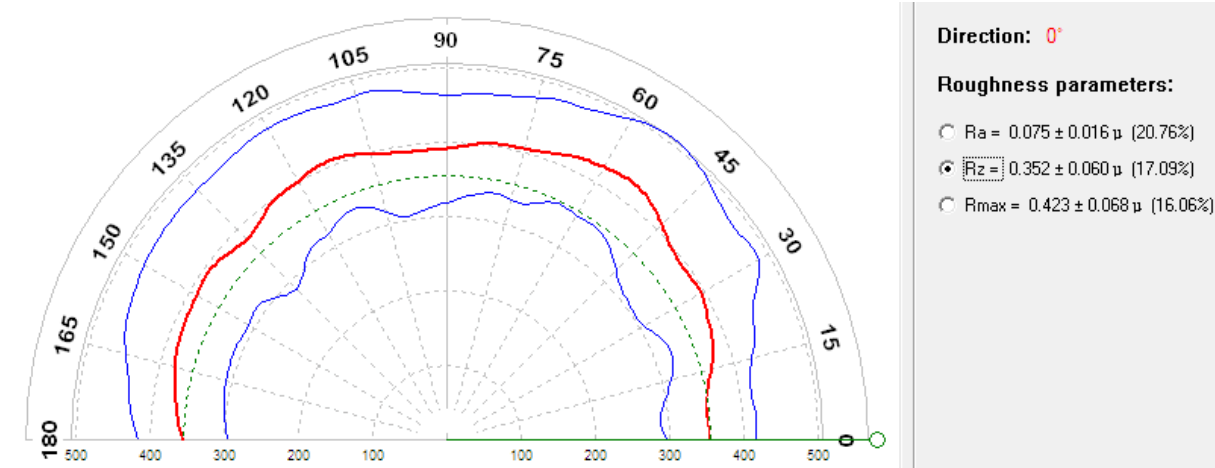
Загальні параметри шорсткості поверхневого шару бронзового зразку після фінішної обробки за технологією ПИ 02-17 наведено на рис. 4.27.

| Параметры              | Количество измерений | Среднее значение | Среднеквадратическое отклонение | Доверительные границы интервала значений параметра при $P=0.970$ |
|------------------------|----------------------|------------------|---------------------------------|--|
| Минимум профиля, мкм   | 512                  | 0.077            | 0.102 (20.21%)                  | 0.192 (247.82%)  |
| Максимум профиля, мкм  | 512                  | 0.425            | 0.038 (7.63%)                   | 0.072 (16.99%)   |
| Диап. изм. высоты, мкм | 512                  | 0.503            | 0.100 (19.80%)                  | 0.188 (37.33%)   |
| $R_a$ , мкм            | 512                  | 0.080            | 0.016 (19.34%)                  | 0.029 (36.46%)   |
| $R_{max}$ , мкм        | 512                  | 0.493            | 0.091 (18.57%)                  | 0.172 (35.00%)   |
| $R_z$ , мкм            | 512                  | 0.413            | 0.076 (18.45%)                  | 0.144 (34.78%)   |
| $S_m$ , мкм            | 512                  | 25.350           | 6.082 (23.99%)                  | 11.464 (45.22%)  |
|                        |                      |                  |                                 |  |

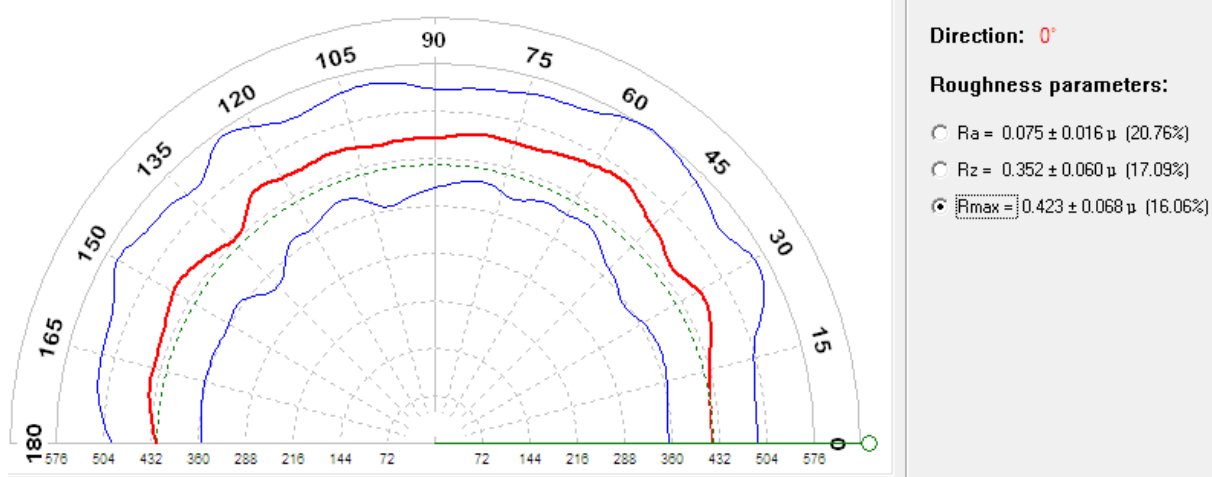
Надёжность: **0.970**

Рис. 4.27. Загальні параметри шорсткості поверхневого шару після фінішної обробки за технологією ПИ 02-17

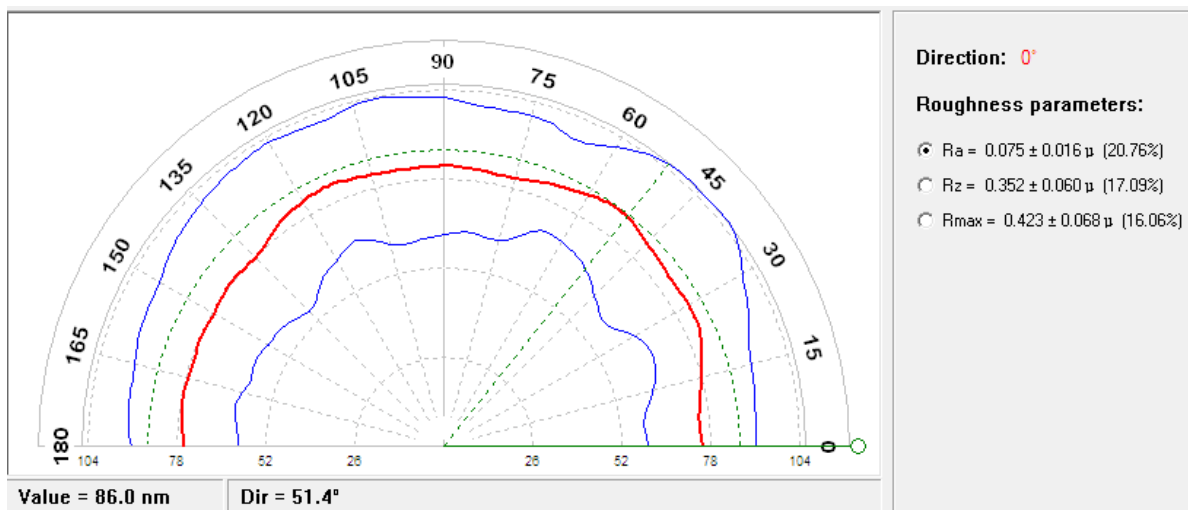
Зміни параметрів шорсткості по поверхні бронзового зразка після обробки за технологією ПИ 02-17, наведено на рис. 4.28.



а



б



в

Рис. 4.28. Зміни параметрів шорсткості по поверхні бронзового зразка після обробки за технологією ПИ 02-17:

а – параметр Ra; б – параметр Rz; в – параметр Rmax

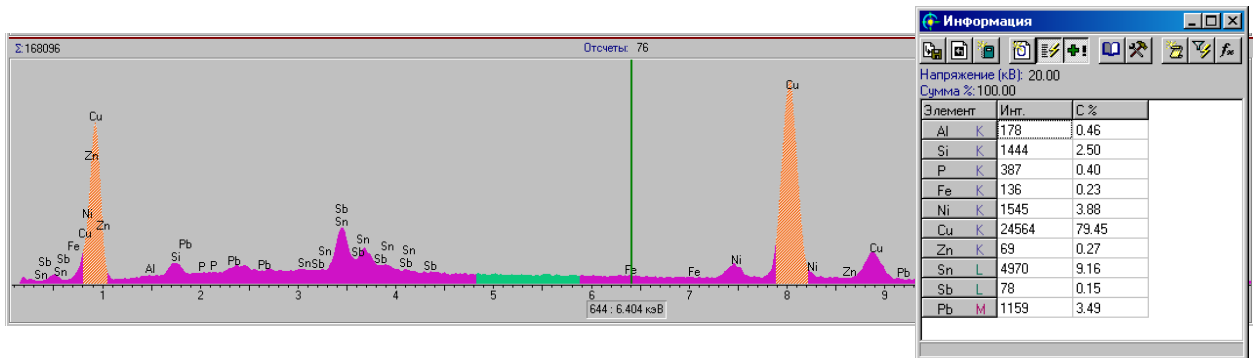


Рис. 4.29. Хімічний аналіз поверхні ВБ23НЦ + ПИ 0217

### 4.3 Визначення зносостійкості та задиростійкості (несучої здатності) трибосистем після модифікації поверхневого шару за технологією ПИ 02-17

#### 4.3.1 Результати досліджень на зносостійкість

Випробування на зносостійкість проводилися з використанням бронзи ВБ23НЦ, яка працює у менш навантажених умовах, а випробування на задиростійкість – з використанням БрО10С2НЗ, яка використовується для більш навантажених пар тертя.

Дослідження на зносостійкість проводили при навантаженнях 1,6 МПа та 3,0 МПа. Дослідження вагового зносу вимірювалося лабораторними терезами ВЛР-200 з точністю до  $10^{-4}$  грама. Знос вимірювали після 480 хвилин безперервної роботи. Додатково виконували вимірювання швидкості зношування методом АЕ за допомогою ІДС (див. підрозд. 1.4 та п. 2.3.6).

Для порівняння випробовувалися такі трибосистеми: «сталь – бронза» (база) та «сталь – бронза+ПИ 02-17». Умови випробувань наведено у п. 2.2.2.

Результати мікрогеометричних характеристик шорсткості поверхні бронзового трибоелемента до випробувань та після них під різними навантаженнями наведено у табл. 4.7.

Як вже зазначалося (див. підрозд. 4.1), аналіз результатів порівняльних випробувань показує, що фінішна обробка бронзових зразків з використанням карбіду кремнію призводить до істотного зниження зносу (у 29 разів) та коефіцієнту тертя (у 2,7 рази); при використанні нефриту – зниження зносу (до 15 разів) та коефіцієнту тертя (у 1,4 рази).

Таблиця 4.7

Середні значення мікроспорсткості бронзового зразка ВБ23НЦ перед випробуваннями та при роботі на навантаженнях 1,6 МПа та 3,0 МПа

| Умови вимірювання          | Перед випробуваннями | Після роботи під навантаженням |               |
|----------------------------|----------------------|--------------------------------|---------------|
|                            |                      | 1,6 МПа                        | 3,0 МПа       |
| Параметри                  | Величина, мкм        | Величина, мкм                  | Величина, мкм |
| Мінімум профілю            | 0,330                | 0,499                          | 0,128         |
| Максимум профілю           | 0,147                | 0,152                          | 0,470         |
| Діапазон вимірювань висоти | 0,476                | 0,651                          | 0,343         |
| $Ra$                       | 0,086                | 0,110                          | 0,055         |
| $Rmax$                     | 0,464                | 0,628                          | 0,334         |
| $Rz$                       | 0,407                | 0,544                          | 0,277         |
| $Sm$                       | 30798                | 30214                          | 23367         |

Результати попередніх експериментальних досліджень на зносостійкість досліджуваних трибосистем на всіх етапах модифікування до їх оптимізації та отримання технології ПИ 02-17 наведено на рис. 4.1-4.16.

Після оптимізації процесу модифікування, дослідження ТС, модифікованих за технологією ПИ 02-17 наведено на рис. 4.30-4.32.

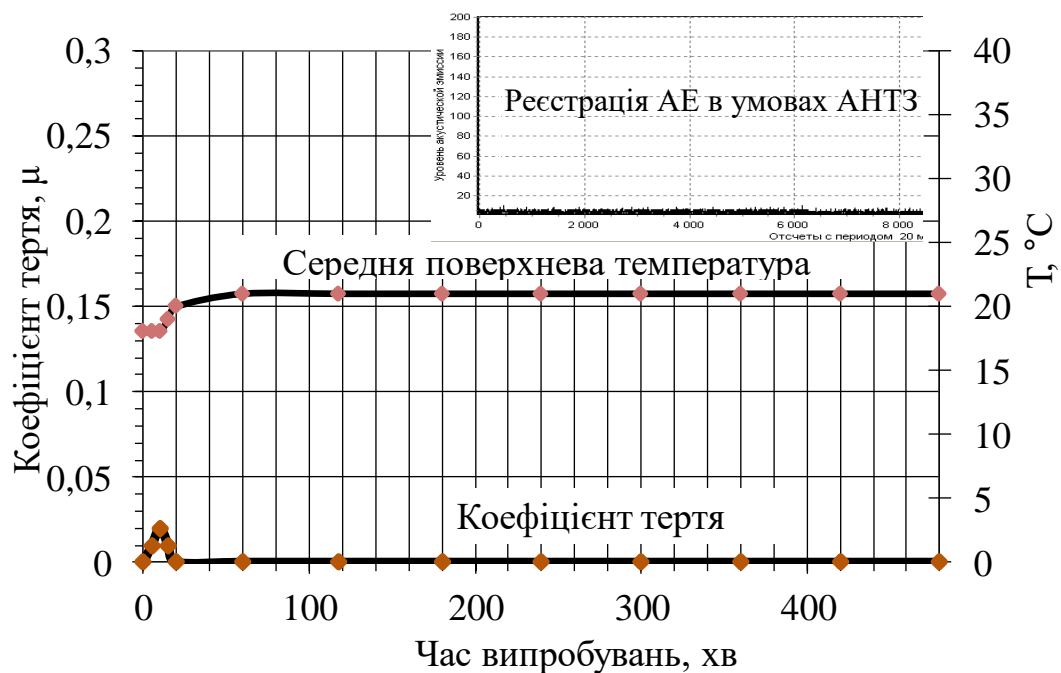


Рис. 4.30. Коефіцієнт тертя і середня поверхнева температура в зоні контактування трибосистеми, модифікованої послідовно карбідом кремнію та нефритом за технологією ПИ 02-17 (після оптимізації процесу модифікування) за часом випробувань

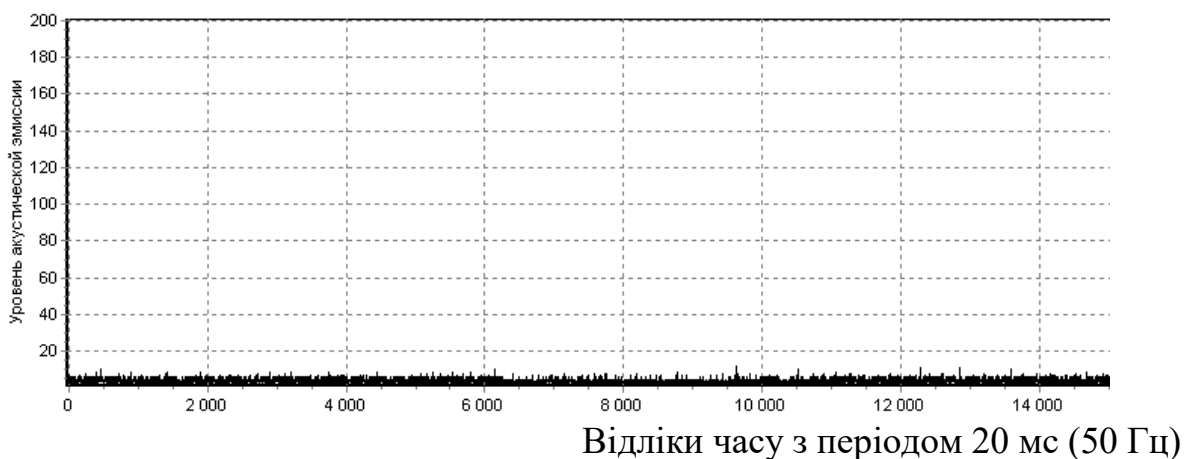


Рис. 4.31. Рівень акустичної емісії трибосистеми, модифікованої послідовно карбідом кремнію та нефритом за технологією ПИ 02-17 (після оптимізації процесу модифікування), за часом випробувань

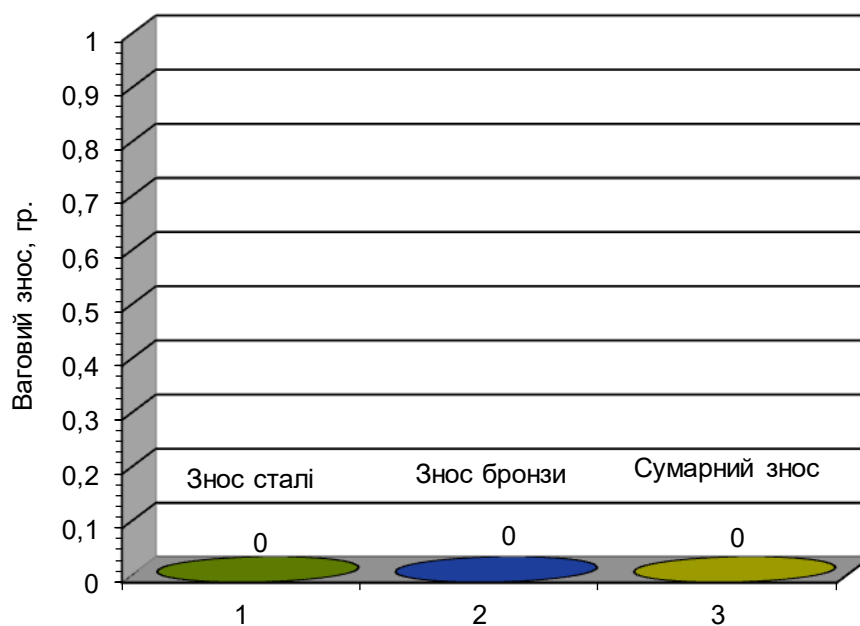


Рис. 4.32. Ваговий знос трибосистеми, модифікованої послідовно карбідом кремнію та нефритом за технологією ПИ 02-17 (після оптимізації процесу модифікування), за 8 годин випробувань

Результати показують, що час припрацювання істотно зменшився і не перевищував 15 хвилин.

Отже при використанні технології ПИ 02-17, знос за 8 годин випробування не реєструється ні ваговим методом, ні методом акустичної емісії. Момент тертя (отже, і коефіцієнт тертя), починаючи зі стадії навантаження не збільшується і знаходиться близько нульової позначки. Тепловиділення в цьому випадку також припиняється (температура за 8 годин випробувань зросла на 3°C, причому це підвищення температури, скоріш за все, викликано виділенням тепла від насоса системи мащення).

Такий ефект від фінішної обробки при використанні карбиду кремнію і нефриту може бути пояснений з використанням сучасних поглядів трибології. Така фінішна обробка формує на бронзовому зразку багат шарову поверхневу структуру, яка генерує хвильову складову сили тертя зі знаком мінус. При певній рівновазі молекулярно-механічної і хвильової складових сили тертя, в даній трибосистемі вдається досягти умов аномально низького тертя та зношування. Дану трибосистему можна віднести до практично «ідеальної», що дає підставу рекомендувати її до практичного впровадження в агрегатобудуванні.

#### **4.3.2 Результати досліджень на задиростійкість**

При виконанні порівняльних досліджень на задиростійкість були проведені випробування по визначенню коефіцієнта тертя і задиростійкості (несучої здатності), середньої поверхневої температури (виконувалось безконтактним способом за допомогою пірометра).

