



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ



МАШИННО - ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ

Катедра „Теория на механизмите и машините”

Маг. инж. Тинка Любенова Грозданова

**КОНТАКТНИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ТРИБОСИСТЕМИ ПРИ
ЕКСТРЕМАЛНИ УСЛОВИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

**НА ДИСЕРТАЦИЯ ЗА ПРИСЪЖДАНЕ НА ОБРАЗОВАТЕЛНА И НАУЧНА
СТЕПЕН “ДОКТОР”**

в област на висше образование

5. Технически науки

професионално направление

5.1. Машинно инженерство

научна специалност

**„Динамика, якост и надеждност на машините, уредите, апаратите и
системите”**

Научен ръководител

доц. д-р инж. Мара Крумова Кандева-Иванова

СОФИЯ, 2016

Дисертационният труд съдържа 184 страници, 160 фигури, 38 таблици, 12 снимки, разпределени в 6 глави, списък на използваната литература от 136 заглавия (71 на кирилица и 65 на латиница) и списък на научните публикации.

Дисертационният труд е обсъден и е насочен за защита към ТУ – София от катедра „Теория на механизмите и машините“ при ТУ – София на заседание на разширен катедрен съвет на 25.05.2016 г.

Докторантката работи като гл. асистент в секция „Космическо материалознание“ при Институт за космически изследвания и технологии към БАН.

Изследванията в дисертационния труд са извършени в отдел „Аеро-космически материали и технологии“ на австрийския изследователски център в гр. Зайберсдорф, Австрия и в лаборатория по Трибология при МТФ на ТУ – София.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 29.09.2016 г. от 15.00 ч. в Конферентната зала на БИЦ – ТУ, София на заседание на научно жури в състав:

Проф. д-р инж. Иван Кралов – Председател

Проф. д.т.н. инж. Венелин Живков, Чл. Кор. на БАН – Член, Рецензент

Проф. д-р инж. Вяра Пожидаева – Член, Рецензент

Доц. д-р Емилия Асенова – Член

Доц. д-р. инж. Мара Кандева – Член, Научен ръководител

Материалите по защитата са на разположение в канцеларията на МТФ на ТУ, София, каб. 3230.

Автор: маг. инж. Тинка Любенова Грозданова

Заглавие: „Контактни взаимодействия в трибосистеми при екстремални условия“

Тираж: 30 броя

Печатна база при ТУ, София.

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Понятието „контактни взаимодействия“ обединява в единство всички структури, явления и процеси в зоната на допиране при релативно движение на тела, независимо от тяхното естество – физични, механични, химични, електрически, термодинамични, акустични, технологични. Тези взаимодействия протичат в област със специфични структури, характеристики и състояния, наречена „контакт“. Базовите феномени и процеси в трибосистемите са триене, износване и мазане, които определят експлоатационните характеристики и ресурса на детайлите, механизмите и машините.

Триенето в значителна степен е свързано с енергетичните загуби, поглъщайки 30-40% от произведената в света енергия. Износването, като съпътстващ процес на триенето, води до загуба на материални и човешки ресурси. То е причина за излизане от експлоатация на повече от 80% от детайлите и машините като цяло.

Специфична особеност на контактните взаимодействия е тяхната силна зависимост от условията на експлоатация на трибосистемите.

Цел и задачи на дисертационния труд

Въз основа на резултатите от литературното проучване, анализа на научните изследвания и изводите в областта на контактните взаимодействия в трибосистеми в екстремални условия се формулира целта на дисертационния труд: **Изследване на контактни процеси и ефекти в трибосистеми, работещи в различни екстремални режими – вакуум, високи скорости и натоварване, сухо и гранично триене, вибрации и абразивна среда.**

За постигане на целта са поставени за изпълнение следните основни задачи:

1. Избор на методики и материали за изследване на трибосистеми в екстремални условия на експлоатация.
2. Сравнително изследване на коефициента на триене и линейното износване в трибосистеми със самосмазващи се композитни антифрикционни материали (СКАМ) във вакуум и във въздух при различна кинематична позиция на елементите на трибосистемата.
3. Изследване характеристиките на статичното триене в трибосистеми със СКАМ при различно натоварване в условия на сухо триене в атмосферна среда.
4. Изследване характеристиките на износването и коефициента на триене в трибосистеми със СКАМ при високи натоварвания в условия на сухо триене в атмосферна среда.
5. Изследване характеристиките на износването в трибосистеми със СКАМ при високи натоварвания и скорости на плъзгане при гранично триене с грес „Литол 24“.
6. Изследване влиянието на металополакираща композиция АМК върху износването в трибосистеми със СКАМ при високи натоварвания в условия на гранично триене с грес „Литол 24“.
7. Изследване влиянието на големината на нормалната вибрационна скорост върху износването на износоустойчиви композитни покрития и материали при сухо триене по абразивна повърхнина.

Научна новост

Получен е нов теоретичен модел в трибологията за редуцираната интензивност на износване в трибосистеми със СКМ ИПМ 304 и ИПМ 305 в екстремален режим на сухо триене.

Установено е, че кинематичната позиция на образца в трибосистема със СКМ ИПМ 304 и ИПМ 305 влияе върху коефициента на триене и износването във вакуумна и въздушна среда.

Доказано е, че след определен път на сухо триене във вакуумна и въздушна среда се образува трансферен контактен филм в трибосистеми със СКМ ИПМ 304 и ИПМ 305 при определени характеристики на режима на триене. Същият ефект е установен в условия на гранично триене при смазване с „Литол 24” + 5% металоплакираща композиция АМК.

Установено е, че при сухо триене по абразивна повърхност, при наличие на вибрации, нормални към линията на релативната скорост, износването в трибосистеми, съдържащи композитни материали и покрития зависи от големината на вибрационната скорост с преминаване през минимална стойност.

Практическа приложимост

Установени са оптимални режими за функциониране на трибосистеми със СКМ ИПМ 304 и ИПМ 305 в екстремални условия на сухо триене в атмосферни условия ($p_a = 1 \text{ MPa}$, $v = 0,22 \text{ m/s}$) и на гранично триене ($p_a = 4,6 \text{ MPa}$, $v = 0,82 \text{ m/s}$), при които се постига износоустойчивост от 9,8 до 14,7 пъти по-висока от износоустойчивостта на калаен бронз БрО1Ф1. Получените резултати могат да се използват за разработване на опорни конструкции – плъзгащи лагери и сепаратори на търкалящи лагери.

Разработени са два триботестера по кинематични схеми „Палец-диск“ и „Палец-цилиндър“ за изследване характеристиките на триенето и износването при високи скорости и наличие на вибрации в режими на сухо абразивно и гранично триене.

Апробация на резултатите

Основните резултати от дисертационния труд са докладвани, обсъждани и публикувани в:

14th International Conference on Tribology SERBIATRIB '15, Belgrade, Serbia, 13-15 May 2015;

Трибологичен журнал БУЛТРИБ, Доклади от 11-та международна конференция по трибология BULTRIB'15, 11-13 Септември 2015, Созопол, България;

SENS 2009, Fifth Scientific Conference with International Participation, 2-4 Nov., 2009, Sofia, Bulgaria;

Аеро-космически изследвания в България, БАН, кн. 15, София, 1999.

Публикации

Една част от научните изследвания са отразени в 5 публикации в периода 2009-2016 г.

II. КРАТКО ИЗЛОЖЕНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава 1. Литературен анализ на контактни взаимодействия в екстремални условия

В тази част от дисертационния труд са направени проучване и анализ на изследванията върху трибологичното взаимодействие в екстремални условия – вакуум, сухо и гранично триене, и вибро-абразивно износване на композитни материали и покрития, от които следват основните изводи:

1. Процесите, протичащи в трибосистеми в екстремални експлоатационни условия, имат комплексен характер, който зависи от съвместното влияние на голям брой фактори.

2. Многобройните резултати, свързани с характера на триенето и износването на различни материали в екстремални условия, са получени от отделните автори по различни методики и устройства с различни кинематични схеми, което затруднява техния сравнителен анализ и обобщаване.

3. В трибологията липсва единен подход и методика за комплексно изследване на контактните взаимодействия. За количествена оценка и интерпретация на резултатите се използват параметри и критерии, които отразяват един или друг аспект на сложността на взаимодействието – физичен, химичен, субстанционален, енергетичен и технологичен.

4. Липсват изследвания за влиянието на кинематичната позиция на елементите на трибосистемата върху нейните количествени и качествени функционални характеристики.

5. Липсват изследвания на трибосистеми с композитни антифрикционни материали, свързани със статично триене, влияние на високи скорости и големи натоварвания върху триенето, и износването в атмосферна среда при сухо триене.

6. Не са ни известни изследвания за износването на композитни покрития и материали при едновременното действие на два фактора – вибрационно натоварване и абразивна среда.

7. Не са ни известни изследвания за влиянието на металоплакиращи композиции в консистентни смазки върху контактното взаимодействие на трибосистеми със СКМ при гранично триене.

Глава 2. Експериментални методи и материали

В настоящата работа е възприет комплексен подход, който интегрира характеристиките, методите и средствата на класическата трибология с тези на съвременните представи в трибологията. Използвани са стандартизирани стендове и са разработени специализирани стендове за лабораторни изследвания в съответствие с целите на дисертацията. За изследване и количествена оценка на трибологичните процеси триене и износване в дисертацията се използват от една страна методики и параметри на класическата трибология – сила на триене, коефициент на триене, скок на коефициента на триене, масово износване, скорост, интензивност на износването, износоустойчивост и от друга страна се въвеждат относителни, и интегрални параметри на взаимодействието като: комуникативен потенциал, статичен и динамичен фактор на прехода, относителна износоустойчивост.

Изследват се три групи материали: I група – самосмазващи се композитни антифрикционни материали (СКМ) ИГМ, разработени в Института по проблеми на материалознанието към Украинската академия на науките; II група – износоустойчиви композитни прахови покрития, нанесени чрез електродъгово наваряване; III група – сферографитен чугун GJS 600-3, микролегиран с различно процентно съдържание на калай.

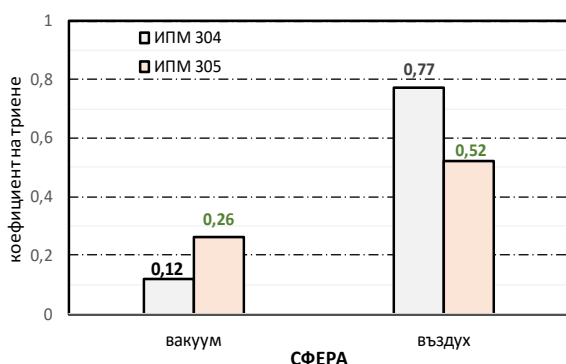
Глава 3. Контактни взаимодействия в трибосистеми във вакуум

В тази глава се представят резултати от сравнително изследване на трибологичните характеристики на две контактни системи, които съдържат самосмазващи се композитни антифрикционни материали ИПМ 304 и ИПМ 305 и противотяло от еднакъв материал – стомана AISI 52100. Изследвани са динамичният коефициент на триене и износването на материалите при нормално натоварване 2N, скорост на триене 1m/s, еднакъв път на триене 1000 m и степен на вакуума 1.10^{-3} Pa. Приложен е методът „Ball-on-disc”, при който сферата е закрепена неподвижно, а дискът се върти с равномерна ъглова скорост.

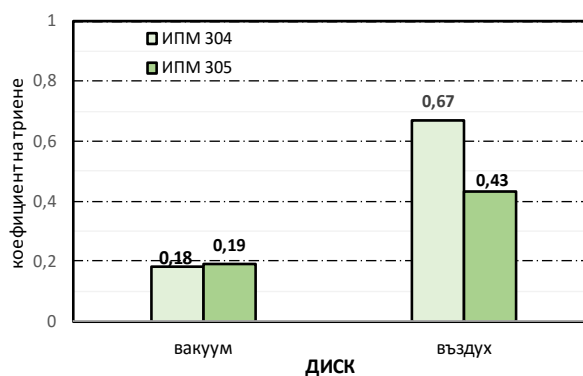
В зависимост от кинематичната позиция на образца от изследвания материал са разгледани два случая:

Случай А, при който образецът от изследвания материал е в позиция „неподвижна сфера” с диаметър $d = 6 \text{ mm}$.