З цією метою використовували базову трибосистему «сталь 30X3BA – бронза БрО10С2НЗ» та трибосистему «сталь 30X3BA – бронза БрО10С2НЗ+ ПИ 02-17» за кінематичною схемою «кільце-кільце». Для моделювання блоку циліндрів реальної гідромашини на сталевий трибоелемент за допомогою дифузійного зварювання встановлювали пластину з бронзи товщиною 4 мм. Умови проведення випробувань – згідно розд. 2. Дані випробування базової ТС представлені графічно на рис. 4.33 як середнє від трьох дослідів.

В процесі ступінчатого навантаження трибосистеми по 0,2 МПа, проводили витримку на кожному щаблі протягом 5 хв. Методом акустичної емісії за цей період контролювали відсутність переходу до задиру. Після реєстрації перших ознак відхилення від значення параметру АЕ, фіксуємого на попередньому щаблі навантаження на більш ніж 50 відн. од., виконували розвантаження трибосистеми. Таким чином реєстрували максимальне значення несучої здатності. Для даної (базової) трибосистеми воно складало 3 МПа. Максимальне значення температури відповідало 70...80 °С.

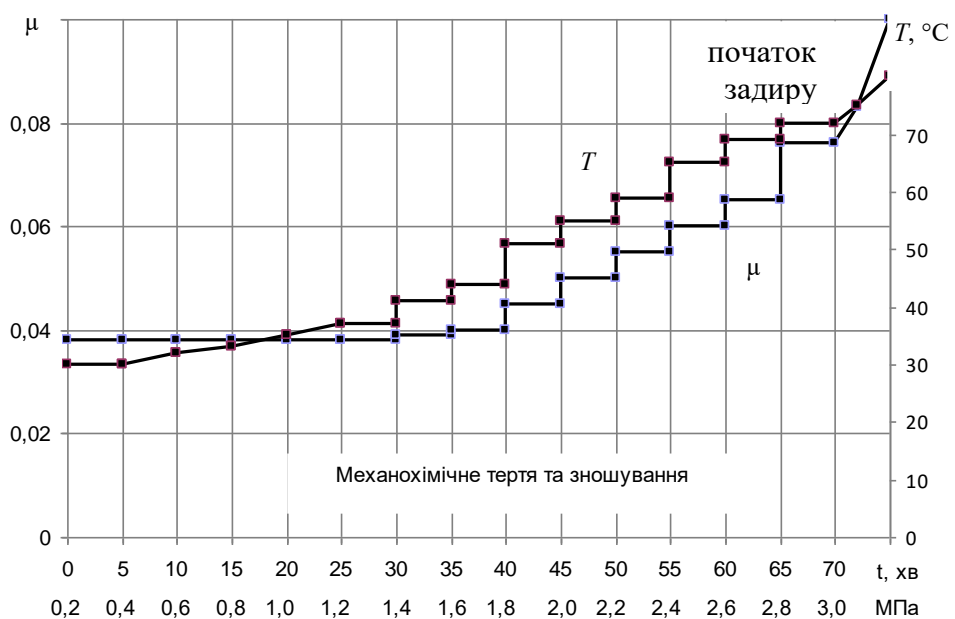


Рис. 4.33. Коефіцієнт тертя і температура в зоні контактування базової трибосистеми при дослідженнях на задиростійкість

Після проведення базових випробувань проводили аналогічні випробування для трибосистеми з використанням фінішної обробки бронзового трибоелемента за технологією ПИ 02-17. В даному випадку попередні експерименти показали, що питоме навантаження необхідно збільшити як найменше в 10 разів. Тому навантаження трибосистеми на кожному щаблі збільшували на 2 МПа, з витримкою протягом 5 хв.

Величина питомого тиску збільшена в 10 разів у порівнянні з базовими експериментами для досягнення навантажень, при яких реєструється задир

(величина максимальної несучої здатності ТС, які працюють в умовах АНТЗ). Це досяглося за рахунок зменшення площі бронзового трибоелементу до величини  $48,73 \text{ мм}^2$  (рис. 4.34).

На пластині з бронзи товщиною 4 мм на глибину 2 мм виконувалась проточка шириною 0,8 мм, таким чином, створювалися умови досягнення тиску в трибосполученні до 40,8 МПа, при максимально діючому навантаженні, що може створити стандартна машина тертя 2070 СМТ-1.



Рис. 4.34. Фрагмент бронзового трибоелемента БрО10С2Н3

Середні значення результатів трибологічних вимірювань, що отримані за результатами трьох дослідів трибосистем відображені на рис. 4.35.

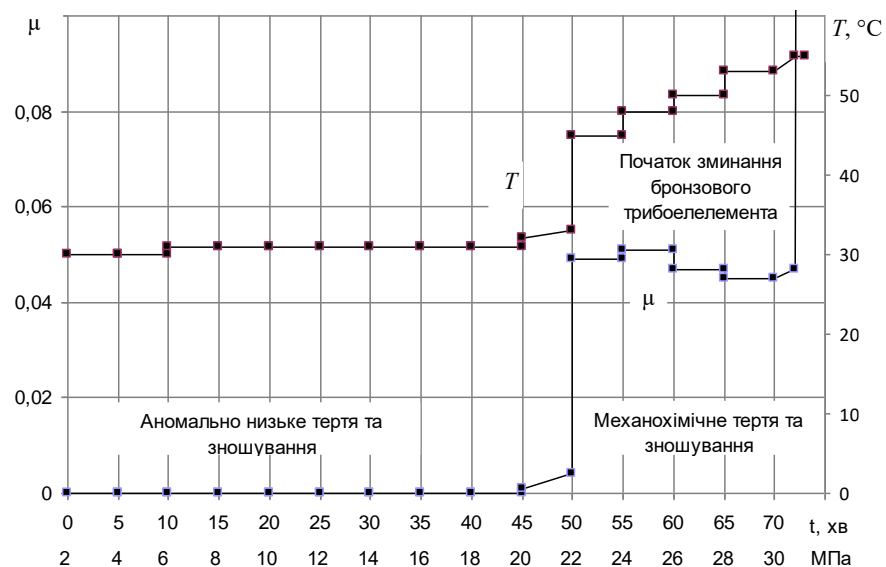


Рис. 4.35. Коефіцієнт тертя  $\mu$  і температура в зоні контактування трибосистеми з технологією фінішної обробки ПІ 02-17



Швидка та значна зміна мікрогеометричних характеристик може бути пояснена аномальним масоперенесенням в поверхневих шарах та переході пластичної деформації від класичного механізму до механізму зернограничного ковзання [47].

Максимальне значення несучої здатності трибосистеми 20 МПа, після цього спостерігається перехід до задиру. Після розвантаження, при навантаженні 20 МПа, на бронзовому трибоелементі виявленні ознаки змінання номінальної робочої поверхні бронзового трибоелемента (рис. 4.36).

Таким чином, несуча здатність даної трибосистеми в умовах аномально низького тертя та зношування обмежується навантаженням 20 МПа. При цьому навантаженні трибосистема переходить від аномально низького тертя та зношування до режиму нормального механохімічного зношування до досягнення задиру на навантаженні 30 МПа.



Рис. 4.36. Фрагмент бронзового трибоелемента БрО10С2Н3

Несуча здатність в умовах аномально низького тертя та зношування у порівнянні з базовою збільшилася практично в 7 разів (з 3 МПа до 20 МПа). Для пояснення отриманих результатів були проведені комплексні металографічні дослідження, що включали аналіз хімічного складу поверхні та топографічні особливості мікрорельєфу поверхневого шару.

Після проведення фінішної обробки за технологією ПИ 02-17 хімічний склад бронзового трибоелемента (рис. 4.29) суттєво змінився, більше ніж в

60 разів збільшується склад кремнію (з 0,02% до 1,34%; вихідний хімічний склад наведено у табл. 2.2). Склад решти хімічних елементів змінюється незначно.

Після досягнення максимально можливої несучої здатності даної трибосистеми поверхневий склад кремнію незначно зменшується у порівнянні з технологією ПИ 02-17 (рис. 4.37). Також спостерігається незначне зменшення олова та сурми, ці результати показують, що основний вплив на триботехнічні характеристики має кремній.

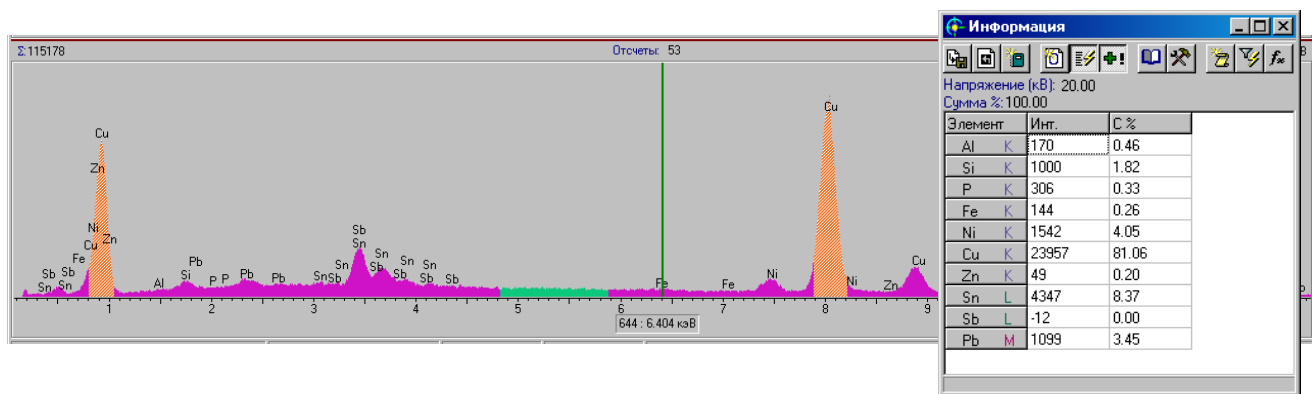


Рис. 4.37. Хімічний склад поверхні тертя бронзового трибоелемента після досягнення максимально можливої несучої здатності (20 МПа)

Результати випробувань на задиростійкість досліджуваних ТС показали, що після використання технології фінішної обробки бронзи за технологією ПИ 02-17 трибосистема працює до 20 МПа з практично нульовим тепловиділенням. Спостерігалось підвищення температури на 2-3 градуси, що обумовлено виділенням тепла від насоса системи мащення.

В діапазоні навантажень від 20 МПа до 24 МПа, при переході від АНТЗ до механохімічного тертя молекулярно-механічна складова сили тертя значно більша хвильової складової (рис. 4.35). Умови переходу від нормального механохімічного до аномально низького тертя та зношуванню сформульовані у третьому розділі даної роботи.

Таким чином, можна зробити висновок, що технологія ПИ 02-17 дозволяє перевести трибосистему в умови аномального низького тертя та зношування, що зберігається в широкому діапазоні навантаження і суттєво збільшити несучу здатність (більш ніж у 7 разів (рис. 4.33, 4.35)) у порівнянні з базовою трибосистемою. Несуча здатність обмежена напруженнями зминання бронзи  $\text{BrO10C2H3}$  після 20 МПа (рис. 4.35, 4.36).

Параметри профілю мікрорельєфу і показники шорсткості в процесі випробувань на задиростійкість суттєво відрізняються. При тому, що параметр шорсткості  $Ra$  з 0,085 мкм зменшується до 0,05 мкм при досягненні навантаження в 10 МПа, тобто відбувається вигладжування практично у 2 рази. Максимум профілю збільшується практично у 3 рази, що наглядно ілюструє 3D зображення поверхонь (рис. 4.38). При досягненні навантаження в 20 МПа параметр  $Ra$  досягає значення 0,02 мкм

Аналіз мікрорельєфу поверхневого шару для трибосистем (рис. 4.38, табл. 4.8), що досліджуються показав, що використання технології ПИ 02-17 дозволяє трибосистемі досягати більших значень несучої здатності також за рахунок розвиненого мікрорельєфу, що збільшує хвильову складову зі знаком мінус.

На відміну від базового експерименту збільшення навантаження приводить до суттєвої зміни параметрів шорсткості в сторону її зменшення причому цей процес відбувається в результаті деформаційних процесів, а не зношування. Дамо пояснення даного явища з позиції еволюції такого роду трибосистем за принципом підтримки стану максимальної надійності при зміні зовнішніх умов тертя (навантажувально-швидкісні, температурні і т.д.) за межею стійкості.

Дослідження мікротвердості за глибиною поверхневого шару при досягненні максимальних навантажень 20 МПа (табл. 4.9) показали, що при збільшенні навантаження відбувається зміцнення поверхневого шару, вигладжування та зміна хімічного складу, що відповідає такій реакції ТС (збільшення вмісту кремнію та олова).

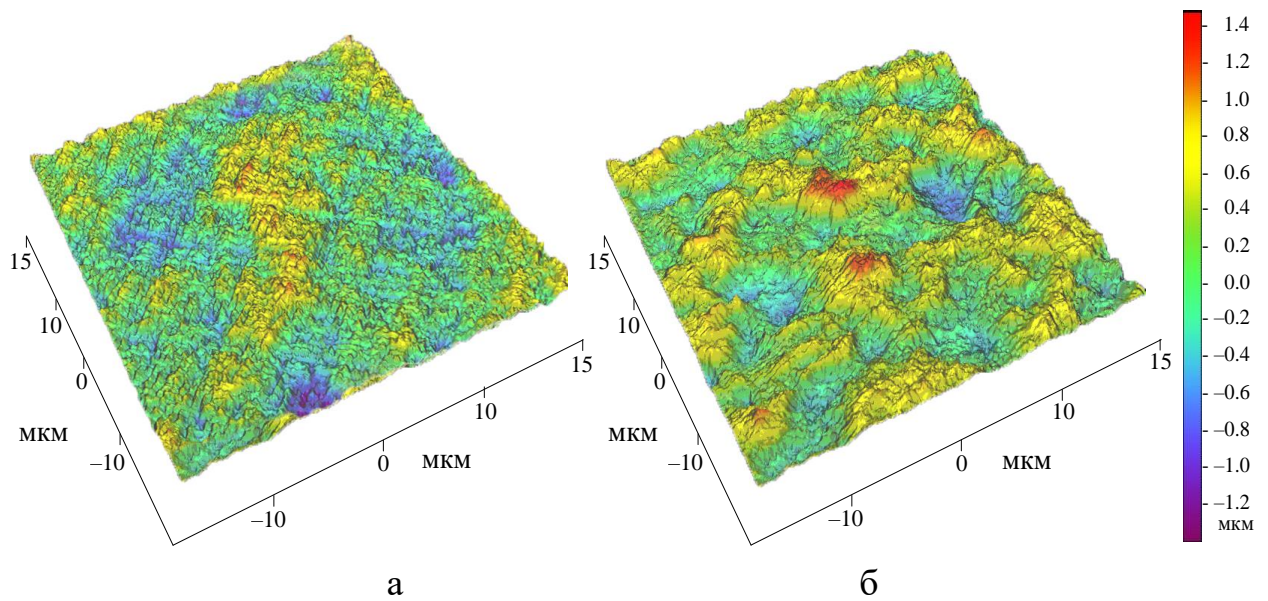


Рис. 4.38. Топографія поверхонь тертя бронзового трибоелемента:

а – після обробки ПИ 02-17 (перед випробуваннями);  
б – після роботи під навантаженням 10 МПа

По мікрофотографії поверхні бронзового зразка, що працює в умовах аномально низького тертя та зношування при різних значеннях контактного навантаження (рис. 4.39, 4.40) видно, що мікрорельєф має симетричний характер розподілення елементів по поверхні та має незначні відмінності висот профілів, що вже було зафіксовано (табл. 4.8). Слідів зносу у вигляді характерних доріжок в напрямку тертя не спостерігається.

Таблиця 4.8

Середні значення мікросорсткості бронзового зразка БрО10С2НЗ, обробленого за технологією ПИ 02-17 при навантаженні 10 МПа та 20 МПа

| Умови вимірювання          | Після обробки ПИ 02-17 (перед випробуваннями) | Після роботи під навантаженням 10 МПа | Після роботи під навантаженням 20 МПа |
|----------------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Параметри                  | Величина, мкм                                 | Величина, мкм                         | Величина, мкм                         |
| Мінімум профілю            | 0,045   | 0,347                                 | 0,175                                 |
| Максимум профілю           | 0,287   | 0,648                                 | 0,323                                 |
| Діапазон вимірювань висоти | 0,192   | 0,302                                 | 0,148                                 |
| $Ra$                       | 0,085   | 0,05                                  | 0,02                                  |
| $Rmax$                     | 0,334   | 0,295                                 | 0,185                                 |
| $Rz$                       | 0,277   | 0,250                                 | 0,150                                 |
| $Sm$                       | 23367   | 19670                                 | 21630                                 |

Таблиця 4.9

Мікротвердість по глибині поверхневого шару базових бронзових зразків, оброблених за технологією ПИ 02-17 при навантаженні 10 МПа та 20 МПа

| Бронза БрО10С2Н3+ПИ 02-17 | Навантаження, Н                      |      |      |
|---------------------------|--------------------------------------|------|------|
|                           | 0,5                                  | 1,0  | 2,0  |
| Навантаження 10 МПа       | Мікротвердість, Н <sub>μ</sub> (МПа) |      |      |
|                           | 6090                                 | 5980 | 5080 |
|                           | Глибина відбитку, мкм                |      |      |
|                           | 1,8                                  | 2,7  | 3,85 |
| Навантаження 20 МПа       | Мікротвердість, Н <sub>μ</sub> (МПа) |      |      |
|                           | 6450                                 | 6120 | 5600 |
|                           | Глибина відбитку, мкм                |      |      |
|                           | 1,72                                 | 2,46 | 3,15 |

Цілком логічно застосування для аналізу таких трибосистем крім синергетичного і термодинамічного підходів – кібернетичного, який апелює прямими і зворотними зв'язками, що реалізують принципи еволюції живої біологічної матерії в неживу.

Дамо пояснення мікрогеометричних змін поверхневого шару бронзового зразка з цієї позиції.

На основі схематичного представлення реологічних і фрактографічних особливостей поверхневого шару трибоелемента, який працює в умовах аномально низького тертя та зношування, розглянутого в підрозділі 3.1 і представленого на рис. 3.1, можна провести аналіз зміни мікрогеометричних характеристик в залежності від величини діючого навантаження, як фактора самоорганізації такого роду трибосистем [5, 6, 25].

Саме ця обставина дає нам розуміння, чому в процесі збільшення навантаження при проведенні випробувань на несучу здатність до величини 20 МПа, безперервно вигладжується поверхня, тобто зростає кількість поверхневих елементів, сприймаючих навантаження. Після 20 МПа, при переході до нормального механохімічного зношування, параметри шорсткості зростають.

При звичайних умовах тертя та зношування при збільшенні

навантаження відбувається безперервне збільшення параметрів шорсткості. Таким чином, у трибосистемі відбувається саморегулювання величини співвідношення між молекулярною і механічною складовими сили тертя, що перешкоджає переходу трибосистеми до схоплювання.

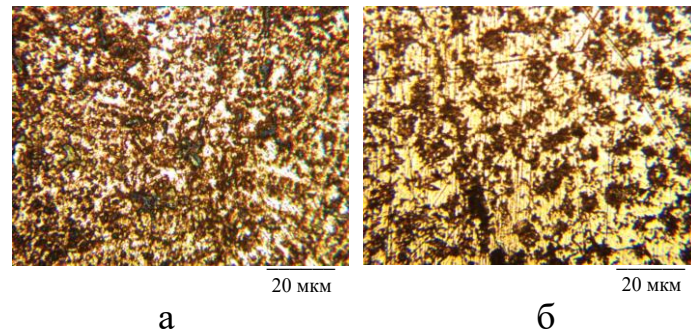


Рис. 4.39. Мікрофотографії поверхні бронзового зразка, що працює в умовах аномально низького тертя та зношування при різних значеннях контактного навантаження: а – 10 МПа; б – 20 МПа ( $\times 250$ )

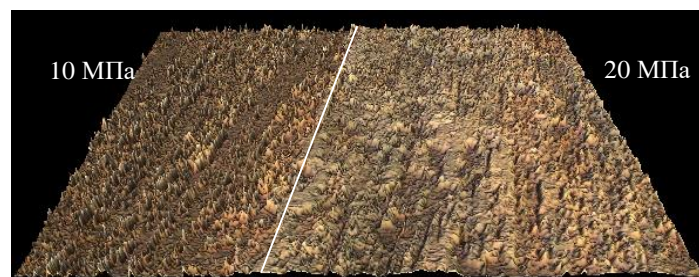


Рис. 4.40. Фрактальні топологічні особливості поверхні тертя бронзи БрО10С2Н3, що працює в умовах аномально низького тертя і зношування – візуалізація шорсткості поверхні під кутом  $35^\circ$ ,  $\times 250$

#### **4.4 Дослідження амплітудно-частотних характеристик при нормальному механохімічному та при аномально низькому терті та зношуванні**

В роботі [56] показано вплив частотної вібрації на тертя та зношування трибосистеми «кремній по нітриду кремнію». Генератор коливань, який був закріплений на досліджуваних зразках, дозволяв генерувати як нормальні,

так і тангенціальні коливання по відношенню до площини тертя. Встановлено, що в діапазоні частот від 4 до 6 кГц спостерігається значне зниження коефіцієнта тертя (в 10 разів), як для нормальної, так і для тангенціальної складової коливань, а також зменшення зносу. Причому в цьому діапазоні амплітуда коливань не робить вирішального значення на зниження сили тертя, починаючи з певної граничної величини. Аналіз самого ефекту зниження тертя та зношування проводився без зв'язку з фізико-механічними властивостями досліджуваних матеріалів та механізмами дисипації зовнішньої енергії, що підводиться, хоча реологія поведінки матеріалів врахована на кінематичній схемі досліджуваних трибосистем.

Підтвердження правильності такого підходу показано в роботі [57], де також, як і в [56], досліджували вплив мікрозміщень трибоелемента при вібрації в умовах сухого тертя. Нажаль пояснення цього ефекту із залученням сучасних фізичних теорій зроблено не було.

Проводячи аналіз робіт з дослідження ультразвукових і вібраційних коливань в трибології [15, 22, 27, 53], можна зробити висновок, що практично у всіх цих роботах хвильова складова сили тертя, введена у вираз для сили тертя зі знаком мінус, присутня у вигляді кінцевого результату при зовнішньому хвильовому впливі на трибосистему.

Молекулярно-механічна складова також має хвильову природу і апроксимується в результаті контактної взаємодії імпульсом сили, протилежним за напрямком та в більш низькому частотному діапазоні, оскільки формується в результаті гальмування при взаємодії мікрорельєфу. Це твердження потребує доведення, для чого було проведено дослідження амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) в умовах нормального молекулярно-механічного тертя та АНТЗ.

При звичайних умовах граничного тертя в результаті взаємодії мастильного середовища з пластично-деформованими матеріалами трибоелементів відбувається «розм'якшення» їх поверхневого шару (ефект Ребіндера) [58]. Формується позитивний градієнт твердості поверхневого

шару за глибиною. Тому трибосистема переходить від пружного контакту до пружно-пластичного і пластичного. Сила тертя при цьому зменшується до деякого стаціонарного значення. Так І. В. Крагельский, пояснюючи пружне деформування матеріалу при терті, показав: точки, що торкаються, виробляють пружне деформування матеріалу, виходячи зі зчеплення контакти починають здійснювати коливання, тобто практично формується хвильова складова сили тертя [28].

Результати дослідження пружного контакту при терті, проведені в роботах [9, 160], показують, що коливання за певних умов можуть бути додатковим каналом дисипації підведеної до трибосистеми енергії.

Умови утворення реальних трибосистем, що працюють виключно в пружній області, викладено в роботах [45, 160, 161].

Останні дослідження у триботехніці [14, 25, 41, 162] дозволяють різними способами суттєвим чином знизити показники тертя та зношування до їх аномально низьких значень. Однак до теперішнього часу залишається невивченою зміна амплітудно-частотних характеристик в трибосистемі при переході роботи від нормального механохімічного зношування до аномально низького тертя та зношування.

Для дослідження амплітудно-частотної характеристики проводили випробування, аналогічні випробуванням на задиростійкість і при навантаженні, що відповідало максимальній несучій здатності (3,0 МПа для базової ТС та 20 МПа для пари тертя з ПИ 02-17) та при досягненні постійних значень триботехнічних параметрів (температури та коефіцієнту тертя) проводили вимірювання АЧХ.

Результати випробувань, як середнє по трьом експериментам представлено на рис. 4.41. Максимальне значення амплітуди для базової ТС 37 дБ реєстрували на частоті 573 Гц, рис. 4.42.

Амплітудно-частотна характеристика при АНТЗ (технологія ПИ 02-17) суттєво відрізняється у порівнянні з базовою трибосистемою. На діаграмі спостерігається два характерні максимуми: перший від 500 до 700 Гц, другий



від 6 до 7 кГц, тобто на порядок вище. Причому амплітуди в обох областях приблизно однакові (в другій області становить 42 дБ) (рис. 4.43).

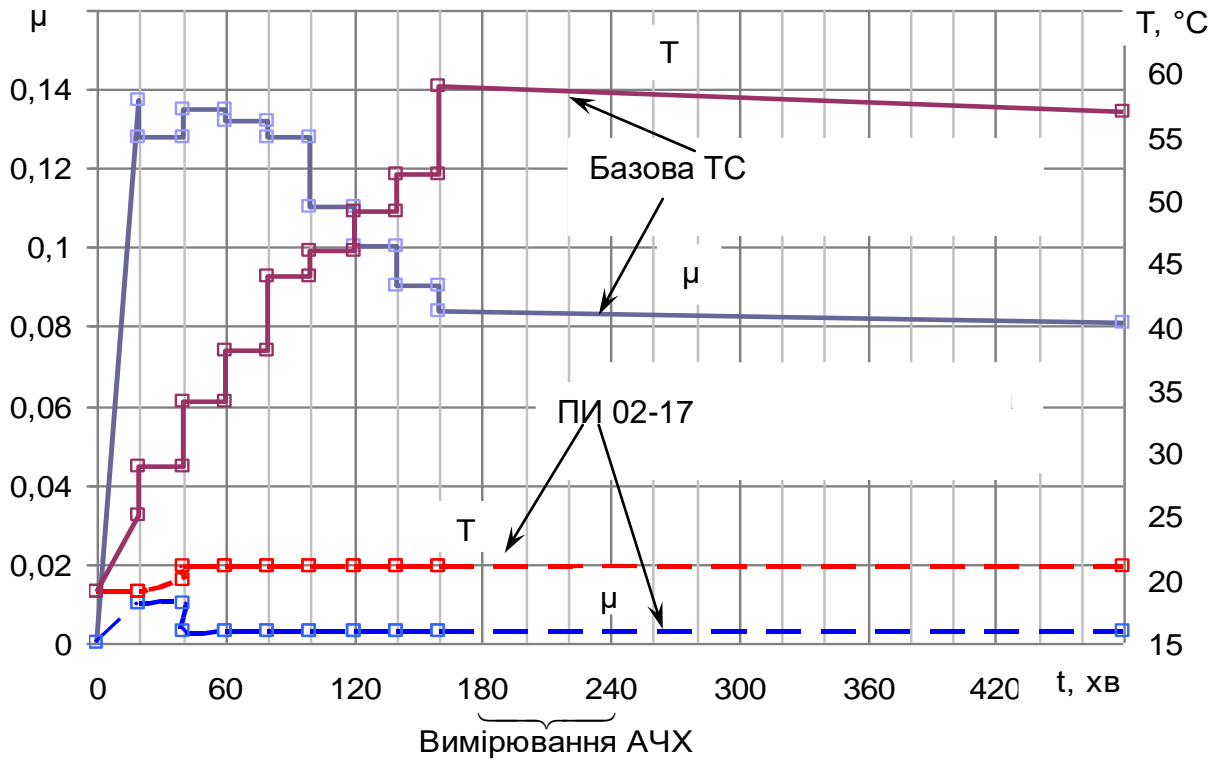


Рисунок 4.41 – Коефіцієнт тертя і температура в зоні контактування трибосистем за часом випробування

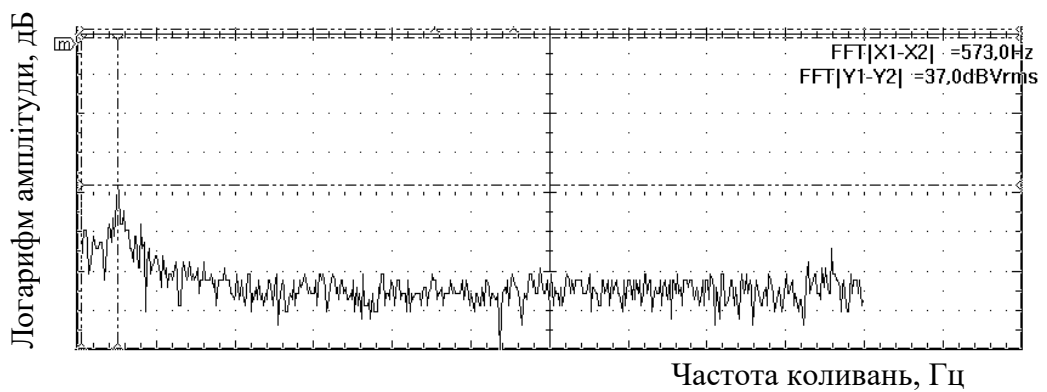


Рис. 4.42. АЧХ трибосистеми, що працює в умовах нормального механохімічного тертя та зношування

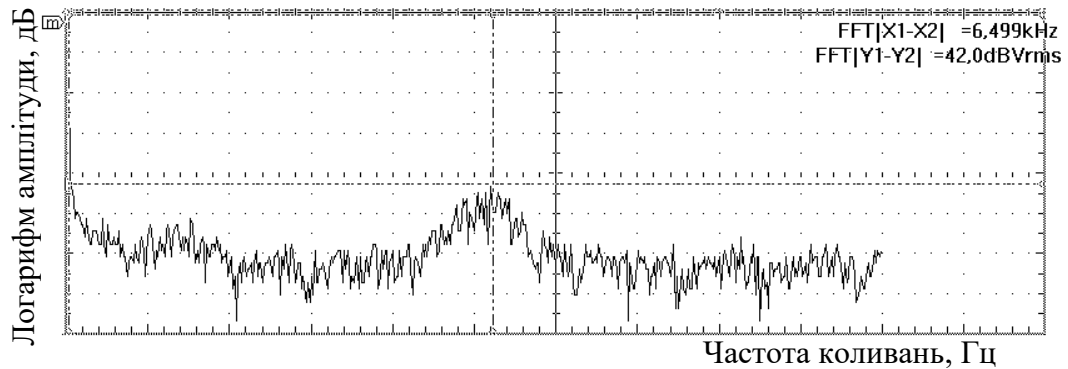


Рис. 4.43. АЧХ трибосистеми, що працює в умовах аномально низького тертя та зношування

Таким чином, перехід від нормального механохімічного зношування до аномально низького тертя та зношування обумовлений хвилевою складовою сили тертя, яка знаходиться практично в тому же діапазоні частот, що відповідає дослідженням [56] при зовнішньому активуванні коливаннями трибосистеми.

#### 4.5 Висновки по четвертому розділу

1. Використання технології модифікації поверхневого шару бронзових зразків шляхом послідовної фінішної обробки спочатку карбідом кремнію, а потім нефритом, дозволяє змінити реологічну будову поверхневого шару, яка може бути описана моделлю Шведова, і дає можливість перетворювати підведену ззовні енергію по хвильовому каналу (наявність хвильової складової зовнішнього тертя).

2. Структурна самоорганізація при досягненні аномально низького тертя та зношування направлена на підтримання трибосистеми в цьому режимі роботи шляхом структурування поверхневого шару, спрямованого на підтримання аномально низького тертя та зношування. При цьому при підвищенні навантажень поверхня істотно вигладжується на відміну від нормального механохімічного зносу.

3. Дослідження амплітудно-частотних характеристик пружних коливань досліджуваних трибосистем в діапазоні частот від 0 до 10 кГц показали (при одних і тих же умовах роботи на тертя та зношування), що максимальне значення амплітуд коливань при нормальному механохімічному зношуванні знаходиться в діапазоні 400...500 Гц. При дослідженні аномально низького тертя та зношування на діаграмі спостерігаються два характерні максимуми: перший від 500 до 700 Гц, другий від 6 до 7 кГц, тобто на порядок вище. Причому максимальні значення амплітуд для даних ділянок мають рівні значення і становлять 42 дБ. Пік у першому діапазоні відображає, на наш погляд, енергетику від молекулярно-механічної складової сили тертя, а другий – візуалізує хвильову складову сили тертя. Наявність практичної рівності максимальних значень амплітуд свідчить про досягнення рівності між імпульсами сили від молекулярно-механічної та хвильової складових сили тертя, що дає пояснення наявності аномально низького тертя та зношування.

4. Аналіз результатів досліджень показує, що при нормальному механохімічному зношуванні формується позитивний градієнт твердості по глибині поверхневого шару, в той час як при аномально низькому терті та зношуванні спостерігається від'ємний градієнт: поверхневий шар – пружний, підповерхневий – пружно-пластичний, що підтверджує, що умови аномально низького тертя та зношування досягаються при реологічній будові поверхонь тертя за моделлю Шведова.

5. Подальші ресурсні випробування показали практично повну відсутність зношування трибоелементів, які оброблені за технологією ПИ 02-17, що дозволяє експлуатувати агрегат за технічним станом при збільшенні міжремонтного ресурсу у 4 рази.

## РОЗДІЛ 5

### МЕХАНІЗМИ САМООРГАНІЗАЦІЇ В ТРИБОСИСТЕМАХ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ АНОМАЛЬНО НИЗЬКОГО ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ

У даному розділі продовжено вирішення п'ятого завдання дисертаційної роботи. Проведено дослідження механізмів самоорганізації трибосистеми для підтримання режиму АНТЗ при зміні зовнішніх умов роботи трибосистеми. Для аналізу використано квантомеханічний підхід до структурування поверхневого шару при формуванні хвильової складової сили тертя.

Введене в роботах [163, 164] поняття механічного кванта  $\hat{\varepsilon}$  дозволяє стверджувати, що в контактному елементарному об'ємі за рівноважну шорсткість відповідає певна кількість механічних квантів, відповідно енергія контакту в стані зчеплення залежить від кількості  $\hat{\varepsilon}$  (див. підрозд. 3.3):  $\Delta E = \Delta E(\hat{\varepsilon})$ .

В результаті взаємодії формується результуюча векторна величина імпульсу сили хвильової складової сили тертя. Аналогічним чином формується результуюча величина імпульсу сили від молекулярно-механічної сили тертя, зсунутої за фазою.

Таким чином, при зміні навантаження, саморегулювання в трибосистемі, що працює в умовах аномально низького тертя та зношування, буде регулюватися кількістю механічних квантів і модулем канонічного розподілу енергії по лінії (поверхні) контакту, а, отже, структурою і топографією поверхневого шару, що потребує експериментального підтвердження і подальшого теоретичного обґрунтування з позицій термодинаміки.

Метою подальших досліджень є розробка механізмів самоорганізації трибосистем, які працюють в умовах нормального механохімічного і АНТЗ

для визначення фізичної сутності роботи трибосистем, в яких створено такі умови, при зміні зовнішніх умов тертя.

### **5.1 Експериментальні дослідження поверхонь тертя при аномально низькому терті та зношуванні**

Експериментальні дослідження проводили на зразках та при умовах, описаних у розд. 2. Спочатку випробуванню підлягала базова трибосистема «сталь 30Х3ВА – бронза ВБ23НЦ» (з використанням безабразивної фінішної обробки бронзового трибоелементу для досягнення потрібної шорсткості поверхні зразків та притирання сталевого зразку алмазною пастою). В процесі випробувань фрактографічні та мікрогеометричні характеристики сталевого зразка змінювались незначно, тому для аналізу не використовувались. Розгорнуті дослідження даних характеристик проводились в лабораторії нанотехнологій НАУ, м. Київ.

Для базових бронзових зразків дослідження наведено на рис. 4.22. Результати досліджень фрактографії бронзових зразків практично не відрізнялися, тому наведено результати лише для бронзи ВБ23НЦ. З наведених даних слідує, що поверхня є гладкою та практично однорідною по всій площині [89].

У подальшому порівняння параметрів шорсткості при зміні навантаження буде виконуватися по середнім значенням параметрів шорсткості.

Як вже зазначалося (див. п. 4.3.1), дослідження на зносостійкість базової трибосистеми проводили при навантаженнях 1,6 МПа та 3,0 МПа. Дослідження вагового зносу на даних навантаженнях наведено на рис. 5.1. З рисунку видно, що з підвищенням навантаження в результаті процесів самоорганізації сумарний знос ТС зменшується. Основним механізмом самоорганізації є дифузія легуючих елементів бронзового зразка, що підтверджується наступними дослідженнями (рис. 5.2).

Оптимальними навантаженнями для даного сполучення є діапазон навантажень до 3,0 МПа, які забезпечують на поверхнях тертя такі умови, які призводять до порушення класичних законів дифузії, і насичення поверхні

тертя бронзового зразка свинцем (процентний вміст свинцю збільшується в 2 рази (рис. 5.2, б)).