Случай Б, при който образецът от изследвания материал е в позиция „въртящ се диск” с диаметър $d = 65 \text{ mm}$ и дебелина 5 mm.



Фиг. 3.13. Диаграма на коефициента на триене в трибосистеми със СКМ във вакуум и на въздух при позиция на материалите „неподвижна сфера” в режим: натоварване 2N и скорост на плъзгане 1 m/s



Фиг. 3.14. Диаграма на коефициента на триене в трибосистеми със СКМ във вакуум и на въздух при позиция на материалите „въртящ се диск” в режим: натоварване 2N и скорост на плъзгане 1 m/s

Изводи

За трибосистеми със СКМ ИМП 304:

I. При сухо триене във вакуум:

- констатира се малка разлика в средните стойности на динамичния коефициент на триене в случай А и случай Б;
- линейното износване нараства с пътя на триене и в случай А то е 2,5 пъти по-малко от това в случай Б.

II. При сухо триене на въздух:

- зависимостта на динамичния коефициент на триене от пътя на триене има слабо изразен нелинеен характер и в двата случая. Средната стойност в случай Б е с 0,1 по-малка от тази в случай А;
- регистрира се ефект на триене без износване, който се дължи на образуването на контактен трансферен филм върху повърхнината на неподвижната сфера. В случай Б се наблюдава значително линейно износване.

За трибосистеми със СКМ ИМП 305:

I. При сухо триене във вакуумна среда:

- в случай А коефициентът на триене е със средна стойност 0,26, докато в случай Б е по-малка – 0,19.

II. При сухо триене във въздушна среда:

– в случай А зависимостта на коефициента на триене има линеен характер със средна стойност 0,52. В случай Б зависимостта на коефициента на триене има нелинеен характер със средна стойност 0,43.

От анализа на резултатите за износването на ИМП 305 накратко може да се обобщи следното:

– в случай А в двете работни среди настъпва ефект на триене без износване с образуване на контактен филм с дебелина 260 μm във вакуум и 1,3 μm във въздух. Дебелината на контактният филм във въздух е почти 6 пъти по-голяма;

– в случай Б контактният филм се образува във вакуум, който при кратък път на триене има голяма дебелина – 520 μm , а с увеличаване на пътя на триене дебелината му намалява и достига до 450 μm . Във въздушна среда протича процес на износване, което остава постоянно около 2/3 от пътя на триене, след което намалява и достига 2,5 пъти по-малка стойност.

Глава 4. Контактни взаимодействия в трибосистеми при сухо триене в атмосферна среда

В настоящата глава се изследва влиянието на натоварването върху характеристиките на триенето и износването при сухо триене на трибосистеми, съдържащи СКАМ ИПМ 304, ИПМ 305 и калаен бронз БрО1Ф1.

4.1. Статично триене

4.1.1. Теория

При действие на тангенциална сила $\vec{F}$, триенето в контактни системи протича през два последователни етапа: статично триене и триене при движение (динамично триене). Статичното триене е състояние, което се осъществява в условия на контактно микропреместване при преход на системата от покой в движение. На фиг. 4.3 е представена универсална крива на изменението на силата на триене, съответно на коефициента на триене, от пътя на триене.



Фиг. 4.3. Универсална крива на изменение на силата на триене от тангенциалното преместване

При действие на тангенциална сила $\vec{F}$ триенето в контактните системи протича през два последователни етапа: статично триене и кинетично триене при движение. Статичното триене е състояние, което се осъществява в условия на контактно микропреместване при преход на системата от покой в движение (фиг.4.3). Разликата между големината на статичната и динамичната сили на триене е известна в трибологията като скок на силата на триене в прехода от покой в движение (фиг. 4.3), т.е.

$$\Delta T = T_0 - T \quad (4.1)$$

Статичната сила на триене T_o и съответно статичният коефициент на триене μ_o са параметри на триенето при преход от покой в движение и се определят от закона на Леонардо-Амонтон:

$$T_o = \mu_o P \quad (4.2)$$

т.е.

$$\mu_o = \frac{T_o}{P} \quad (4.3)$$

където P е нормалното натоварване.

Силата на триене при движение T , наричана още динамична (кинетична) сила на триене, се определя аналогично от закона на Леонардо-Амонтон, записан за случай на движение:

$$T = \mu P \quad (4.4)$$

и за динамичния коефициент на триене μ съответно:

$$\mu = \frac{T}{P} \quad (4.5)$$

За скока на коефициента на триене се получава:

$$\Delta\mu = \mu_o - \mu \quad (4.6)$$

Работата на статичната сила на триене $A_L(\vec{T}_o)$ за предварително преместване L_o се представя с изрази:

$$A_{L_o}(\vec{T}_o) = T_o L_o = \mu_o P L_o \quad (4.7)$$

а за работата на кинетичната сила на триене при път на триене L , съответно:

$$A_L(\vec{T}) = T L = \mu P L \quad (4.8)$$

Отношението между разликата на извършената работа на двете сили и работата на статичната сила на триене, изразено в проценти

$$\psi_s = \frac{A_{L_o}(\vec{T}_o) - A_L(\vec{T})}{A_{L_o}(\vec{T}_o)} \cdot 100 = \frac{\mu_o P L_o - \mu P L}{\mu_o P L_o} \cdot 100 = \frac{\Delta\mu}{\mu_o} \cdot 100$$

или

$$\psi_s = \frac{\Delta\mu}{\mu_o} \cdot 100, \% \quad (4.9)$$

наричаме *статичен фактор на прехода от покой в движение*.