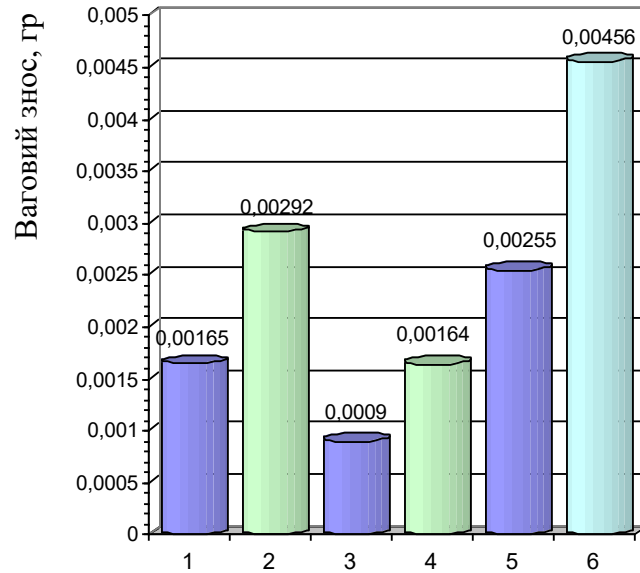
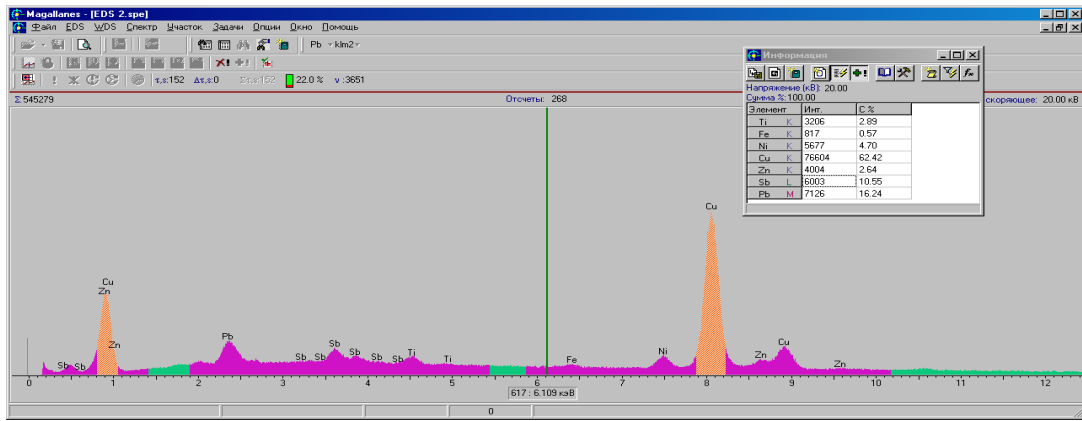


Рис. 5.1. Ваговий знос елементів базової трибосистеми (сталь 30Х3ВА - бронза ВБ23НЦ):

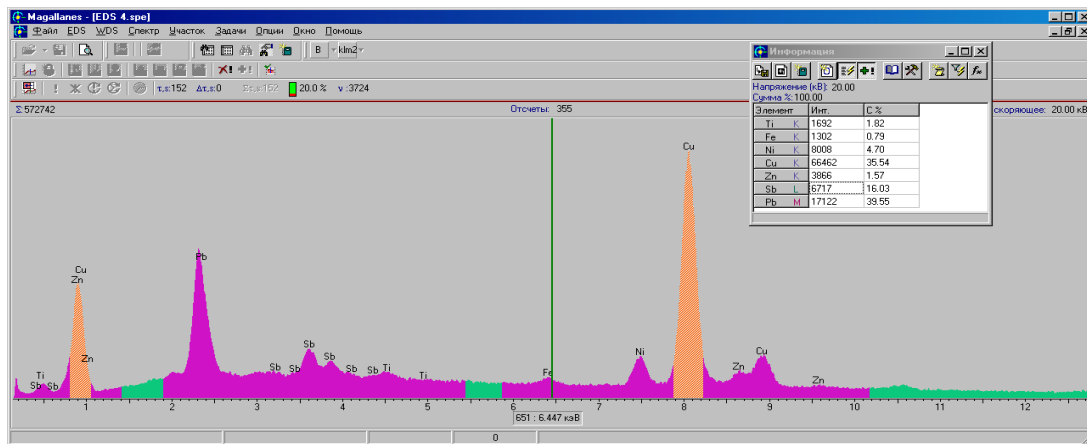
1, 2 – бронза; 3, 4 – сталь; 5, 6 – сумарний знос трибоелементів. Діаграма зносу 1, 3, 5 при навантаженні 1,6 МПа, 2, 4, 6 при навантаженні 3,0 МПа.

Після проведення базових випробувань, проводили аналогічні випробування в трибосистемі з використанням технології ПИ 02-17. Розгорнуті дослідження фрактографічних та мікрогеометричних характеристик бронзового зразка після фінішної обробки по технології ПИ 02-17 наведено на рис. 4.26 (підрозд. 4.2).

Аналіз досліджень поверхонь після обробки за технологією ПИ 02-17 показав, що фрактографічно мікроконтактні майданчики розподілені практично симетрично по поверхні тертя. Середнє значення шорсткості за параметром  $Ra$  при цьому для різних зразків знаходиться в межах від 0,08 до 0,11, що у порівнянні з базовою поверхнею (зі звичайною фінішною обробкою) збільшується у два рази.



а



б

Рис. 5.2. Хімічний аналіз поверхні базового бронзового зразка:

а – навантаження 1,6 МПа; б – 3,0 МПа

Аналіз отриманих результатів показав, що використання технології ПИ 02-17 дозволяє працювати трибосистемі в умовах аномально низького тертя та зношування в діапазоні навантажень до 20 МПа. При цьому тепловиділення практично відсутнє. При збільшенні навантаження вище 20 МПа спостерігається перехід до умов механохімічного тертя та зношування (рис. 4.35).

Це викликано порушенням балансу між молекулярно-механічною та хвильовою складовими сили тертя (3.1).

Хімічний аналіз поверхні бронзового зразка з ВБ23НЦ після обробки за технологією ПИ 02-17 наведено на рис. 5.3. Проведений хімічний аналіз при різних навантаженнях виявив незначні зниження вмісту кремнію та вісмуту.

При чому, кремнієм та вісмутом насичується поверхневий шар в процесі обробки за технологією ПИ 02-17. У базовому стані (до обробки ПИ 02-17) вміст цих елементів знаходиться у межах 0,01%. Також слід відмітити істотне зниження після такої обробки вмісту свинцю у порівнянні з базовими випробуваннями (рис. 5.2): зменшується більш ніж у 8 разів і практично не змінюється при зміні навантаження. Це дає привід передбачати, що самоорганізація при зміні навантаження відбувається не за дифузійним механізмом, а в результаті змін мікрогеометрії, що підтверджується наступними дослідженнями.

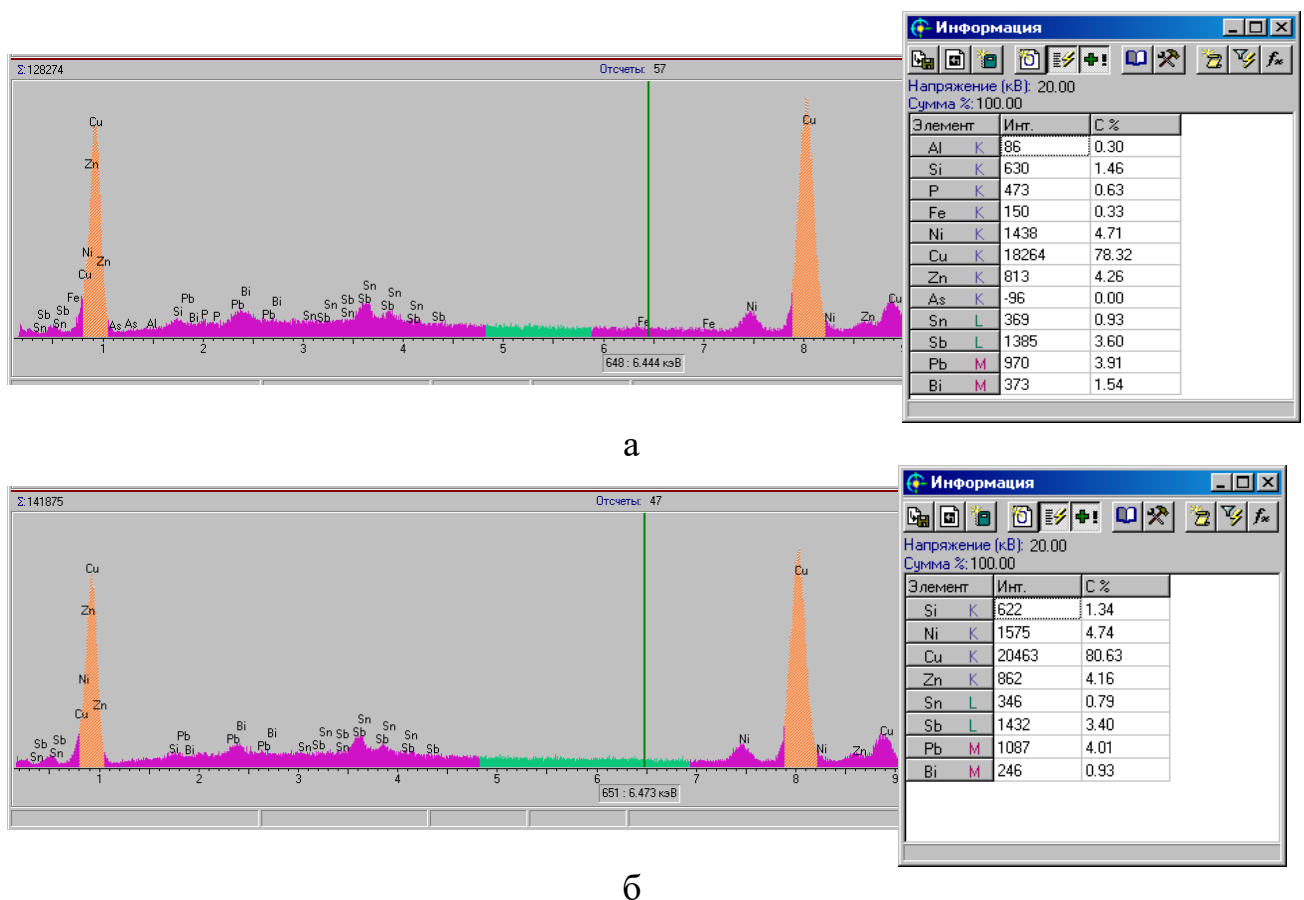


Рис. 5.3. Хімічний аналіз поверхні бронзового зразка після обробки ПИ 02-17: а – навантаження 1,6 МПа; б – 3,0 МПа

Аналіз результатів мікрогеометричних характеристик шорсткості поверхні бронзових трибоелементів з БрО10С2НЗ (при дослідженнях задиростійкості), оброблених за технологією ПИ02-17 (табл. 4.8), вказує на те, що при збільшенні навантаження до 20 МПа параметри шорсткості суттєво змінюються ( $Ra$  зменшується на 60 %).



Подібний ефект змін мікрогеометричних характеристик шорсткості поверхні бронзового трибоелемента спостерігається і для бронзи ВБ23НЦ (табл. 4.7). Він вказує на те, що при збільшенні навантаження параметри шорсткості суттєво зменшуються за параметром  $Ra$  (у 2 рази).

Цей ефект може бути пояснений, якщо шорсткість розглядати не лише з геометричних позицій. Так з теорії дисипації [73, 74] відомий цікавий фізичний ефект створення чарунок Бенара. Якщо до поверхні постійно підводиться енергія, то при досягненні її певного значення стає необхідною її більш інтенсивна віддача (розсіювання у навколишнє середовище). Виникає біфуркація з наступною самоорганізацією структури поверхні. При цьому самовільно поверхня розбивається на окремі елементи, кожен з яких дисипує більш інтенсивно, ніж до біфуркації. Цей ефект виникає, скоріш за все, при переході трибосистеми, яка працює в умовах аномально низького тертя та зношування, до більш навантаженого режиму. Це підтверджується схемою виникнення енергетичних осередків в процесі енергообміну між поверхнями тертя [45]. У поверхні з малою шорсткістю (що особливо характерно для прецизійних деталей у агрегатобудуванні) передача енергії від контртіла з більшою імовірністю відбувається по всій поверхні контакту, що забезпечує рівновагу між молекулярно-механічною та хвильовою складовими сили тертя.

Для трибосистем, що працюють в умовах аномально низького тертя та зношування, зміна мікрогеометричних характеристик відбувається в об'ємах достатньо більших, ніж пластична деформація при нормальному механохімічному зношуванні. Швидка та значна зміна мікрогеометричних характеристик може бути пояснена аномальним масоперенесенням в поверхневих шарах і переході пластичної деформації від класичного механізму до механізму зернограничного ковзання [47].

Виходячи з результатів експериментальних досліджень, для нормального механохімічного зношування саморегулювання здійснюється по каналу термодинамічної ентропії [43, 44]. В цьому випадку умови

стаціонарного зношування забезпечуються дотриманням рівності швидкості приросту і втрат вільної енергії. З позиції структурно-енергетичної теорії тертя та зношування [43, 44] це рівність швидкостей утворення і руйнування вторинних структур.

В умовах аномально низького тертя та зношування саморегулювання здійснюється по каналу структурної ентропії, який оцінюється реологічною і фрактальною досконалістю трибосистеми. Загальним для першого і другого випадку є дотримання фундаментального принципу Ле Шательє прийнятого в нерівноважній термодинаміці, згідно з яким будь-який зовнішній вплив, що виводить систему з рівноваги, ініціює в ній процеси, які прагнуть повернути систему в початковий стан.

Проводячи аналіз виразу для імпульсу сили (див. 3.20) можна зробити припущення, що саморегулювання при зміні зовнішніх умов тертя буде виконуватись шляхом наноструктурування поверхневого шару за рахунок зміни кількості механічних квантів  $\varepsilon$  і зміни напрямку узагальненого імпульсу сили  $\vec{v}_{TC}$  (3.20) в результаті зміни канонічного розподілення енергії по поверхні контакту  $\Theta$  шляхом саморегулювання параметрами мікросорсткості (табл. 4.8). Достатньо логічно припустити, що при певних умовах мікроструктурні зміни можуть привести до зміни вектора імпульса сили від хвильової складової строго протилежно силі від молекулярно-механічної складової, тобто структура матеріалу веде себе аналогічно парусу, який дозволяє пливати судну проти вітру.

Виходячи з викладеного вище, цілком припустимою є гіпотеза, що підтримка умов аномально низького тертя та зношування при зміні зовнішніх умов досягається в трибосистемі за рахунок зміни фрактальних і мікроструктурних показників (хвилястість, шорсткість і т.д.) мікрорельєфу і наноструктурування підповерхневих шарів, що регулюють модуль канонічного розподілу енергії  $\Theta$  (3.20). Ці зміни можуть бути оцінені структурною ентропією. Ротаційна рухомість реалізується в підповерхневому шарі.

Фундаментальною величиною, яка визначає стійкість трибосистеми в

умовах нерівноважної самоорганізації є виробництво надлишкової ентропії  $P[\delta^2\dot{S}]$  [64]. Слід зазначити, що при дослідженні нерівноважної самоорганізації хромонікелевих сплавів при управлінні тепловим потоком має місце як негативний, так і позитивний приріст надлишкового виробництва ентропії, пов'язаний з флуктуаціями напружено-деформованого стану поверхневого і підповерхневого шарів трибоелементів, викликаного зміною механізму дифузії легуючих елементів в поверхнях контакту трибосистеми. Внаслідок цього зміна приросту виробництва надлишкової ентропії  $\delta^2\dot{S}$  за часом носить коливальний характер [64].

У разі нерівноважної самоорганізації в умовах АНТЗ при зміні навантаження виробництво надлишкової ентропії трибосистеми  $\delta^2\dot{S} \leq 0$  має вигляд, наведений на рис. 4.28. Слідуючи теоремі про мінімальне виробництво ентропії, дана величина  $\delta^2\dot{S}$  після наноструктурних і мікрореологічних змін наближається до нуля, це і пояснює кардинальну відмінність стійкості даних трибосистем від базових.

При зміні навантаження (рис. 5.4) в бік збільшення або зменшення, ми змінюємо питому потужність тертя  $\omega$  і таким чином змінюється щільність прихованої внутрішньої енергії,  $U^*$ .

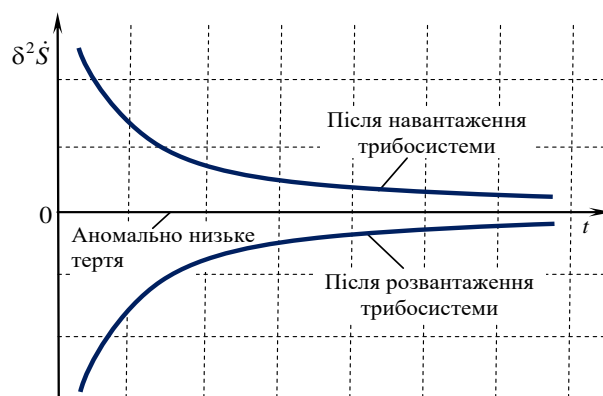


Рис. 5.4. Зміна приросту виробництва надлишкової ентропії  $\delta^2\dot{S}$  за часом, в умовах нерівноважної самоорганізації трибосистеми «сталь 30Х3ВА – бронза ВБ23НЦ+ПИ 02-17»

В результаті чого порушується баланс між молекулярно-механічною та хвильовою складовими сил тертя в рівнянні (3.1). Відповідно до принципу Ле Шательє, повернення до рівноважного стану у даній ТС відбувається за рахунок зміни тензора напружень  $\sigma_{ik}$  і тензора деформацій  $\varepsilon_{ik}$ , що може оцінюватися параметрами структурної ентропії  $S_c$  поверхневого шару. Такий висновок витікає з результатів вимірювань мікрогеометричних характеристик (табл. 4.8).

Важливою для практики є реакція трибосистеми, що працює в умовах аномально низького тертя та зношування, на зміни зовнішніх умов тертя.

Для цього в наступному експерименті при досягненні аномально низького тертя та зношування, при навантаженні 20 МПа і після роботи на цьому навантаженні на протязі 20 хв., навантаження було зменшено до 10 МПа (рис. 5.5, а). Після роботи на цьому навантаженні ще 20 хв., навантаження знову збільшували у зворотному напрямку до 20 МПа (рис. 5.5, б).

При цьому трибосистема переходить в область «негативного» тертя, тобто змінюється вектор напрямку сили тертя. У цьому випадку порушується рівновага між молекулярно-механічною і хвильовою складовими сили тертя (3.2).

Результати вимірювання швидкості зношування методом акустичної емісії показали (рис. 5.5), що «зменшення» коефіцієнта тертя в цьому випадку супроводжується збільшенням температури і швидкості зношування.

Фізика зношування має кардинальну відмінність в порівнянні з нормальним механохімічним тертям, про що було сказано вище по тексту.

При навантаженні трибосистеми (рис. 5.5, б), що працює в умовах аномально низького тертя та зношування, зміни триботехнічних показників носять протилежний характер у порівнянні з розвантаженням (рис. 5.5, а).

Площа під огинаючою коефіцієнта тертя, щодо осі абсцис (рис. 5.5, а, б) являє собою частку енергії, яка «знищується» тертям у вигляді збереженої прихованої енергії, по відношенню до роботи зовнішніх сил (енергії зовнішнього відносного руху). При навантаженні ця енергія запасється в поверхневому шарі, а при розвантаженні вона з поверхневого шару «знищується», що супроводжується при цьому процесами поверхневого руйнування (зношування), які мають іншу фізичну картину.

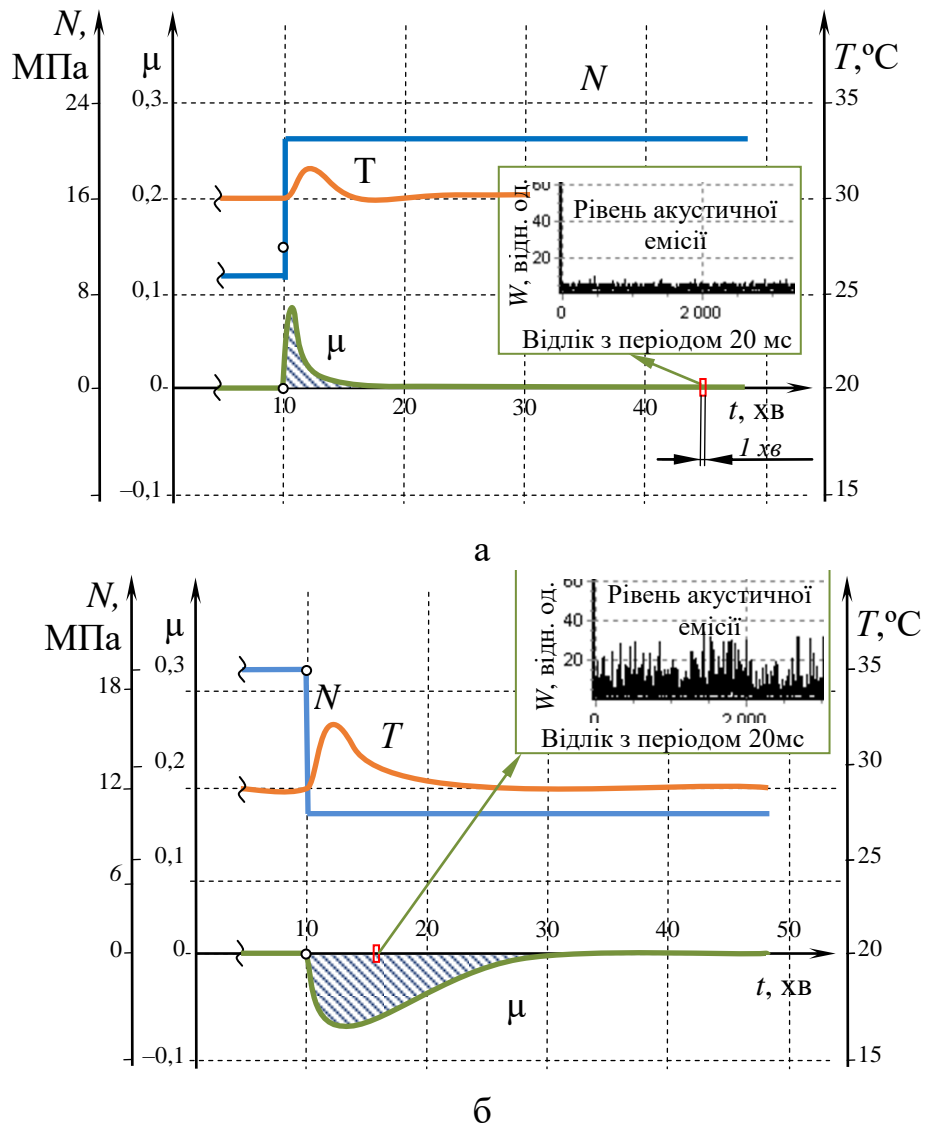


Рис. 5.5. Триботехнічні характеристики (коефіцієнт тертя, температура, АЕ) за часом в зоні контакту трибосистеми «сталь 30Х3ВА – бронза БрО10С2НЗ+ПИ 02-17»:

а – при збільшенні навантаження з 10 МПа до 20 МПа;

б – при розвантаженні з 20 МПа до 10 МПа

Поява часток зносу в цьому випадку відбувається у два етапи. На першому етапі у підповерхневому шарі формується область, насичена до критичного рівня атомно-молекулярним дефектами. На другому етапі в цій області відбуваються руйнування і частки зносу виникають на поверхні в результаті «мікровибуху» (рис. 5.6, а).