Аналогично за отношението между големините на скока на коефициента на триене и динамичния коефициент на триене се получава *динамичен фактор на прехода от покой в движение* ψ_p , представен с изрази:

$$\psi_p = \frac{A_{L_o}(\vec{T}_o) - A_L(\vec{T})}{A_L(\vec{T})} \cdot 100 = \frac{\mu_o P L_o - \mu P L}{\mu P L} \cdot 100 = \frac{\Delta\mu}{\mu} \cdot 100$$

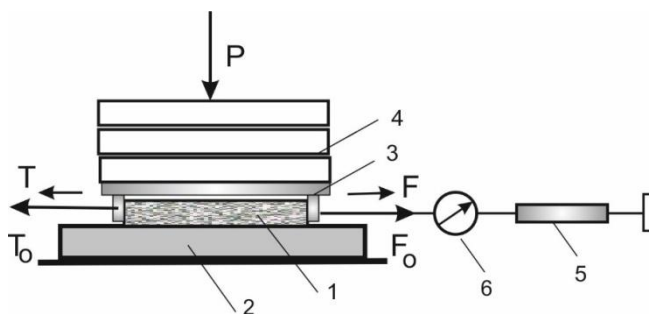
т.е.

$$\psi_p = \frac{\Delta\mu}{\mu} 100, \% \quad (4.10)$$

4.1.2. Устройство и методика

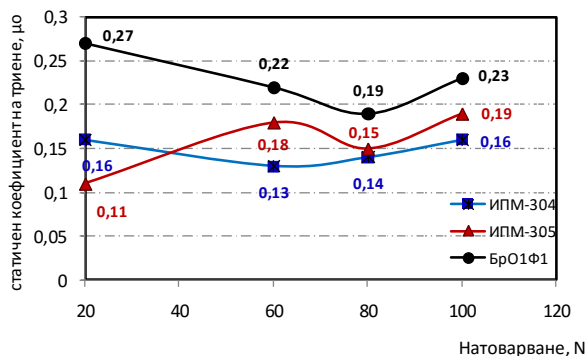
Провежда се сравнително изследване на характеристиките на статичното триене – статичен коефициент на триене, скок на коефициента на триене, статичен и динамичен фактор на прехода при различно натоварване на самосмазващи се композити ИПМ 304, ИПМ 305 и калаен бронз БрО1Ф1.

Характеристиките на статично триене се изследват с лабораторно устройство, чиято функционална схема е представена на фиг. 4.5.

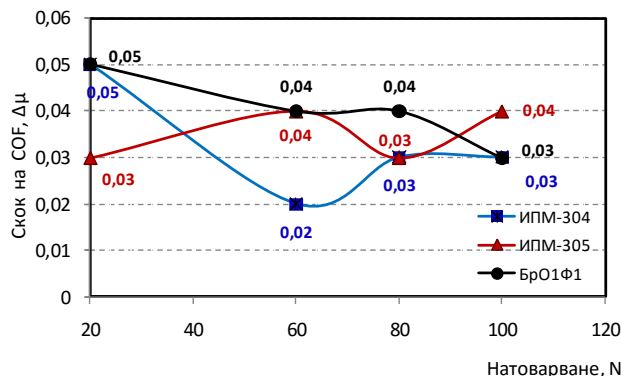


Фиг. 4.5. Функционална схема на лабораторно устройство за изследване характеристиките на статично триене: 1 – образец; 2 – противотяло; 3 – държач на образца; 4 – тежести; 5 – микрометричен винт; 6 – динамометър

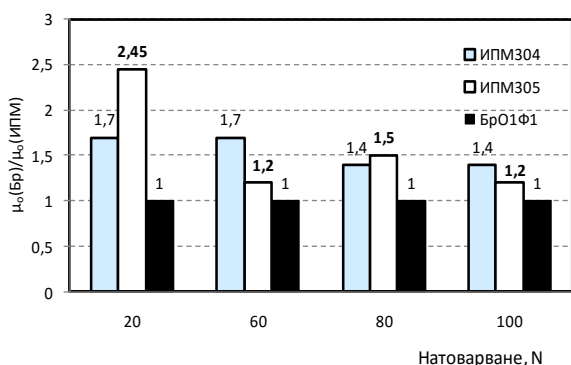
На фиг. 4.6 е представена графично зависимостта на статичния коефициент на триене от големината на нормалното натоварване за трите контактни системи, а на фиг. 4.7 – изменението на скока на коефициента на триене от натоварването.



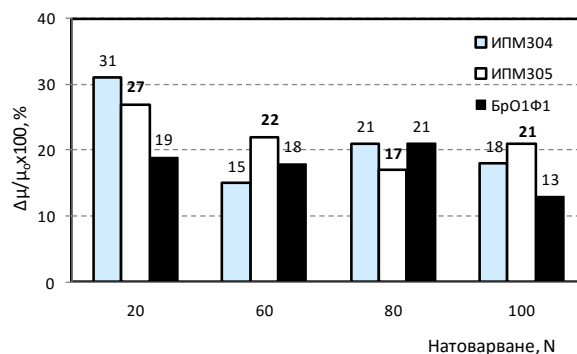
Фиг. 4.6. Зависимост на статичния коефициент на триене от натоварването за трите контактни системи



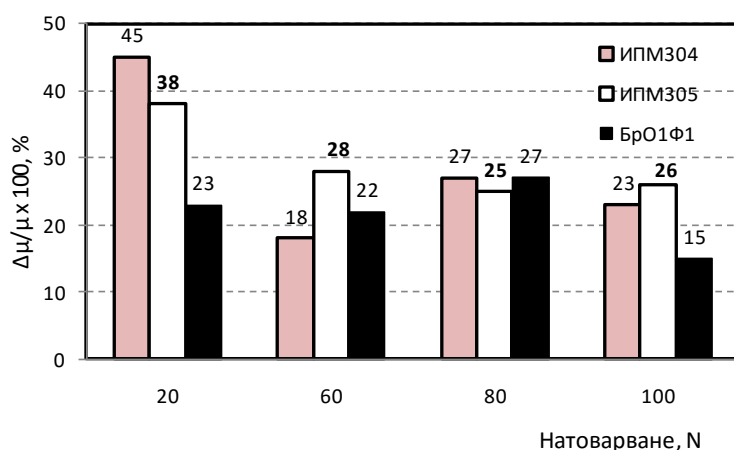
Фиг. 4.7. Зависимост на скока на коефициента на триене от натоварването за трите контактни системи