Рух частинок зношування в цьому випадку не збігається з напрямком руху трибоелементів відносно один одного (рис. 5.6, б).

Проведені аналогічні експерименти на бронзі ВБ23НЦ (зміна навантаження від 3,0 МПа до 1,6 МПа та навпаки) показали дещо іншу картину. Час припрацювання в цьому випадку значно зменшувався. Це, на наш погляд, пов'язано з наявністю в поверхневому шарі ще і м'якого металу вісмуту (рис. 5.3). У вихідному матеріалі бронзи ВБ23НЦ (табл. 2.2) він знаходиться у вигляді домішок у межах 0,025%. А після обробки ПИ 02-17 в поверхневому шарі його вміст зростає у 60 разів (до 1,5%). Даний елемент знаходиться у підповерхневому шарі, що підтверджується дослідженнями мікротвердості по глибині поверхневого шару (табл. 4.4).

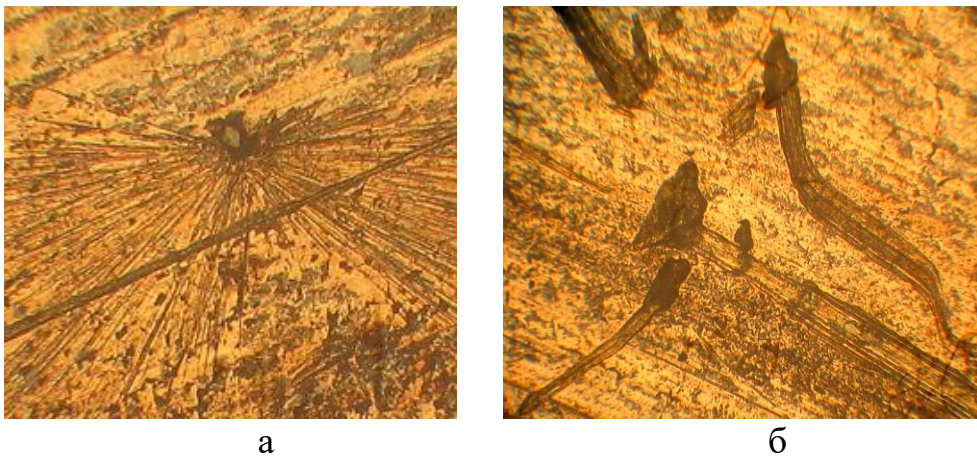


Рис. 5.6. Поверхнева фрактографія бронзи БрО10С2НЗ (область «від'ємного» тертя): а – поява частинок зношування; б – їх хаотичний рух на поверхні тертя при розвантаженні трибосистеми

Вісмут має низьку температуру плавлення та в умовах мікроконтактної взаємодії істотним чином зменшує накопичення внутрішньої енергії в поверхневому шарі бронзових зразків. Крім того, за рахунок цього знижується час припрацювання при зміні зовнішніх умов тертя, а також на режимах пуску-зупинки при виконанні експериментальних досліджень, при яких бронзовий зразок оброблявся за технологією ПИ 02-17.

Дана трибосистема піддавалась триботехнічним випробуванням за вище викладеною схемою, результати випробувань представлені на рис. 5.7.

Аналіз результатів випробування показав, що проведені технологічні заходи дозволили отримати практично «ідеальну» трибосистему. Після

першого навантаження трибосистеми, вона протягом 10-15 хв переходить в умови аномально низького тертя та зношування (момент тертя підтримується трибосистемою на нульовому рівні і має хвилеподібний характер (рис. 5.7).

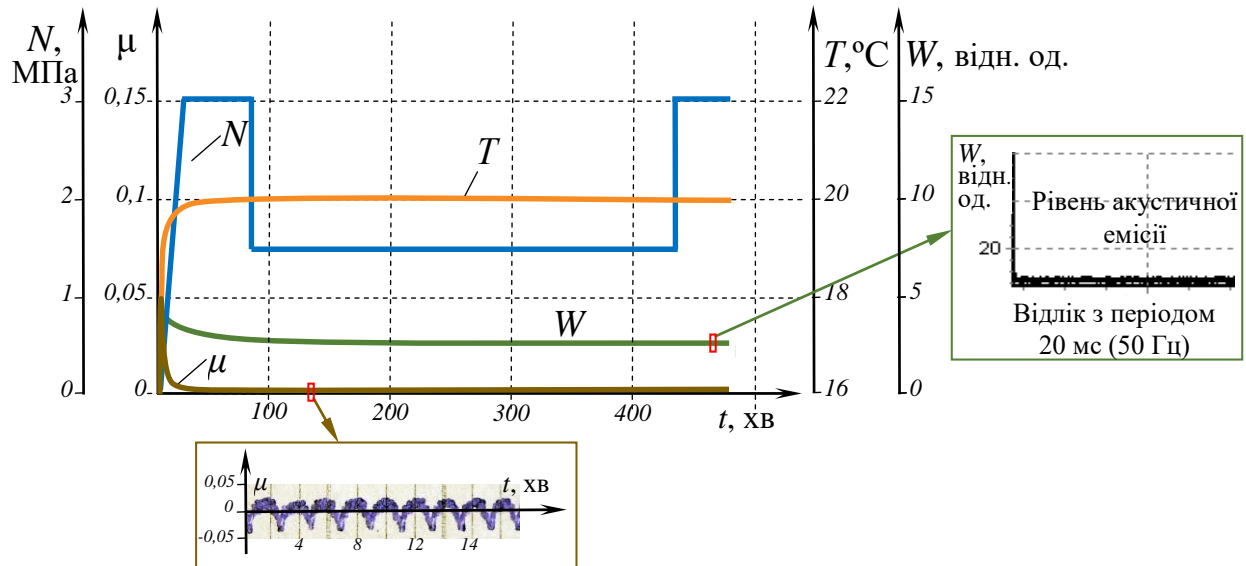


Рис. 5.7. Триботехнічні характеристики (моменту тертя,  $M$ , температури,  $T$ , акустичної емісії,  $W$ ) в зоні контакту трибосистеми за часом

Середня поверхнева температура в контактній області, виміряна безконтактним методом за допомогою пірометра, за 8 год випробувань підвищилася з 18 °C до 20 °C, причому значна частина цього тепла виділяється опорою модернізованої стандартної машини тертя 2070 СМТ-1, а також занурюваним насосом в системі мащення. При зміні навантаження (збільшення з 1,6 МПа до 3,0 МПа і зниження з 3,0 МПа до 1,6 МПа), трибосистема практично миттєво без припрацювання переходить до стаціонарного аномально низького тертя та зношування без додаткового тепловиділення ( $T = 20$  °C).

Таким чином, саморегулювання трибосистем, які працюють в умовах аномально низького тертя та зношування, здійснюється по каналу структурної ентропії  $S_c$  (зміна щільності внутрішньої (прихованої) енергії,  $\Delta U^*$  за рахунок статичної та динамічної складових внутрішньої енергії).

## 5.2 Умови самоорганізації поверхневих структур при аномально низькому терті та зношуванні

Однією з умов самоорганізації нерівноважних дисипативних структур [25] є наявність флуктуацій  $\sigma_{ik}$  і  $\varepsilon_{ik}$ , а отже, коефіцієнта тертя, безпосередньо пов'язаного з ними. З огляду на те, що робота з подолання сил тертя дорівнює зміні вільної енергії з протилежним знаком, можна записати ймовірність утворення флуктуацій [5, 6, 43, 44, 49] таким чином:

$$\Phi = e^{-\frac{\Delta U}{R_{fr}T}} = e^{-\frac{\Delta S}{R_{fr}}} e^{-\frac{U}{R_{fr}T}},$$

де  $\Delta U$  – зміна внутрішньої енергії;

$\Delta S$  – зміна структурної ентропії, що пов'язана з утворенням флуктуацій;

$R_{fr} = kN_f$  – універсальна стала тертя, де  $N_f$  – кількість атомних осциляторів;

$k$  – постійна Больцмана (1.4);

$T$  – середня поверхнева температура ТС.

Фізичний сенс  $R_{fr}$  характеризує «енергетичний розмір» елементарної трибосистеми, яка містить в ідеальних умовах (режим АНТЗ) однакову кількість атомних осциляторів  $N_f$  (механічних квантів  $N_Q$ ). Механічний квант є динамічним осцилятором дисипативних структур тертя, що працюють в режимі АНТЗ та його лінійний розмір дорівнює радіусу сферичного ідеального кристалу 7,177 нм. Механічний квант має властивість зворотно сприймати та розсіювати (повертати) при контактній взаємодії енергію зовнішнього механічного руху (впливу). Механічний квант випромінювання складає  $\approx 8103$  атома [43, 44, 49].

По суті, дотримання принципу Ле Шательє в умовах аномально низького тертя та зношування зводиться до досягнення рівноважного стану шляхом регулювання числа механічних квантів на плямах фактичного контакту.



При аномально низькому терті та зношуванні доречно говорити не лише про виробництво ентропії і внутрішньої енергії матеріалу, але і про їх знищення по хвильовому каналу.

Принципи саморегулювання трибосистем подібного роду при зміні зовнішніх умов мають свої особливості.

Для простоти розглянемо випадок, коли в трибосистемі верхній рухомий трибоелемент представляє собою ідеальне тверде тіло, а нерухомий складається з однорідних елементів (рис. 3.1, а), енергетичний обмін відбувається за реологічною моделлю Шведова (рис. 3.1, б).

Характер контактної взаємодії на плямах фактичного контакту наведено на рис. 5.8.

Прийmemo, що функціональними одиницями в системі служать не окремі елементи, а їх агрегати – ансамблі  $\varepsilon_i$  на плямах фактичного контакту.

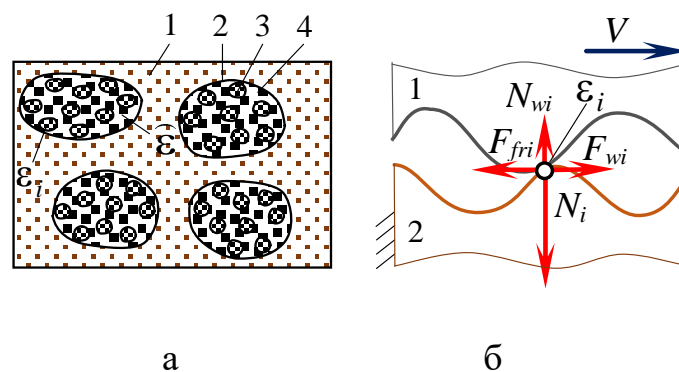


Рис. 5.8. Особливості поверхневого шару трибоелементів, що працює в умовах аномально низького тертя та зношування:

а – топографія поверхні тертя: 1 – номінальна площа контакту; 2 – фактична пляма контакту; 3 – окремо взаємодіючі елементи ансамблю,  $\varepsilon_i$ ; 4 – механічні кванти на плямі контакту,  $\hat{\varepsilon}$ ;

б – одиничний контакт:  $F_{fri}$  – імпульс сили від молекулярно-механічної складової;  $F_{wi}$  – імпульс сили на плямі контакту, який виникає при проковзуванні,  $N_i$  – узагальнена гравітаційна складова сили тертя;  $N_{wi}$  – антигравітаційна складова, яка зменшує коефіцієнт тертя і виникає при проковзуванні.

Будемо вважати, що ансамбль  $\varepsilon_i$  складається з  $i$ -ої кількості однотипних елементів  $\hat{\varepsilon}$  (механічних квантів), що знаходяться в  $i$ -му енергетичному стані ( $i = 1, 2, \dots, m; m$  – число можливих станів елементів). Кінетика процесу енергетичного обміну підпорядковується стохастичному диференційному рівнянню [165, 166]:

$$\frac{dx_j^i}{dt} = f_{ij}(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i) - g_{ij}(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i),$$

де  $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i$  – миттєві кількості енергії кінетичної взаємодії, оцінені сумарною величиною енергії фононів, що мають квантову природу вихідного, проміжного і кінцевого співвідношення імпульсів сили від молекулярно-механічної та хвильової складових сил тертя на окремих взаємодіючих елементах ансамблю  $\varepsilon_i$ , які формують кінетичне нанополе, як продукт симетрії кінетичної і гравітаційної складових сили тертя на всій поверхні;

$f_{ij}$  – функція, що описує швидкість досягнення рівноваги при зміні зовнішніх умов енергетичного обміну між хвильовими складовими від молекулярно-механічної і хвильової складових сили тертя  $F_w$   $j$ -го структурного стану елемента трибосистеми;

$g_{ij}$  – функція, що описує порушення цієї рівноваги.

Наявність саме антигравітаційної складової  $N_{wi}$  дає пояснення значного збільшення несучої здатності при переведенні ТС до аномально низького тертя та зношування при застосуванні технології фінішної обробки ПИ 02-17.

Для простоти також приймемо, що ці реакції на зміну зовнішніх умов призводять до перерозподілу енергетичного обміну між елементами ансамблів та майже миттєвій зміні структурного та функціонального стану.

Введемо цілочисельні функції  $\psi(t) = [\psi_1(t), \psi_2(t), \dots, \psi_m(t)]$  (тут  $\psi_i(t)$  – число однакових ансамблів  $\varepsilon_i$  в кожний момент часу  $t$ ) [165]. Тоді мірою організації трибосистеми може служити структурна ентропія [166]:

$$S_c(P_c) = - \sum_{i=1}^m P_{c_i} \ln P_{c_i},$$

де  $P_{c_i}(t) = \psi_i(t) / \sum_{j=1}^m \psi_j(t)$  – структурна фрактальна організація поверхневих шарів.

Таким чином, на першому етапі адаптації до нових умов зовнішнього середовища (на етапі навантаження), при  $s \in S$  трибосистема дезорганізується і її структурна ентропія досягає величини:

$$S_c(P_{c1}^*, P_{c2}^*) = P_{c1}^* + kI \left( \frac{P_{c1}^*}{P_{c2}^*} \right),$$

де  $P_{c1}^*$  і  $P_{c2}^*$  – оптимальна структурна фрактальна організація поверхневих шарів трибосистеми до і після її зміни;

$k$  – коефіцієнт пропорційності, залежить від властивостей матеріалу;

$I(P_{c1}^*/P_{c2}^*)$  – кількість інформації.

На другому етапі адаптації, трибосистема встановлює нову організацію імовірнісних ансамблів, яка оптимально відповідає новій умові зовнішнього середовища  $s \in S$  в напрямку виконання принципу максимуму надійності (умови аномально низького тертя та зношування).

Початкова дезорганізація трибосистеми при її адаптації до нових умов зовнішнього середовища викликана тим, що встановлення нової структури поверхневого шару, передбачає структурну перебудову як на нано-, так і на мезорівнях. Експериментально встановлено, що в залежності від переходу до більш напружених, або легких умов роботи відбувається накопичення, або розсіювання, або продукування додаткових енергетичних ресурсів при структуруванні. В результаті чого за короткий час відбувається адаптація до

нових умов зовнішнього тертя, при дотриманні основного принципу рівності між молекулярно-механічною і хвильовою складовими сил тертя.

Взаємний ротаційно-коливальний рух механічних квантів одного відносно іншого всередині елементарної ТС (область контактної взаємодії) в умовах АНТЗ забезпечується ідеальною пружністю квазів'язкої течії. Розрахунковий коефіцієнт тертя між механічними квантами дорівнює приблизно  $10^{-8}$  [43, 44, 49]. Це явище забезпечує процеси зерномежового ковзання (надпластичності) і дає пояснення практично «миттєвому» структуруванню поверхні бронзових зразків, які працюють в умовах АНТЗ.

Основоположною термодинамічною умовою досягнення цього балансу є структурна ентропія, величина якої дорівнює:

$$S_c(P_{c1}^*, P_{c2}^*) = - \sum_{i=1}^m P_{c1_i}^* \log P_{c2_i}^* .$$

Структурування, яке обумовлює досягнення даних умов, є умовами утворення «хвилі, що біжить» і отримало тлумачення в електротехніці [67].

Експериментальним підтвердженням правомірності такого підходу є оцінка топологічних особливостей поверхневого шару трибосистеми [167-171], що працює в умовах нормального механохімічного зношування, і після переведення даної трибосистеми в умови аномально низького тертя та зношування. Використана програма Фур'є-аналізу структурної організації поверхневого шару [24], дозволяє оцінити рівень орієнтації об'ємних структурних елементів в двомірному просторі, а також рівень різноманітності за розміром і формою на наноструктурному рівні (аналізуються тільки малорозмірні елементи).

Порівняльний фрактальний аналіз поверхонь тертя при роботі трибосистеми в умовах нормального механохімічного тертя і аномально низького (рис. 5.9) показав, що при нормальному терті головний вектор траєкторій Редже по досліджуваним поверхням зі збільшенням  $\times 1340$ , має нахил горизонтальної осі 4 градуси. У той же час при аномально низькому

терті та зношуванні головний вектор орієнтований по відношенню до напрямку руху трибоелемента (96 градусів, кут вимірюється відносно горизонтальної осі проти годинникової стрілки).

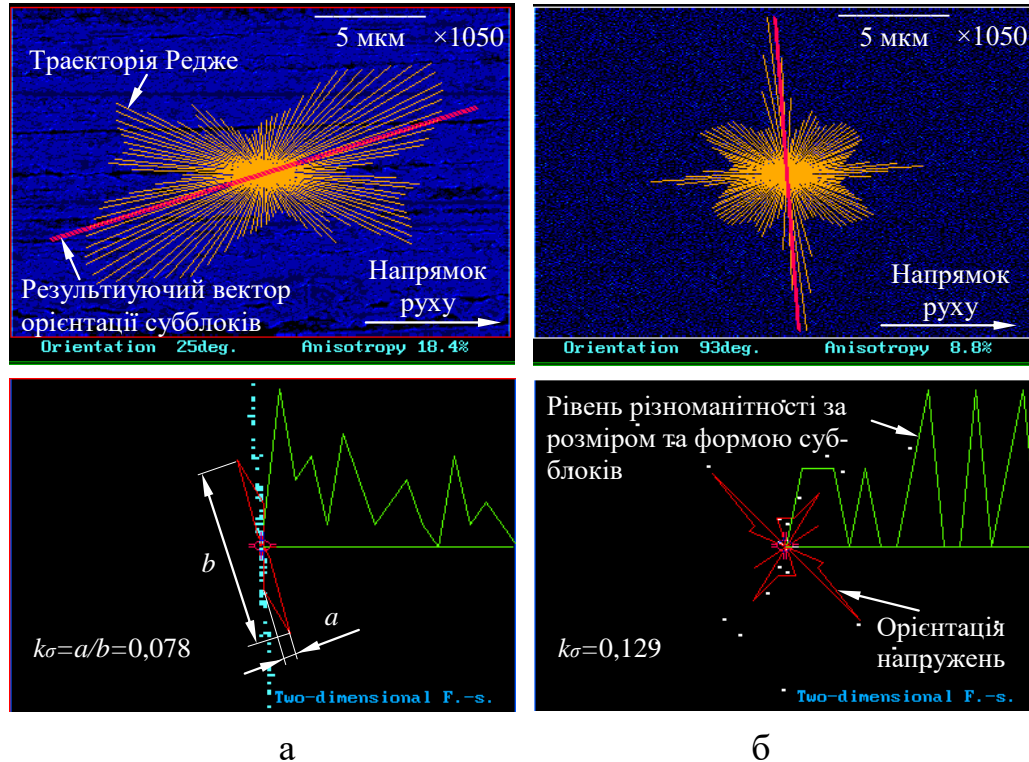


Рис. 5.9. Фур'є-аналіз розподілу орієнтацій елементарних осередків мікрорельєфу поверхонь тертя трибосистеми:

а – при нормальному терті; б – при аномально низькому терті

Рівень різноманітності субблоків на наноструктурному рівні (структурна ентропія) показує суттєве збільшення структурної ентропії при переході від нормального до аномально низького тертя та зношування.

Величина та орієнтація напружень оцінюється коефіцієнтом стиснення елементарних структурних елементів та істотно відрізняється. Для аномально низького тертя вона оцінена коефіцієнтом стиснення  $k_{\sigma}$  і в 2,3 рази більше, ніж за умов нормального механохімічного зношування.

Дане дослідження ще раз підтверджує дотримання першого і другого законів термодинаміки при роботі трибосистеми в умовах аномально низького тертя та зношування. При аномально низькому терті та зношуванні

структурна ентропія досягає максимально можливих значень для даної трибосистеми, а величина внутрішньої енергії, безпосередньо пов'язаної з напруженням, мінімізується. Ці умови забезпечує хвильова складова сили тертя.

Аномально низьке тертя та зношування обумовлено досягненням рівноваги між інтегральною величиною імпульсу сили від хвильової і молекулярно-механічної складових сили тертя, зсунутих за фазою.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження впроваджено на АТ «ФЕД» та реалізовано при збільшенні ресурсу приводів-генераторів ГП21КМ для літаків сімейства Ан-148/158/178. Проведені стендові випробування повністю підтверджують наукові положення досягнення аномального низького тертя та зношування. Так, використання даного модифікування дозволило зменшити тепловиділення агрегату на 15%.

Подальші ресурсні випробування показали практично повну відсутність зношування трибоелементів, які оброблені за технологією, що дозволяє експлуатувати агрегат за технічним станом при збільшенні міжремонтного ресурсу у 4 рази. Це відображено в акті впровадження результатів дисертаційної роботи (додаток В).

Економічний ефект від впровадження наукових результатів може бути оцінений наступними розрахунками. Вартість капітального ремонту агрегату ГП21КМ, за даними АТ «ФЕД», становить 25000 дол. США. Тому економія від впровадження технології ПИ 02-17 для експлуатуючої організації при доведеному збільшенні ресурсу у 4 рази складає 75000 дол. США тільки на одному агрегаті. Проведення повного розрахунку економічного ефекту від впровадження технології за стандартними економічними методиками неможливо через закритість інформації про вихідні дані для цих розрахунків, що є специфікою оборонного виробництва АТ «ФЕД».

### 5.3 Висновки по п'ятому розділу

1. Аналіз результатів мікрогеометричних характеристик шорсткості поверхні бронзових трибоелементів з БрО10С2Н3 (при дослідженнях задиростійкості), оброблених за технологією ПИ02-17, вказує на те, що при збільшенні навантаження до 20 МПа параметри шорсткості суттєво змінюються ( $Ra$  зменшується на 60 %). Швидка та значна зміна мікрогеометричних характеристик може бути пояснена аномальним масоперенесенням в поверхневих шарах і переході пластичної деформації від класичного механізму до механізму зернограничного ковзання.

2. Структурна самоорганізація при досягненні аномально низького тертя та зношування направлена на підтримання трибосистеми в цьому режимі роботи шляхом структурування поверхневого шару, спрямованого на підтримання аномально низького тертя та зношування. При цьому, при підвищенні навантажень, поверхня істотно вигладжується на відміну від нормального механохімічного зносу.

3. Фундаментальною величиною, яка визначає стійкість трибосистеми в умовах нерівноважної самоорганізації, є виробництво надлишкової ентропії  $P[\delta^2 \dot{S}]$ , яка може приймати як позитивні, так і від'ємні значення. Це дає пояснення переходу трибосистеми «сталь 30Х3ВА – бронза БрО10С2Н3+ПИ 02-17» до негативного тертя при її розвантаженні.

4. Економічний ефект від впровадження наукових результатів може бути оцінена наступними розрахунками. Вартість капітального ремонту агрегату ГП21КМ за даними АТ «ФЕД», становить 25000 дол. США. Тому економія від впровадження технології ПИ 02-17 для експлуатуючої організації при доведеному збільшенні ресурсу у 4 рази складає 75000 дол. США тільки на одному агрегаті.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове-практичне завдання з визначення факторів, які сприяють роботі реальних трибосистем «сталь-бронза» в умовах аномально низького тертя та зношування (що значно підвищує їх ресурс), а також розробки технології переведення їх до таких умов шляхом попередньої модифікації поверхонь.

При виконанні роботи отримані наступні основні результати.

2. В результаті аналізу літературних джерел встановлено, що на даний час в експериментальній і теоретичній трибології наявність хвильової складової представляється як додатковий фактор дисипації енергії, що підводиться ззовні, який не має значного впливу. Але, на основі аналізу механізмів дисипації зовнішньої енергії, що підводиться до трибосистеми, як факторів зниження тертя в різноманітних областях живої та неживої природи уточнено роль хвильової складової тертя та зношування. При певних термодинамічних умовах в трибосистемах формується достатньо значна хвильова складова сили тертя, яка істотно зменшує молекулярно-механічну складову. Теоретично визначено, що перехід від нормального механохімічного тертя та зношування до аномально низького тертя та зношування, можливий після формування поверхневого шару з певними реологічними характеристиками. В якості основного джерела перетворення енергії виступають енергетичні дефекти – фонони – кванти хвиль розтягування-стиснення і зсуву (звукові хвилі), які являються основною причиною енергетичного знищення. Величина енергії в умовах аномально низького тертя та зношування оцінюється з точки зору квантової теорії величиною механічного кванту  $\hat{\epsilon}$  – мінімального числа атомів, здатних забезпечувати такий їх конфігураційний розподіл, який має властивості зворотно сприймати і розсіювати (повертати) енергію зовнішнього механічного руху.



3. Теоретично встановлено, що при зміні зовнішніх умов тертя змінюється ступінь збудження ТС –  $n$ , яка залежить від кількості механічних квантів  $\hat{\varepsilon}$ . Будь-яка зміна в ТС, яка виводить її з рівноваги, згідно принципу Ле Шательє ініціює в ТС процеси, які намагаються повернути її у початкове положення. За ці процеси в розробленій моделі відповідає модуль канонічного розподілу енергії  $\Theta$ , який регулюється мікрогеометрією поверхневого шару ТС. Таким чином відбувається саморегулювання в трибосистемах в умовах аномально низького тертя та зношування при зміні зовнішніх умов, що знайшло експериментальне підтвердження.

4. Встановлено, що контактна взаємодія шорсткостей за моделлю твердого тіла у вигляді міжатомних зв'язків дає можливість оцінити співвідношення молекулярної та механічної складових енергії при квазіпружній контактній взаємодії. Основний внесок (до 75%) припадає на механічну складову, яка оцінюється імпульсом сили на плямі контакту і залежить від енергії контакту в стані зчеплення, ступеня збудження трибосистеми та енергій зовнішніх та внутрішніх сил. Умовою досягнення АНТЗ є рівність робіт, які виконують зовнішні та внутрішні сили в умовах контактної взаємодії.

5. Експериментально визначено основні напрямки та методи дослідження механізмів дисипації енергії в умовах аномально низького тертя та зношування. Обрано комплексні металофізичні дослідження для розкриття суті фізичних процесів, які відбуваються при переході від нормального механохімічного тертя та зношування до аномально низького при проведенні комплексних досліджень. Оптимізацією реологічної будови поверхневого шару реальних трибосистем вдалося досягти умов, коли дисипативний об'єм в умовах контактної взаємодії здатний зворотно трансформувати (розсіювати) енергію зовнішнього руху при досягненні умов АНТЗ. Дану технологію можна віднести до розряду ресурсозберігаючих з високим ступенем енергоефективності.

6. Дослідження амплітудно-частотних характеристик пружних коливань досліджуваних трибосистем в діапазоні частот від 0 до 10 кГц дозволили встановити, що максимальне значення амплітуд коливань при нормальному механохімічному зношуванні знаходиться в діапазоні 400...500 Гц. При дослідженні аномально низького тертя та зношування на діаграмі спостерігаються два характерні максимуми: перший від 500 до 700 Гц, другий від 6 до 7 кГц, тобто на порядок вище. Причому максимальні значення амплітуд для даних ділянок мають рівні значення і становлять 42 дБ. Пік у першому діапазоні відображає енергетику від молекулярно-механічної складової сили тертя, а другий – візуалізує хвильову складову сили тертя. Встановлено, що наявність практичної рівності максимальних значень амплітуд свідчить про досягнення рівності між імпульсами сили від молекулярно-механічної та хвильової складових сили тертя, що дає пояснення наявності аномально низького тертя та зношування.

7. Розроблено технологію модифікування поверхонь тертя бронзових зразків в трибосистемі «сталь-бронза» шляхом насичення поверхневого шару кремнієм в процесі фінішної обробки деталей. Комплексні фізичні дослідження доказали, що при нормальному механохімічному зношуванні формується позитивний градієнт твердості по глибині поверхневого шару, у той час як при аномально низькому терті та зношуванні спостерігається від'ємний градієнт: поверхневий шар – пружний, підповерхневий – пружно-пластичний (реологічна модель Шведова).

8. Структурна самоорганізація при досягненні аномально низького тертя та зношування направлена на підтримання трибосистеми в цьому режимі роботи шляхом структурування поверхневого шару, спрямованого на підтримання максимальної зносостійкості. При цьому при підвищенні навантажень поверхня істотно вигладжується на відміну від нормального механохімічного зносу.

9. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження впроваджено на АТ «ФЕД» та реалізовано при збільшенні ресурсу приводів-генераторів

ГП21КМ для літаків сімейства Ан-148/158/178. Проведені стендові випробування повністю підтверджують наукові положення досягнення аномального низького тертя та зношування. Так, використання даного модифікування дозволило зменшити тепловиділення агрегату на 15%.

Подальші ресурсні випробування показали практично повну відсутність зношування трибоелементів, які оброблені за технологією ПИ 02-17, що дозволяє експлуатувати агрегат за технічним станом при збільшенні міжремонтного ресурсу у 4 рази. Економічний ефект від впровадження наукових результатів може бути оцінена наступними розрахунками. Вартість капітального ремонту агрегату ГП21КМ за оцінками АТ «ФЕД», становить 25000 дол. США. Тому економія від впровадження технології ПИ 02-17 для експлуатуючої організації при доведеному збільшенні ресурсу у 4 рази складає 75000 дол. США тільки на одному агрегаті.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Запорожец В. В., Стадниченко В. Н., Трошин О. Н., Стадниченко Н.Г., Джус Р.Н. О механизмах подвижности металлокерамического слоя в технологиях триботехнического восстановления деталей. *Військово-технічний збірник*. 2010. № 3. С. 101–106.
2. Запорожец В. В., Стадниченко В. Н. Идентификация наноизносных режимов трения с использованием метода акустической эмиссии. *Технологические системы*. 2012. № 4. С. 42–56.
3. Запорожец В. В., Стадниченко В. Н., Трошин О. Н. Теоретические и экспериментальные основы акустико-эмиссионной идентификации механизмов изнашивания и прогнозирования ресурса трибосистем. *Проблеми трибології*. 2013. № 1. С. 16–29.
4. Запорожец В. В., Стадниченко В. Н. Механізми припрацювання пар тертя в об'ємних гідромашинах в умовах нанозношування в присутності трибовідновлюючих сумішей. *Проблеми трибології*. 2013. № 4. С. 92–95.
5. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Москва : Едиториал УРСС, 2014. 360 с.
6. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Москва : Едиториал УРСС, 2014. 304 с.
7. Бершадский Л. И. О самоорганизации и концепциях износостойкости трибосистем. *Трение и износ*. 1992. Т. 13, № 6. С. 1077–1094.
8. Ruiz-Andres M., Conde A., de Damborenea J., Garcia I. Use of a dissipated energy approach to analyses the effects of contact frequency on the reciprocating sliding wear of non-lubricated DP600 steel against corundum. *Wear*. 2015. 15 Nov. (Vol. 342-343). P. 288-296.
9. Вейник А. И. Термодинамическая пара. Минск : Наука и техника, 1973. 383 с.
10. Владимиров В. И. Проблемы физики трения и изнашивания. *Сб. науч. тр. Физико-технического института. Физика износостойкости поверхностей металлов*. Ленинград, 1988. С. 8–41.
11. Holmberg K., Andersson P., Nylund N.O., Mäkelä K., Erdemir A. Global energy consumption due to friction in trucks and buses. *Tribology International*. 2014. Vol. 78. P. 94-114.
12. Арнольд В. И. Теория катастроф. Москва : Наука, 2000. 128 с.
13. Zhu J., Changbin T. Effect of rotation friction ratio on the power extraction performance of a passive rotation VAWT. *International Journal of Rotating Machinery*. 2019. P. 1-10.

14. Стадниченко В. Н., Стадниченко Н. Г., Джус Р.Н., Трошин О.Н. Об образовании и функционировании металлокерамического покрытия, полученного с помощью ревитализантов. *Вестник науки и техники*. 2004. Вып. 1(16). С. 18–27.

15. Стадниченко В. Н., Трошин О.Н. Синергетическая концепция самоорганизации в трибологических системах при управлении тепловым потоком. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»: Темат. вип. : Технології в машинобудуванні*. 2007. № 17. С. 49–62.

16. Устройство для увеличения скорости хода судна: пат. 2397101 С1 РФ: МПК В63В 1/36 (2006.01). № 2009121794/11; заявл. 08.06.2009; опубл. 20.08.2010, бюл. № 23. 7 с.

17. Pursell C.W. From playgrounds to PlayStation: the interaction of technology and play. J.Hopkins Univ. Press. Baltimore, Meryland, 2015. 200 p. URL: [https://books.google.com.ua/books/about/From\\_Playgrounds\\_to\\_PlayStation.html?id=bdKhjwEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ua/books/about/From_Playgrounds_to_PlayStation.html?id=bdKhjwEACAAJ&redir_esc=y).

18. Тесла Н. Утраченные изобретения Николы Тесла. Москва : Яуза. Эксмо, 2009. 288 с.

19. Войтов В. А., Стадниченко В. Н., Стадниченко Н. Г., Джус Р.Н., Билик А.П. Технологии триботехнического восстановления – обзор и анализ перспектив. *Проблеми трибології*. 2005. № 2. С. 67-74.

20. Запорожець В.В., Стадниченко В. Н., Трошин О.Н. О механизмах подвижности металлокерамического слоя в технологиях триботехнического восстановления деталей. *Перспективи розвитку озброєння і військової техніки сухопутних військ* : зб. тез доп. III Всеукр. наук.-техн. конф., м. Львів, 13-14 квіт. 2010 р. Львів, 2010. С. 74.

21. Трошин О. Н. Неравновесная самоорганизация в трибосистемах. *Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах* : зб. тез доп. 15 наук.-техн. конф., 17-18 верес. 2015 р. Чернігів. 2015. С. 178–179.

22. Nosonovsky M., Mortazavi V. Friction-induced vibrations and self-organization. *Mechanics and non-equilibrium thermodynamics of sliding contact*. Taylor & Francis Group, 2014. 331 p.

23. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2008. 387 с.

24. Войтов В. А. Стадниченко В.М., Варваров В.В. Теоретичні та природні передумови досягнення аномально низького тертя та зношування в трибології. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2019. № 2(60). С. 113-125.

25. Трошин О. Н. Научная парадигма достижения аномально низкого трения в трибологии. *Вісник ХНТУСГ*. 2017. Вип. 184. С. 102-110.

26. Костецкий Б. И., Носовский И. Г., Караулов А. К. Поверхностная прочность материалов при трении. Київ : Техніка, 1976. 296 с.
27. Стадниченко В. Н., Трошин О. Н., Стадниченко Н. Г., Приймак А. В., Просяник И. И. Классификация видов наноизноса по значению коэффициента диссипации подводимой внешней энергии к трибосистеме. *Збірник наукових праць ХУПС*. 2011. № 1 (27). С. 51–61.
28. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. Москва : Машиностроение, 1977. 526 с.
29. Беркович П. И., Громаковский Д. Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / под ред. Д. Г. Громаковского. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2000. 268 с.
30. Kosminska Y.O., Perekrestov V. I. Regularities of self-organization of technological conditions during plasma-arc synthesis of carbon nanotubes. *Diamond and Related Materials*. 2018. Vol. 85. P. 37-48.
31. Persson B.N.J. Sliding friction. Physical principles and applications. Berlin : Springer-Verlag, 2000. 514 p.
32. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н., Голубев Н.Ф. Моделирование износостойкости и долговечности материалов и технических средств на основе структурно-энергетической теории изнашивания. *Трение и износ*. Июнь 2002. Т. 4. №2.
33. Garbar I.I. The effect of load on the structure and wear of friction pair materials (example of low-carbon steel and copper). *Wear*. 1997. Vol. 205, Iss. 1–2. P. 240-245.
34. Furustig J. Dobryden I., Almqvist A., Almqvist N., Larsson R. The measurement of wear using AFM and wear interpretation using a contact mechanics coupled wear model. *Wear*. 2016. Vol. 350–351. Pp. 74-81.
35. Gromakovsky, D.G., Malyarov, A.N., Samarin, Y.P. Modelling and Wear Calculation on Friction. *The World Tribology Congress : Abstracts of Papers*. Bookcraft Limited, Bath, UK, 1997. 462 p.
36. Ramalho A. A reliability model for friction and wear experimental data. *Wear*, Volume 269, Iss. 3–4, 2010. Pp. 213-223.
37. Kucharski S., Starzyński G. Contact of rough surfaces under normal and tangential loading. *Wear*, Vol. 440–441, 2019. Pp. 1-14.
38. Eleod A. Numerical modeling of particle detachment. *The World Tribology Congress : Abstracts of Papers*. Bath, UK: Bookcraft Limited. 1997. P. 44.
39. Black, A.J., Kopalinsky, E.M., Oxley P.L.B. Asperity deformation models for explaining the mechanisms involved in metallic sliding friction and wear - a review. London. 1993. I Mech E., Vol 207. Pp. 335-352.
40. Gromakovsky, D.G., Kovshov, A.G., Ibatullin, I.D., Dynnikov, A.V.