Фиг. 4.8. Сравнителна диаграма на статичния коефициент на триене за трите контактни системи при различно натоварване



Фиг. 4.9. Сравнителна диаграма на трите контактни системи по показателя ψ_s за различно нормално натоварване



Фиг. 4.10. Сравнителна диаграма на трите контактни системи по показателя ψ_p за различно нормално натоварване

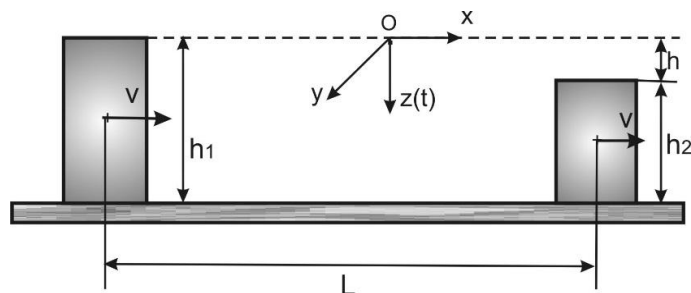
4.2. Износване

4.2.1. Закон за износването при контактното взаимодействие на телата

Износването е контактен процес, съпровождащ триенето, който води до постепенно изменение на формата, размерите, състоянието и работоспособността на трибосистемите.

В абсолютни величини износването характеризира изменението на геометричните размери на тялото – *линейно износване* h ; неговата маса – *масово износване* m или обема му – *обемно износване* V и се измерва в съответни единици.

Разглежда се цилиндрично тяло с височина h_1 , което се движи транслационно с постоянна скорост v по неподвижна хоризонтална повърхнина (противотяло) (фиг. 4.11).



Фиг. 4.11. Линейно износване на тяло при транслационно плъзгане по хоризонтална повърхнина

След изминаване на определен път на плъзгане L в резултат на триенето настъпва износване на неговата контактна повърхнина, което се изразява в намаляване на линейния размер на тялото в направление z , перпендикулярно на контактната равнина на триене, т.е. настъпва т.н. *линейно износване* на плъзгача:

$$h = h_1 - h_2 \quad (4.12)$$

Скоростта dh/dt , с която се променя височината h на плъзгача, е пропорционална на скоростта на плъзгане v и на контактното налягане p_a , т.е.

$$\frac{dh}{dt} = C p_a v \quad (4.13)$$

Параметърът C отчита характеристиките на контактуващите повърхнини, условията и процесите на контактното взаимодействие между тялото и противотялото.

От уравнение (4.13) може да се запише:

$$dh = Cp_a v dt,$$

но $v \cdot dt = dx$ – елементарен път на триене.

Тогава за елементарното линейно износване dh се получава:

$$dh = Cp_a dx \quad (4.14)$$

Износването на елементарен обем dV от тялото се представя с изрази:

$$dV = A_a dh \quad (4.15)$$

където A_a е номиналната контактна площ на взаимодействие.

След заместване на формула (4.14) в изрази (4.15) се получава:

$$dV = A_a Cp_a dx \quad (4.16)$$

Номиналното контактнo налягане е $p_a = P / A_a$, откъдето за нормалното натоварване P следва:

$$P = p_a A_a \quad (4.17)$$

При заместване на (4.17) в (4.16) за износването на елементарен обем dV следва:

$$dV = CP dx \quad (4.18)$$

Масовото износване на елементарен обем dm от тялото е свързано с обемното износване dV чрез плътността по формулата:

$$dm = \rho dV \quad (4.19)$$

След заместване на (4.18) в (4.19) и интегриране за масовото износване се получава:

$$\begin{aligned} dm &= \rho CP dx; & \int_0^m dm &= \rho C \int_0^L P dx \\ m &= \rho CPL \end{aligned} \quad (4.20)$$

Полагаме $\rho \cdot C = k$ и уравнение (4.20) приема окончателно вида:

$$m = kPL \quad (4.21)$$

Зависимостта (4.21) представлява закон за масовото износване и се формулира по следния начин: Масата m , която тялото губи при триене, е пропорционална на нормалното натоварване P , на пътя на триене L и на фактора на износване k .

Факторът на износване k отчита текущото променливо състояние на контактното взаимодействие между тялото и повърхнината на противотялото при всяко натоварване и път на триене, т.е. отразява сложната комуникация между двете тела и динамиката на взаимодействието в закона за износването.

Параметърът

$$I = \frac{1}{k} = \frac{1}{\rho C} \quad (4.22)$$

се нарича *износоустойчивост* и характеризира способността на тялото да се съпротивлява срещу износване.

След заместване на (4.22) в (4.21) за връзката между масовото износване и износоустойчивостта се получава:

$$I = \frac{L}{m} P \quad (4.23)$$

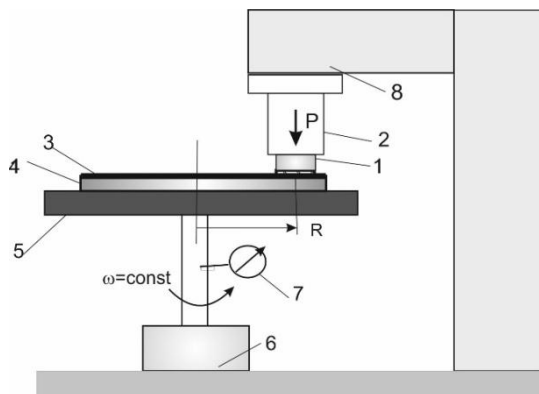
От зависимост (4.23) следва, че при едно и също натоварване P износоустойчивостта I е право пропорционална на пътя на триене L и обратно пропорционална на масовото износване m . Физическият смисъл на последното твърдение се изразява в следното: износоустойчивостта е число, което показва колко метра път на триене ще измине тялото, за да намали своята маса с един милиграм при едно и също натоварване. Колкото по-висока е износоустойчивостта на тялото (трибосистемата), толкова по-голям е неговият ресурс.