Problems of Kinetics of Surface Destruction. Proceedings of VII-th International Symposium "INTERTRIBO 2002", section B – Wear, Slovak Republic, Stara Lesna, House of Technology, 2002. P. 57-58.

41. Запорожець В.В., Стадниченко В.М., Трошін О.М. Фізичні основи нерівноважного самовпорядкування в трибо системі. *Технологические системы*. 2013. 4 (65). С. 62–70.

42. Иванова В. С. Синергетика: прочность и разрушение металлических материалов. Москва : Изд. РАН. 1992. 160 с.

43. Федоров С. В. Общие закономерности эволюции трения с позиций самоорганизации и синергизма. В кн. : Известия КГТУ. Калининград, 2007. № 11. С. 22–31.

44. Федоров С. В. Общие закономерности эволюции трения с позиций самоорганизации и синергизма. *Вестник науки и образования Северо-запада России* (Научный рецензируемый электронный журнал). Калининград, 2016. Т. 2. № 1. С. 1–14. URL: <http://vestnik-nauki.ru>.

45. Васильев А.С., Дальский А.М., Золотаревский Ю.М. Направленное формирование свойств изделий машиностроения. Москва : Машиностроение, 2005. 384 с.

46. Погодаев Л. И. Структурно-энергетические модели поведения (надежности) материалов при импульсном нагружении. *Трение, износ, смазка*. 2013. Т. 15, № 57. URL: <http://www.tribo.ru/>

47. Jiang L., Huang W, Chenglong L., Yongyi G., Chenhui C., Junjun W., Weijie Y. The effects of stored energy on wear resistance of friction stir processed pure Ti. *Results in Physics*. Vol. 12, March 2019, Pp. 1276-1284.

48. Дедков Г.В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели, Т. 170, №6. 2000. С. 586-617.

49. Fedorov S.V. Nano-Structural Standard of Friction and Wear. *Tribology in Industry*. 2018 Vol. 40(2). Pp. 225-238.

50. Bhushan B. Nanotribology and Nanomechanics an Introduction. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. 1148 p.

51. Bhushan B., Jacob N. Nanotribology: friction, wear and lubrication at the atomic scale. Israelachvili & Uzi Landman. *Nature*. 1995. Vol. 374. P. 607-616.

52. Li X., Bhushan B, A review of nanoindentation continuous stiffness measurement technique and its applications. *Materials characterization*. 2002, Vol. 48 (1). P. 11-36.

53. Stadnichenko V. M. Gray's Paradox and Wave Solutions in Explaining Anomalously Low Friction and Wear in Tribology. *International Journal of Materials Science and Applications*. 2016. Vol. 5, № 1. P. 23–30.

54. Menezes P. L. Nosonovsky M., Ingole S. P., Kailas S.V., Lovell M. R.

Tribology for scientists and engineers: from basics to advanced concepts. New York : Springer Science+Business Media, 2013. 948 p.

55. Nosonovsky M., Bhushan B. Thermodynamics of surface degradation, self-organization and self-healing for biomimetic surfaces. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. Vol. 367. Iss. 1893. 2009. P. 1607-1627.

56. Gutowski P., Leus M. Computational Model for Friction Force Estimation in Sliding Motion at Transverse Tangential Vibrations of Elastic Contact Support. *Tribology International*. 2015. Vol. 90, № 1. P. 455-462.

57. Starcevic J., Filippov A. E. Simulation of the influence of ultrasonic in-plane oscillations on dry friction accounting for stick and creep. *Physical Mesomechanics*. 2012. Vol. 15, № 3. P. 330–332.

58. Bhushan B. Introduction to tribology. John Wiley & Sons, 2013. 1700 с.

59. Stadnychenko V. M., Troshyn O. M. Analysis of the dissipation processes of external input energy in conditions of anomalous low friction and wear. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 11(5). P. 1-17.

60. Стадниченко В. Н., Трошин О. Н., Приймак А. В. Прогнозирование ресурса трибосистем, работающих в режиме наноизнашивания, методом акустической эмиссии. *Збірник наукових праць ХВПС*. 2010. №4 (26). С. 41–48.

61. Cho D.-H., Bhushan B. Nanofriction and nanowear of polypropylene, polyethylene terephthalate, and high-density polyethylene during sliding. *Wear*. 2016. Vol. 352-353. P. 18-23.

62. Cho D.-H., Bhushan B., Dyess J. Mechanisms of static and kinetic friction of polypropylene, polyethylene terephthalate, and high-density polyethylene pairs during sliding. *Tribology International*. 2016. Vol. 94. P. 165-175.

63. Sundararajan S., Bhushan B., Namazu T., Isono Y. Mechanical property measurements of nanoscale structures using an atomic force microscope. *Ultramicroscopy*. 2002. Vol. 91(1-4). P. 111-118.

64. Brunbauer S., Winter G., Antretter Th., Staron P., Ecker W. Residual stress and microstructure evolution in steel tubes for different cooling conditions. Simulation and verification. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 747, 2019, P. 199-205.

65. Макаров З. Ю. Рациональный статус случайности в научном детерменизме. *Філософія науки: традиції та інновації*. 2014, № 2 (10). С. 60–73.

66. Баранов А. В., Вагнер В. А., Тарасевич С. В. Самоорганизация трибосистем при граничном трении металлов. *Ползуновский вестник*. 2009. № 1-2. С. 155–158.

67. Шимони К. Теоретическая электротехника. Москва : Книга по требованию, 2012. 776 с.

68. Мала гірнича енциклопедія : в 3 т. / за ред. В. С. Білецького. Донецьк :



Схід. видав. дім, 2013. Т. 3. 644 с.

69. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. Москва : Мир, 1973. 280 с.

70. Пригожин И., Стенгерс И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени. [Изд. 8-е]. М.: Едиториал УРСС, 2014. 229 с.

71. Пригожин И. От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках : пер. с англ. / под. ред. Ю. Л. Климонтовича. Москва : Наука, 1985. 328 с.

72. Пригожин И. Философия нестабильности. *Вопросы философии*. 1991. № 6. С. 46–57.

73. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур : пер. с англ. Ю.А. Данилова, В.В. Белого. Москва : Мир, 2002. 461 с.

74. Tschacher W., Haken H. Intentionality in non-equilibrium systems? The functional aspects of self-organized pattern formation. *New Ideas in Psychology*. 2007. Vol. 25. Iss. 1. P. 1-15.

75. Haken H. Synergetics. *Physica B+C*. 1984. Vol. 127, Iss. 1–3. P. 26-36.

76. Haken H. Synergetics—an interdisciplinary approach to phenomena of self-organization. *Geoforum*. 1985. Vol. 16, Iss. 2. P. 205-211.

77. Haken H. Synergetics and computers. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1988. Vol. 22, Iss. 2–3. P. 197-202.

78. Frank T. D., Daffertshofer A., Peper C. E., Beek P. J., Haken H. H-theorem for a mean field model describing coupled oscillator systems under external forces. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 2001. Vol. 150. Iss. 3–4. P. 219-236.

79. Gorodetski A., Pyashenko Yu. Minimal and strange attractors. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 1996. Vol. 6. № 6. P. 1177-1183.

80. Pyashenko Yu. Minimal attractors. NJ. Hackensack : Equadiff World Sci. Publ, 2003. P. 421–428.

81. Малинецкий Г. Г. Математические основы синергетики: Хаос, структуры, вычислительный эксперимент : изд. 6-е. Москва : Либроком, 2009. 312 с.

82. Малинецкий Г. Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент. Москва : Наука, 2002. 256 с.

83. Войтов В. А. Механизм повышения износостойкости трибосистем посредством управления тепловыми потоками. *Проблемы трибологии*. 2010. № 4. С. 95–100.

84. Агеев Е.П. Неравновесная термодинамика в вопросах и ответах. Москва : Эдиториал УРСС, 2001. 136 с.

85. Трошин О. Н., Стадниченко В. Н., Лемешев Н. Ю. Оценка влияния

масштабного фактора трибосистем на енергоємність параметрів акустическої емісії. *Збірник наукових праць ХУПС*. 2014. № 2 (39) С. 115–117.

86. Войтов В. А. Моделирование процессов трения и изнашивания в трибосистемах гидромашин как основа решения задач проектирования : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.04. Хмельницкий, 1999. 372 с.

87. Войтов В. А., Яхно О. М., Аби-Сааб Ф. Х. Принципы конструктивной износостойкости узлов трения гидромашин. Киев : Нац. техн. ун-т «Киев. политехн. ин-т», 1999. 190 с.

88. Войтов В. А. Конструктивная износостойкость узлов трения гидромашин : ч. 2. Методология моделирования граничной смазки в гидромашинках / Харьков : Центр Леся Курбаса, 1997. 152 с.

89. Варваров В. В. Механізми самоорганізації в трибосистемах, які працюють в умовах аномально низького тертя та зношування. *Системи озброєння і військова техніка*. 2019. № 2(58). С. 70-79.

90. Ратнер М., Ратнер Д. Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи : пер. с англ. Москва : Вильямс, 2004. 240 с.

91. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. И. Кинетическая природа прочности твердых тел. Москва : Наука, 1974. 560 с.

92. Барбашов В. И., Комыса Ю. А. Механо-электрический эффект в твердых электролитах. *Физика твердого тела*, 2005, Т. 47, Вып. 2. С. 229–232.

93. Вольфсон Е. Ф. Эффект Горского. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2016. № 59 (5). С. 357–359.

94. Трошин О. Н., Стадниченко В. Н., Стадниченко Н. Г. Методические аспекты неравновесной самоорганизации трибосистем. *Системи озброєння і військова техніка*. 2014. № 1 (37). С. 233–241.

95. Quinn, T.F.J., Oxidational Wear Modelling : part III : The Effects of Speed and Elevated Temperatures. *Absrtacts of Papers of The World Tribology Congress*. 1997. Bath, UK : Bookcraft Limited P. 561.

96. Джус Р. М., Стадниченко В. М., Трошин О. М. Термодинамічна інтерпретація квазібеззносності покриттів, отриманих мінеральними добавками до мастильних матеріалів. *Збірник наукових праць НЦ ПС ЗСУ*. 2004. Вип. 7. С. 68-73.

97. Основи трибології / В. А. Войтов та ін. : під заг. ред. В. А. Войтова. Харків : ХДТУСГ ім. Петра Василенка, 2008. 342 с.

98. Подмастерьев К. В., Мишин В. В., Пахолкин Е. В., Марков В. В. Автоматизированная система сбора и анализа данных при трибомониторинге. *Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики : Материалы междунар. научн.-практ. конф.* – Новочеркасск : НПО «Темп», 2001. Ч. 3. С. 40-42.

99. Sakalo V., Sakalo A., Rodikov A., Tomashevskiy S. Computer modeling of processes of wear and accumulation of rolling contact fatigue damage in railway wheels using combined criterion. *Wear*. 2019. Vol. 432–433, P. 302-310.

100. Громаковський Д. Г., Горохов В. А., Кулаков Г. А., Рыбакова Л. М., Ибатуллин И. Д. Современные технологии и долговечность поверхностей трения при усталостном механизме изнашивания. *Трение и смазка в машинах и механизмах*. Вып. 3 (март). 2006. С.11-20.

101. Способ упрочнения поверхностей деталей: пат. № 2198954. Российская Федерация: С23С8/02, С23С8/52, заявл. 26.03.01; опубл. 20.02.03. Бюл. № 5. 4 с.

102. Babak V. P., Filonenko S. F., Kalita V. M. Model of acoustic emission signal at self-accelerated crack development. *Aviation*. 2005. № 2. V.IX. P. 3-8.

103. Джус Р.М., Стадніченко В. М., Трошін О. М. Про границі застосування методу акустичної емісії при вирішенні задач трибо діагностики. *Збірник наукових праць*. 2004. Вип. 1 (10). С. 187-194.

104. Стадніченко М. Г., Фененко О. О., Варваров В. В. Методика прогнозування ресурсу конструкційних матеріалів силових елементів планера літального апарату військового призначення. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2016. № 1(22). С. 41-45.

105. Варваров В. В., Усачева О. А., Кравцов А. Г. Ускоренные методы оценки эффективности технологических решений для повышения износостойкости агрегатов гидравлических систем авиационной техники. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2015. № 1(42). С. 22-24.

106. Сігайло Г. П., Кравцов А. Г., Варваров В. В. Температурна стійкість гідравлічних мастильних матеріалів при їх модифікації присадками різноманітного призначення. *Системи озброєння і військова техніка*. 2014. № 4(40). С. 107-109.

107. Сігайло Г. П., Кравцов А. Г., Варваров В. В. Експрес-методика визначення ресурсних показників мастильних матеріалів у процесі експлуатації. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2014. № 4(17). С. 112-114.

108. Sause M., Hamstad M. Acoustic Emission Analysis. *Comprehensive Composite Materials II*. 2018. Vol. 7. P. 291-326.

109. Баранов А. В., Тарасевич С. В., Вагнер В. А. Ультразвуковой мониторинг работы трибосопряжений. *Ползуновский вестник*. 2012. № 1. С. 23-27.

110. Маркова Л. Ф. Перспективы развития трибодиагностики. *Трение и износ*. 2006. Т. 11. № 7. С. 175–184.

111. Filonenko S. F., Stadnychenko V. N., Stakhova A. P. Modelling of acoustic

emission signals at friction of materials' surface layers. *Aviation*. 2008. Vol.12. №3. P. 87-94.

112. Hase A. Mishina H., Wada M. Acoustic emission in elementary processes of friction and wear: in-situ observation of friction surface and AE signals. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. 2009. № 3 (4). P. 333-344.

113. Hase A. Mishina H., Wada M. Fundamental study on early detection of seizure in journal bearing by using acoustic emission technique. *Wear*. 2016. № 346. P. 132-139.

114. Mishina H., Hase A. Wear equation for adhesive wear established through elementary process of wear. *Wear*. № 308 (1-2). P. 186-192.

115. Hase A. Mishina H., Wada M. Correlation between features of acoustic emission signals and mechanical wear mechanisms. *Wear*. № 292. P. 144-150.

116. Березняков А. И., Стадниченко В. Н. О взаимосвязи характеристик акустического излучения поверхности трибосопряжения с трибологическими параметрами. *Трение и износ*. 1998. Т. 19, № 3. С. 312–317.

117. Wang Zh., Wu X., Liu X., Cao Y., Xie J. Research on feature extraction algorithm of rolling bearing fatigue evolution stage based on acoustic emission. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 113. P. 271-284.

118. Filonenko S. F., Stadnichenko V. N., Troshin O. N. Research of influence of thermal resistance of elements of tribosystem on wearproofness of friction units. *Proceeding of the forth world congress "Aviation in the XXI-st century" : Safety in aviation and space technology*. Kyiv : NAU. 2010. Vol. 1. P. 12.1–12.4.

119. Запорожец В. В., Стадниченко В. Н. Методология ускоренной оценки износостойкости образцов с электроискровыми покрытиями. *Проблеми трибології*. 2010. № 4. С. 25–32.

120. Запорожец В. В. Стадниченко В. Н., Трошин О. Н. Особенности аппаратной регистрации и обработки акусто-эмиссионного излучения при идентификации процессов трения и изнашивания. *Проблеми трибології*. 2014. № 1. С. 19–26.

121. Стадніченко В. М., Стадніченко М. Г., Прогнозування ресурсу трибосистем з використанням інформативних параметрів акустичної емісії. *Новітні технології для захисту повітряного простору : тези доповідей Шостої наукової конференції ХУПС*. 2010. С. 55.

122. Стадниченко Н. Г. Трошин О. Н., Стадніченко В. Н., Варваров В. В. Методические аспекты применения метода акустической эмиссии в трибодиагностике. *Новітні технології – для захисту повітряного простору» : тези доповідей Дев'ятої наукової конференції ХУПС, м. Харків, 17-18 квітня 2013 р. Харків, 2013. С. 76–77.*

123. Трошин О. Н., Кисиль Е. А., Мусиенко Ю. А. Акустико-эмиссионный комплекс для безразборной диагностики машин и механизмов. *Інформаційні технології в навігації і управлінні : стан та перспективи розвитку : Матеріали першої МНТК*, м. Київ, 5-6 липня 2010 р. Київ : ДП «ЦНДІ НіУ», 2010. С. 38.

124. Трошин О. Н., Стадніченко В. М., Ивченко В. М. Ускоренные методы оценки эксплуатационных свойств износостойких покрытий. *Новітні технології – для захисту повітряного простору» : тези доповідей Сьомої наукова конференція ХУПС*, м. Харків, 13-14 квітня 2011 р. Харків, 2011. С. 52–53.

125. Фененко О. О., Трошин О. М. Прогнозування ресурсу складної технічної системи з використанням інформаційно-діагностичної системи. *Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences : International research and practice conference : Conference proceedings*, m. Radom, December, 27-28, 2017. Radom : Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2017. P. 174–175.

126. Приймак А. В., Трошин О. Н., Сігайло Г. П. Роль та місце інформаційних технологій в створенні сучасних зразків авіаційної техніки. *Новітні технології – для захисту повітряного простору» : тези доповідей Одинадцята наукова конференція ХУПС*, м. Харків, 08-09 квітня 2015 р. Харків, 2015. С. 76–77.

127. Запорожець В. В., Стадніченко В. М., Трошин О. М., Варваров В. В. Прискорена методика визначення зносостійкості нанопокриттів в трибосистемах з використанням інформативних параметрів акустичної емісії. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2010. № 3(25). С. 19–24.

128. Трошин О. Н. Стадніченко Н. Г., Джус Р. Н. Информативное содержание метода акустической эмиссии для безразборной диагностики узлов авиационной техники. *Наука і техніка Повітряних Сил*. 2013. № 2 (11). С. 80–83.

129. Ishikawa K. Quality Control in Japan : In book *The Japanese Approach to Product Quality* / eds. N. Sasaki and D. Hutchins. Copyright Elsevier B.V., 1984. 134 p.

130. Федюкин, В. К. Управление качеством процессов. С.-Петербург. : Питер, 2005. 202 с.

131. Tarasov V. E., Tarasova V. V. Time-dependent fractional dynamics with memory in quantum and economic physics. *Annals of Physics*, 2017. Vol. 383. P. 579-599.

132. А. С. 1803811 СССР. Машина для испытаний материалов на трение и износ / В. А. Войтов, В. А. Баздеркин, О. И. Носовский, Л. Г. Козырь, В. Н. Стадніченко, А. И. Смахтин (СССР). Оpubл. 1993, № 11.

133. ДСТУ 30480-97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы исследования на износостойкость. Общие требования. Вид. офіц. Київ. : Держспоживстандарт України, 1999. 23 с.

134. Yurkova A., Belots'ky A., Byakova A. Anomalous Nitrogen Solubility in Gradient Nanostructured Layer Formed in the Surface of Bulk Iron by Severe Plastic Deformation under the Friction : Nanostructured Materials by High-Pressure Severe Plastic Deformation / In Book *NATO Science Series. II. Mathematics, Physics and Chemistry*. Netherlands : Springer. 2005. Vol. 212. P. 107-112.

135. Алиев А. А., Булгаков В. П., Приходько Б. С. Качество поверхности и свойства деталей машин. *Вестник астраханского государственного технического университета*. 2004. № 1. С. 8–11.

136. Безъязычный В. Ф. Влияние качества поверхности после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин. *Инженерный журнал*. 2001. № 4. С. 9–16.

137. Jianbin L. Physics and Chemistry of Micro-Nanotribology. *ASTM International*, 2008. 290 p.

138. Рего К. Р. Метрологическая обработка результатов технических измерений : справочное пособие. Киев : Техника, 1987. 128 с.

139. Трошин О. Н., Стадниченко В. Н., Стадниченко Н. Г. Система встроенного контроля агрегатов авиационной техники. *Наука і техніка Повітряних Сил України*. 2014. № 1 (14). С. 68–73.