4.2.2. Изследване влиянието на натоварването върху характеристиките на износването

Изследва се влиянието на големината на нормалното натоварване върху износването и коефициента на триене в контактни системи, съставени от самосмазващи се композитни материали ИПМ 304, ИПМ 305 и калаен бронз БрО1Ф1 с контратяло от Ст45 при една и съща скорост на плъзгане $V = 0,82 \text{ m/s}$.

4.2.3. Устройство и методика

Изследването е проведено с триботестер от типа „Палец-диск“ (Rubtester), чиято функционална схема е представена на фиг.4.12.



Фиг. 4.12. Схема на триботестер за изследване на износването по схемата «Палец-диск»

Изследваният цилиндричен образец 1 се закрепва неподвижно в леглото на държач 2 в натоварваща глава 8 така, че челната повърхнина на образца контактува с повърхнината на контратялото 3, захванато неподвижно за хоризонтален диск 4. Дискът 4 се задвижва от електродвигател 6 и се върти около вертикалната си централна ос с ъглова скорост $\omega = \text{const}$.

Нормалното натоварване P е приложено в центъра на тежестта на контактната площадка между образца и повърхнината и се осигурява с тежести с помощта на лостова система в натоварващата глава. Пътят на триене се задава чрез броя цикли с оборотомер 7.

Устройството позволява изменение на скоростта на плъзгане в граници от $0,55 \text{ m/s}$ до 1 m/s чрез изменение на разстоянието R между оста на въртене на диска 4 и оста на образеца 1.

Към държача на образца по направление на тангентата към линията на плъзгане е включен електронен динамометър за измерване на силата на триене.

Коефициентът на динамично триене се изчислява по формула (4.5) при съответно натоварване.

С описаното устройство е проведено сравнително изследване на характеристиките на износването на образци от материалите ИПМ 304, ИПМ 305 и Бр101Ф при различно натоварване и еднакви условия – скорост на плъзгане, номинална контактна площ и материал на контратялото (таблица 4.4).

Таблица 4.4. Параметри на експеримента

Параметър	Стойност
Натоварване	17,1 N; 37,1 N; 57,1 N
Номинално контактено налягане	0,6 МПа; 1,3МПа; 2,0 МПа
Скорост на плъзгане	$V = 0.82 \text{ m/s}$
Брой цикли на триене	$200 \div 1000$
Път на триене	$46,4 \div 232 \text{ m}$
Контратяло	Ст 45

Методиката включва следната последователност:

- Подготовка на образци с еднакви размери и еднаква грапавост на контактната повърхнина. Грапавостта се измерва с профилометър „TESA Rugosurf 10-10G“;

- Измерва се масата на образеца m_0 [g] с помощта на електронна везна WPS 180/C/2 с точност до $0,1 \text{ mg}$. Преди всяко измерване на везната образецът се почиства от механични и органични частици, подсушава се с етилов алкохол за предотвратяване на електростатичния ефект;

- Образецът се поставя в държача на натоварващата глава, задава се определено нормално натоварване P и брой цикли на триене;

- Измерва се отново масата m_i на образеца и се изчисляват следните характеристики на износването:

Масово износване m :

$$m = m_0 - m_i, [\text{mg}] \quad (4.24)$$

Скорост на масовото износване γ – разрушената маса при триене от повърхностния слой за време 1 минута:

$$\gamma = m / t, [\text{mg/min}] \quad (4.25)$$

където t е времето на триене.

Редуцирана интензивност на износване i_r – разрушената маса от повърхностния слой за единица път на триене L при единица натоварване P :

$$i_r = \frac{m}{L \cdot P}, [\text{mg/m.N}] \quad (4.26)$$

Редуцирана износоустойчивост I_r – представлява реципрочна стойност на редуцираната интензивност и характеризира пътя, който ще измине образецът при дадено натоварване, за да се разруши от повърхнината му маса 1 милиграм, т.е.

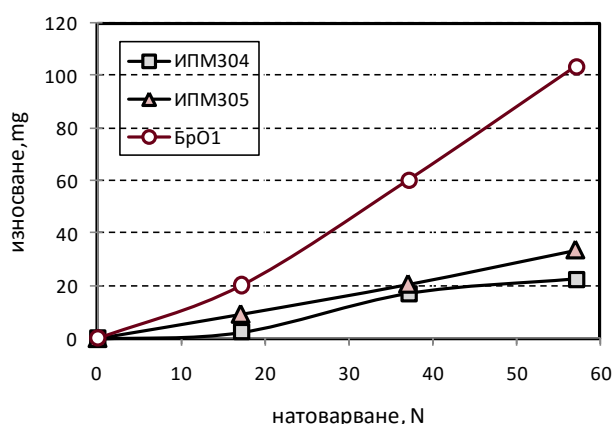
$$I_r = \frac{L \cdot P}{m}, [\text{m.N/mg}] \quad (4.27)$$

Относителна редуцирана износоустойчивост ε_r – отношение между износоустойчивостта на изследвания образец I_r^i и износоустойчивостта I_r^e на образец, приет за сравнение (еталон):

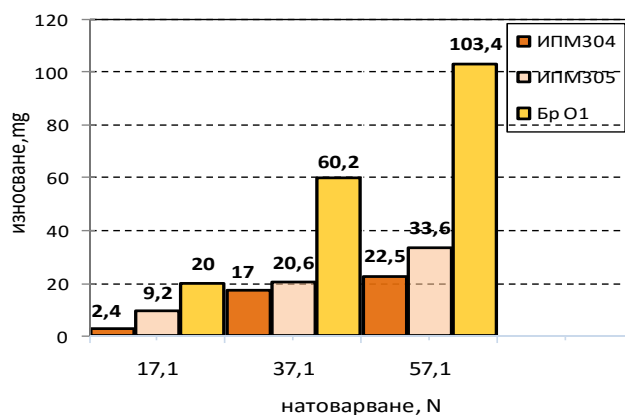
$$\varepsilon_r = \frac{I_r^i}{I_r^e} \quad (4.28)$$

Параметърът ε_r е бездименсионно число и показва колко пъти износоустойчивостта на изпитвания образец е по-голяма, или по-малка от износоустойчивостта на еталона, при еднакви условия на триене.

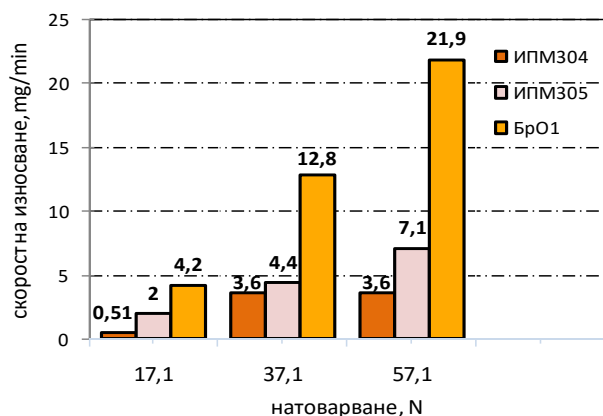
Графични зависимости на сравнителни резултати за образци от трите контактни системи



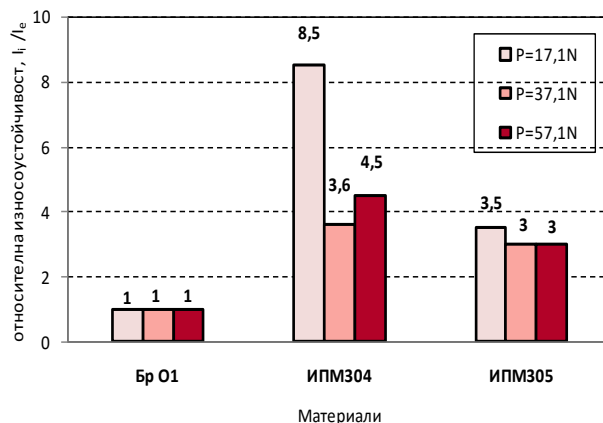
Фиг. 4.31. Зависимост на износването от натоварването на образци ИПМ 304, ИПМ 305 и Бр О1Ф1 при сухо триене за път $L = 232$ т



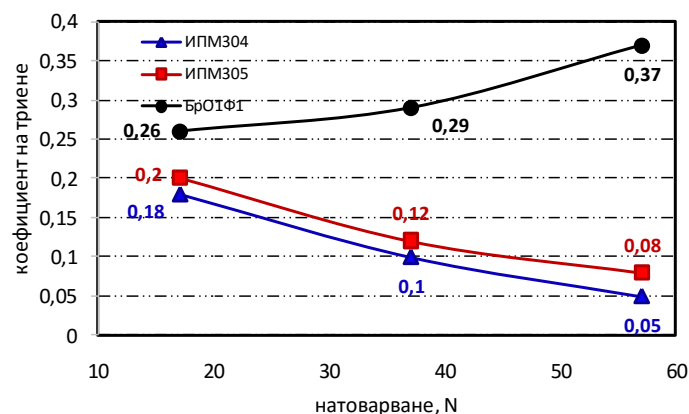
Фиг. 4.32. Диаграма на масовото износване на образци ИПМ 304, ИПМ 305 и БрО1Ф1 при различно натоварване за път $L = 232$ т



Фиг. 4.34. Сравнителна диаграма на скоростта на износване на образци ИПМ 304, ИПМ 305 и Бр О1Ф1 при различно натоварване



Фиг. 4.35. Диаграма на относителната износоустойчивост за всеки образец при три вида натоварване



Фиг. 4.37. Изменение на коефициента на триене от натоварването за трите контактни системи при път на триене $L = 232$ m и скорост на плъзгане $V = 0,82$ m/s

Анализът на получените резултати се свежда до следното:

Зависимостта на масовото износване от пътя на триене за всички изследвани образци има линеен нарастващ характер при всяка стойност на нормалното натоварване.

С увеличаване на нормалното натоварване за образци ИПМ 305 и БрО1Ф1 износването нараства право пропорционално, докато при образец ИПМ 304 се наблюдава нелинеен характер на тази зависимост.

Скоростта на износване остава почти постоянна с изменение на пътя на триене при всички стойности на натоварването за всички изпитвани образци.

При композитите ИПМ 304 и ИПМ 305 съществува тенденция към намаляване на скоростта на износване след път на триене $L = 150$ m, което се дължи на процеса на приработване в трибосистемата.

С увеличаване на натоварването скоростта на износване нараства, но зависимостта има различен характер. За образци ИПМ 305 и БрО1Ф1 тя има устойчив пропорционален характер с много близки стойности за различния път на триене за всеки от образците, но се различава по абсолютна стойност за двата материала.

Зависимостта на скоростта на износване от натоварването за образец ИПМ 304 има форма на S-крива с три участъка: I участък – $0 \leq P_1 \leq 17,1$ N; II участък – $17,1 \leq P_2 \leq 37,1$ N и III участък – $37,1 \leq P_3 \leq 57,1$ N. В първите два участъка кривата се припокрива за различните стойности на пътя на триене. В третия участък скоростта на износването при малък път на триене има линеен характер, но с увеличаване на пътя на триене постепенно намалява и след приработването остава постоянна при $L = 232$ m.

С увеличаване на пътя на триене интензивността на износване при двата композитни материала намалява, докато при бронза тя постепенно нараства и достига максимална стойност.

С увеличаване на натоварването интензивността на износване нараства нелинейно за всички материали, но има различен характер на изменение. При образец БрО1Ф1 тази тенденция е към непрекъснато нарастване. При композитните материали след определена стойност на натоварването – $P = 37,1$ N интензивността започва да намалява при образец ИПМ 304, а при образец ИПМ 305 остава почти постоянна.