140. Долгушин С. Vinculum II – новый хостконтроллер USB от FTDI. *Компоненты и технологии*. 2010. № 9. С. 24–27.

141. Запорожец В. В. Стадниченко В. Н. Динамика задиростойкости и переходные процессы образцов с электроискровыми покрытиями. *Проблеми трибології*. 2010. № 4. С. 47–52.

142. Стадниченко В. Н. Диагностика процессов изнашивания фрикционных узлов трансмиссий авиационных ГТД методом акустической эмиссии. *Вопросы проектирования и производства конструкций летальных аппаратов*. Вып. 1(61). 2010. С. 108–117.

143. Стадниченко Н. Г. Трошин О. Н., Стадниченко В. Н., Варваров В. В. Границы применения параметра PV при выборе режимов испытаний на трение и износ, моделирующих работу реальных трибосистем при модернизации военной техники. *Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки : Тези доповіді наук.-техніч. конф. ЦНДІ ОВТ, м. Київ, 16-17 грудня 2010 р. Київ, 2010. С. 38.*

144. Ахназарова С. Л. Кафаров В. В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. Москва : Высш. шк., 1985. – 326 с.

145. Гайданин А. Н., Ефремова С. А. Применение полного факторного эксперимента при проведении исследований : методич. указания. Волгоград : ВолгГТУ. 2008. 16 с.

146. Запорожец В. В., Стадніченко В. М., Трошін О. М. Механізм дисипації

енергії при терті металокерамічного шару в технологіях тріботехнічного відновлення деталей машин і механізмів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2010. № 2 (22). С. 113–118.

147. Ханин М. В. Механическое изнашивание материалов. Москва : Изд. стандартов, 1984. 152 с.

148. Трошин О. Н. Термодинамические условия достижения аномально низкого трения и изнашивания в трибологии. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2017. № 2 (51). С. 161–165.

149. Якубов Ф. Я. Синергетика и процессы самоорганизации при трении и изнашивании. *Сучасні технології в машинобудуванні*. 2010. № 5. С. 122-133.

150. Войтов В. А. Стадніченко В. М., Варваров В. В., Вахнюк С. А. Структурно-енергетична модель перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2019. №16. С. 88-101.

151. Варваров В.В. Про фізичний сенс коефіцієнта тертя в умовах аномально низького тертя та зношування. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2020, № 189. С. 6-12.

152. Viktor Voitov, Viacheslav Stadnychenko, Valeriy Varvarov, Nikolay Stadnychenko. Mechanisms of self-organization in tribosystems operating under conditions of abnormally low friction and wear. *Advances in Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 12(10). P. 1-18.

153. Тигетов Д. Г. Горицкий Ю. А. Марковская модель механического взаимодействия шероховатых поверхностей в процессе трения. *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2010. №3. С. 3-12.

154. Красовский А. А. Фазовое пространство и статистическая теория динамических систем. Москва : Наука, 1974. 232 с.

155. Арнольд В. И. Авец А. Эргодические проблемы классической механики. Ижевск : Ижевская республиканская типография, 1999. 284 с.

156. Каток А. Б. Хассельблат Б. Введение в современную теорию динамических систем : пер. с англ. А. Кононенко. Москва : Факториал, 1999. 768 с.

157. Frank T. D. Generalized Fokker–Planck equations derived from generalized linear nonequilibrium thermodynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2002. Vol. 310. Iss. 3–4. P. 397-412.

158. Корчагин В. Г., Кравцов Л. Я., Садовом Ю. Б., Хохлов Л. М. Измерение вероятностных характеристик случайных процессов стохастических вычислительных устройств. Ленинград : Энергоатомиздат : Ленингр. отд-ние, 1982. 128 с.

159. Stadnychenko V. Varvarov V. Results of Theoretical and Experimental

Researches of Anomalous Low Friction and Wear in Tribosystems. *Advances in Materials*. 2019. Vol. 8. №4, P. 156-165.

160. Стадниченко В. М. Методологія керування процесами контактної взаємодії на основі акустико-емісійних ефектів у триботехнічних системах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.04. Київ, 2014. 40 с.

161. Гиндин И. А. Неклюдов И. М. Физика программного упрочнения. Київ : Наук. думка, 1979. 184 с.

162. Трошін О. М. Гіпотеза в поясненні аномально низького тертя та зношування в трибології. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*. 2015. Вип. 12. С. 178–190.

163. Zaporozhets V., Stadnichenko V. Automated Systems for Tribodiagnosics of Contact Interactions. *Journal of Friction and Wear*. 2015. Vol. 36. № 3. P. 241–248.

164. Федоров С. В. Основное уравнение трения и износа. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2011. Т. 13. № 4 (3). С. 888-891.

165. Богданов К. М. Яновский К. А., Козлов Ю. Г. Оптико-структурный машинный анализ изображений / под ред. К. А. Яновского. Москва : Машиностроение, 1984. 280 с.

166. Стадниченко В. Н., Джус Р. Н., Волков Ю. П. Анализ напряженного состояния поверхностных слоев трущихся материалов, модифицированных ревитализантами. *Збірник наукових праць ХУПС*. 2005. Вип. 2 (2). С. 107–113.

167. Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А. Синергетика и фракталы в материаловедении. Москва : Наука, 1994. 383 с.

168. Topographical orientation effects on surface stresses influencing on wear in sliding DLC contacts / part 2 : Modelling and simulations / A. Laukkanen and oth. *Wear*. 2017. Vol. 388-389. Pp. 18-28.

169. Bruce R. Tribological analysis of fracture conditions in thin surface coatings by 3D FEM modelling and stress simulations. *Tribology International*. November 2005–December 2006. Vol. 38, Iss. 11–12. P. 1035-1049.

170. Bruce, R. Handbook of Lubrication and Tribology / vol. II: Theory and Design, 2nd Edition New York, USA : CRC Press, 2012. 514 p.

171. Holmberg K., Andersson P., Erdemir A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribology International*. Vol. 47, P. 221-234.



## **ДОДАТКИ**

## ДОДАТОК А

### Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Статті у наукових фахових виданнях:

10. Запорожець В.В., Стадниченко В.М., Трошін О.М., Варваров В.В., Стадніченко М.Г. Прискорена методика визначення зносостійкості нанопокриттів в трибосистемах з використанням інформативних параметрів акустичної емісії. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І.Кожедуба*. 2010. № 3(25). С. 19-24.
11. Сігайло Г.П., Кравцов А.Г., Варваров В.В. Експрес-методика визначення ресурсних показників мастильних матеріалів у процесі експлуатації. *Наука і техніка ПС ЗС України*. 2014. № 4(17). С. 112-114.
12. Варваров В.В., Усачева О.А., Кравцов А.Г. Ускоренные методы оценки эффективности технологических решений для повышения износостойкости агрегатов гидравлических систем авиационной техники. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І.Кожедуба*. 2015. № 1(42). С. 22-24.
13. Войтов В.А., Стадниченко В.М., Варваров В.В. Теоретичні та природні передумови досягнення аномально низького тертя та зношування в трибології. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І.Кожедуба*. 2019. № 2(60). С. 113-125.
14. Стадніченко В.М., Варваров В.В., Вахнюк С.А. Структурно-енергетична модель перетворення енергії в умовах аномально низького тертя та зношування. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2019. №16. С. 88-101.
15. Варваров В.В. Механізми самоорганізації в трибосистемах, які працюють в умовах аномально низького тертя та зношування. *Системи озброєння і військова техніка*. 2019. № 2(58). С. 70-79.

16. Варваров В.В. Про фізичний сенс коефіцієнта тертя в умовах аномально низького тертя та зношування. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2020, №189. С. 6-12.

Статті у закордонних виданнях:

17. Stadnychenko V., Varvarov V. Results of Theoretical and Experimental Researches of Anomalous Low Friction and Wear in Tribosystems. *Advances in Materials*. 2019. Vol. 8. №4. P. 156-165.

18. Viktor Voitov, Viacheslav Stadnychenko, Valeriy Varvarov, Nikolay Stadnychenko. Mechanisms of self-organization in tribosystems operating under conditions of abnormally low friction and wear. *Advances in Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 12 (10). P. 1-18. (в базі SCOPUS).

Матеріали і тези конференцій:

10. Стадніченко В. М., Стадніченко М. Г., Прогнозування ресурсу трибосистем з використанням інформативних параметрів акустичної емісії. *Новітні технології для захисту повітряного простору : тези доповідей Шостої наукової конференції ХУПС*. 2010. С. 55.

11. Стадніченко Н. Г. Трошин О. Н., Стадніченко В. Н., Варваров В. В. Границы применения параметра PV при выборе режимов испытаний на трение и износ, моделирующих работу реальных трибосистем при модернизации военной техники. *Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки : Тези доповіді наук.-техніч. конф. ЦНДІ ОВТ, м. Київ, 16-17 грудня 2010 р. Київ, 2010. С. 38.*

12. Стадніченко Н. Г. Трошин О. Н., Стадніченко В. Н., Варваров В. В. Методические аспекты применения метода акустической эмиссии в трибодиагностике. *Новітні технології – для захисту повітряного простору» : тези доповідей Дев'ятої наукова конференція ХУПС, м. Харків, 17-18 квітня 2013 р. Харків, 2013. С. 76–77.*

13. Стадниченко В. Н., Варваров В. В. Методология применения метода акустической эмиссии для прогнозирования ресурса агрегатов авиационной техники. *Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки : наук. практич. конф.* Київ : ДНДІА, 2013. С. 27.

14. Варваров В.В. Методологія прогнозування ресурсу трибосистем по результатам прискорених лабораторних і стендових випробувань. *Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки : наук. практич. конф.* Київ: ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2013. С. 358–359.

15. Варваров В. В., Фененко О. О. Прогнозування ресурсу конструкційних матеріалів силових елементів планера. *Створення та модернізація озброєння та військової техніки в сучасних умовах : XV науково-технічна конференція.* Чернігів: ДНВЦ ЗСУ. 2015. С. 180-181.

16. Войтов В. А., Варваров В. В., Стадніченко М. Г. Методика прискореної оцінки ресурсних показників агрегатів паливної автоматики на стадії їх розробки. *Перспективи розвитку озброєння і військової техніки : Міжнародна наукова конференція.* Львів: НАСВ, 2017. С. 24-25.

17. Стадниченко В. М., Варваров В. В. Перспектива створення в агрегатобудуванні матеріалів, що працюють в умовах аномально низького тертя та зношування. *Промислова гідравліка і пневматика : XX міжнар. науково-технічна конференція.* Київ : НАУ, 2019. С. 20-21.

18. Варваров В.В. Аналіз механізмів дисипації зовнішньої енергії при аномально низькому терті та зношуванні. *Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі : XV Міжнар. форум молоді.* Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2019. С. 11.

## ДОДАТОК Б

**Розробка на АТ «ФЕД» приводів-генераторів ГП21КМ з підвищеним ресурсом (технологія ПИ 02-17) для поставки на ДП «Антонов»**



Рис. Б.1. Проведення стендових випробувань агрегату ГП21КМ зі збільшеним ресурсом (при створенні технології ПИ 02-17)

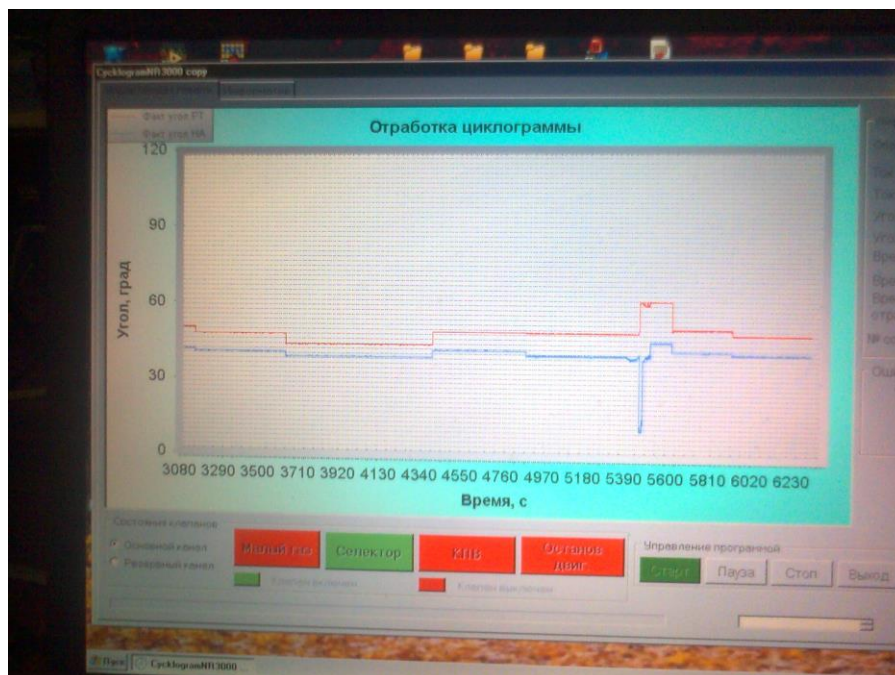
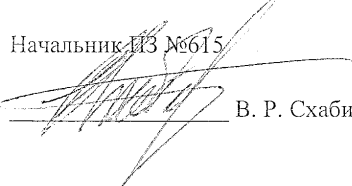



Рис. Б.2. Циклограмма випробувань агрегату ГП21КМ зі збільшеним ресурсом (при створенні технології ПИ 02-17)

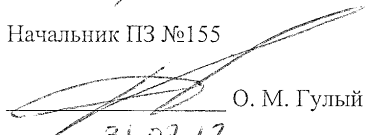
ПАТ, УТЦ Кравченко Ю.О.

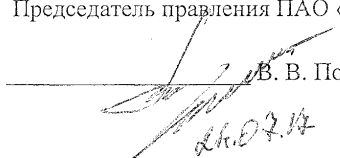
СОГЛАСОВАНО

УТВЕРЖДАЮ

Начальник ПЗ №615  
  
В. Р. Схабицкий

Вице-Президент ГП «АНТОНОВ»  
  
А. В. Лось  
25.07.2017

Начальник ПЗ №155  
  
О. М. Гулый  
31.07.17

Председатель правления ПАО «ФЭД»  
  
В. В. Попов  
26.07.17

**РЕШЕНИЕ № ГП21КМ/П.002/36-17 от 22.09.2017г.**

**о разработке и поставкам приводов-генераторов ГП21КМ для самолетов семейства Ан-148/158/178**

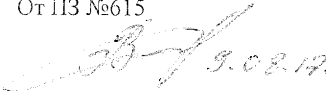
В целях обеспечения разработки, изготовления опытных образцов и испытаний приводов-генераторов ГП21КМ с увеличенным ресурсом (в сравнении с ГП21К и ГП21) для эффективной реализации программы создания и производства самолетов Ан-178, Ан-148, Ан-158

**РЕШИЛИ:**


- 1 Разработку привода-генератора ГП21КМ выполняет ПАО «ФЭД». Привод-генератор ГП21КМ является модификацией привода-генератора ГП21К с конструктивными мероприятиями по повышению ресурсов.
- 2 ПАО «ФЭД» обеспечивает изготовление трех штук ГП21КМ (8274.000-01)
  - 2.1 Два ГП21КМ – для проведения стендовых испытаний на базе ПАО «ФЭД» на ресурс без ремонта не менее 12000 часов, *по программе предварительных испытаний*
  - 2.2 Один ГП21КМ – для проведения сертификационных испытаний на ГП «АНТОНОВ». Поставку ГП21КМ на ГП «АНТОНОВ» осуществляет ПАО «ФЭД» за свой счет по договору с ГП «АНТОНОВ».

Срок: декабрь 2017 года.

Срок проведения летных испытаний: по графику испытаний ГП «АНТОНОВ».

От ПЗ №615  
  
9.08.17

От ГП «АНТОНОВ»  


От ПЗ №155  


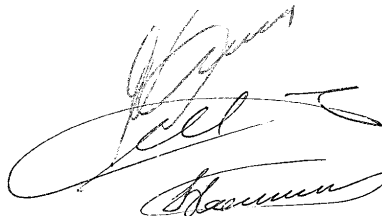
От ПАО «ФЭД»  


Рис. Б.3. Рішення на проведення розробки на АТ «ФЕД» та поставки на ДП «Антонов» приводів-генераторів ГП21КМ з підвищеним ресурсом (технологія ПИ 02-17)


## ДОДАТОК В

## Акт впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Голова правління АТ «ФЕД»  
канд. техн. наук, член-кореспондент  
Академії технологічних наук України

В.В. ПОПОВ

2019 р.



АКТ  
про впровадження результатів наукових досліджень  
ВАРВАРОВА Валерія Володимировича

Комісія у складі:  
голови: заступника голови правління АТ «ФЕД» О.В. Кононихіна  
(посада, прізвище, ініціали)  
членів: провідного спеціаліста АТ «ФЕД» В.І. Богославцева,  
(посада, прізвище, ініціали)  
начальника КС УГТ АТ «ФЕД» С.О. Малюшкін,  
(посада, прізвище, ініціали)  
технічного керівника О.М. Мунгієва,  
(посада, прізвище, ініціали)

розглянула наукові положення, розроблені Варваровим Валерійом Володимировичем.

У АТ «ФЕД» відповідно до договору про науково-технічне співробітництво з Харківським національним університетом Повітряних Сил імені І. Кожедуба у період з 2012 по 2017 роки виконувалися роботи щодо збільшення ресурсу агрегатів паливної автоматики газотурбінних двигунів і агрегатів гідросистем літальних апаратів, які розробляються та виробляються в Україні, за рахунок розробки технології фінішної обробки деталей пар тертя з метою переводу їх роботи в умови аномально низького тертя та зношування.

Комісія встановила:

І. Такі наукові положення, як:

- теоретичні основи аномально низького тертя та зношування, що є передумовою щодо наноструктурування поверхневого шару для досягнення балансу між молекулярно-механічною і хвильовою складових сил тертя.
- науково обґрунтовані рекомендації щодо направленої зміни реології поверхневого шару. Практично вдалося реалізувати «ідеальні» умови дисипації зовнішньої енергії, що підводиться по хвильовому каналу і уникнути процесу зношування в трибосистемі та кардинально зменшити зовнішнє тертя. Дану технологію можна віднести до розряду ресурсозберігаючих з високим ступенем енергоефективності.

Рис. В.1. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи (1 стор.)

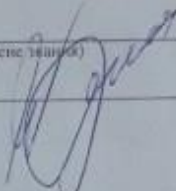


2. Наукові положення реалізовані при збільшенні ресурсу приводів-генераторів ГП21КМ для літаків сімейства Ан-148/158/178, проведені стендові випробування, повністю підтверджують наукові положення досягнення аномального низького тертя та зношування розроблених автором. Так використання технології дозволило зменшити тепловиділення агрегата на 15%.

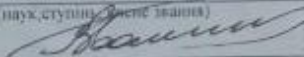
Подальші ресурсні випробування показали практично повне відсутність зношування трибоелементів, які оброблені за технологією, що дозволяє експлуатувати агрегат за технічним станом при збільшенні міжремонтного ресурсу у 4 рази.

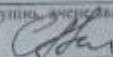
3. Наукові положення, розроблені особисто Варваровим Валерійом Володимировичем, впроваджені.

Голова комісії:

(наук. ступінь, вчене звання)  
 (підпис)  **О.В. КОНОНИХІН**  
 (прізвище, ініціали)

Члени комісії:

(наук. ступінь, вчене звання)  
 (підпис)  **В.І. БОГОСЛАВЦЕВ**  
 (прізвище, ініціали)

(наук. ступінь, вчене звання)  
 (підпис)  **С.О. МАЛЮШКІН**  
 (прізвище, ініціали)

(наук. ступінь, вчене звання)  
 (підпис)  **О.М. МУНГІЄВ**

Рис. В.2. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи (2 стор.)