От сравнителните резултати за зависимостта на износването от натоварването (фиг.4.31) е очевидно, че най-голямо е износването на образца от

калаен бронз БрО1Ф1. Кривата му е много по-стръмна от кривите на двата композита, които са много близки.

При увеличаване на натоварването 3,3 пъти износването на бронза нараства 5,2 пъти от 20 mg до 103,4 mg (фиг.4.32). Най-голямо е износването на бронза при най-високото натоварване.

От всички изследвани образци най-малко е износването на образец ИПМ 304. При натоварване $P = 17,1 \text{ N}$ неговото износване е 8,3 пъти по-малко от това на бронза и 3,8 пъти по-малко от износването на образец ИПМ 305 (фиг.4.32).

С увеличаване на натоварването, тези съотношения се променят, но винаги остават в полза на образец ИПМ 304.

При трикратно увеличаване на натоварването, скоростта на износване на бронза нараства 42 пъти спрямо тази на ИПМ 304. При малко натоварване – $P = 17,1 \text{ N}$ скоростта на износване на бронза е 8,2 пъти по-висока от тази на образец ИПМ 304 и 2,1 пъти по-голяма от тази на образец ИПМ 305. При натоварване $P = 57,1 \text{ N}$ това съотношение е различно: скоростта на износване на бронза е 6,1 пъти по-голяма от тази на ИПМ 304 и 3,1 пъти по-голяма от скоростта на износване на ИМП 305.

Най-голяма износоустойчивост има образец от композит ИПМ 304 за всички стойности на натоварването. При натоварване $P = 17,1 \text{ N}$ износоустойчивостта му е 8,5 пъти по-висока от износоустойчивостта на бронза и 2,4 пъти по-висока от износоустойчивостта на ИПМ 305. При повишаване на натоварването това съотношение се променя. При три пъти по-голямо натоварване $P = 57,1 \text{ N}$ износоустойчивостта на ИПМ 304 е 4,5 пъти по-голяма от тази на бронза и 1,5 пъти по-висока от износоустойчивостта на ИПМ 305.

4.3. Изследване на износването в трибосистеми със самосмазващи се композитни материали при сухо триене с малка скорост на плъзгане

4.3.1. Описание на експеримента

Проведен е допълнителен експеримент за сравнително изследване на характеристиките на износване на описаните материали с помощта на триботестер по схемата „Палец-диск“, който позволява три пъти по-малка скорост на плъзгане – $V = 0,22 \text{ m/s}$ и натоварване $P = 12,5 \text{ N}$ (фиг.4.38). Като противотяло се използва диск от бързорежеща стомана Р6М5.

Методиката включва измерване на масовото износване през 500 броя цикли на триене в диапазона от 500 до 2000 цикъла, на които съответства път на триене съответно от 110 до 440 метра.



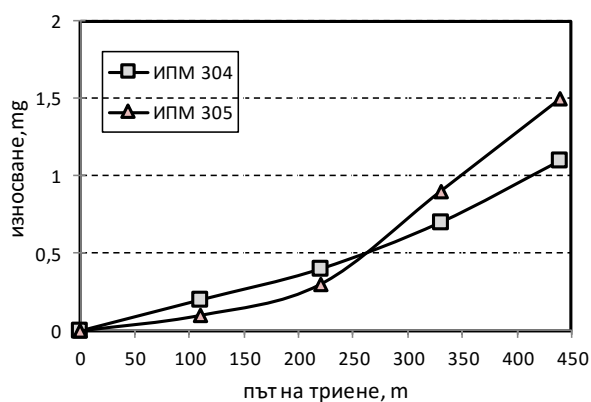
Фиг. 4.38. Снимка на триботестер за изследване на износването при сухо триене с малка скорост на плъзгане

За всеки опит брой цикли на триене се пресмятат характеристиките на износването – масово износване [mg], скорост на износване [mg/min], редуцирана интензивност на износване [kg/m.N], редуцирана износоустойчивост [N.m/kg] и относителна износоустойчивост по формули (4.24) ÷ (4.27).

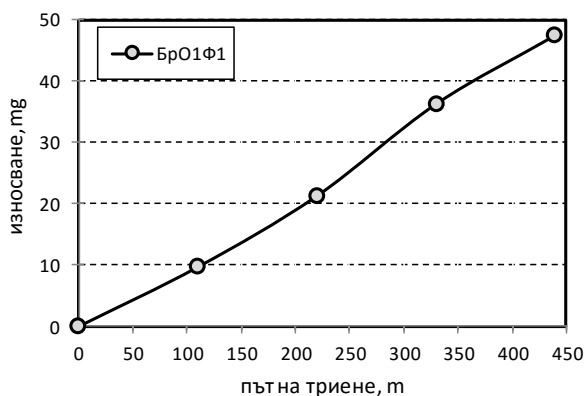
4.3.2. Резултати и анализ

На фигури от 4.39 до 4.44 са представени графично зависимости за изменението на износването, скоростта на износване и износоустойчивостта от пътя на триене за всички образци.

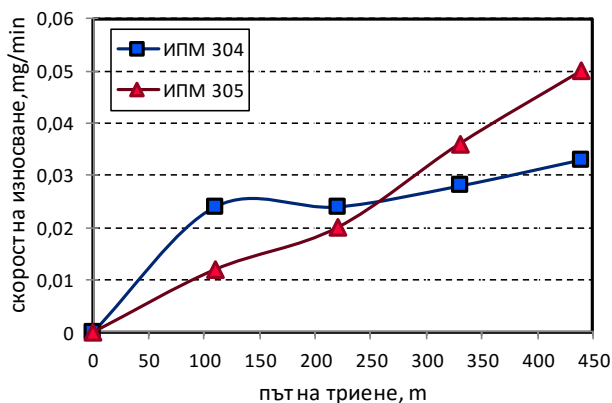
Графични зависимости



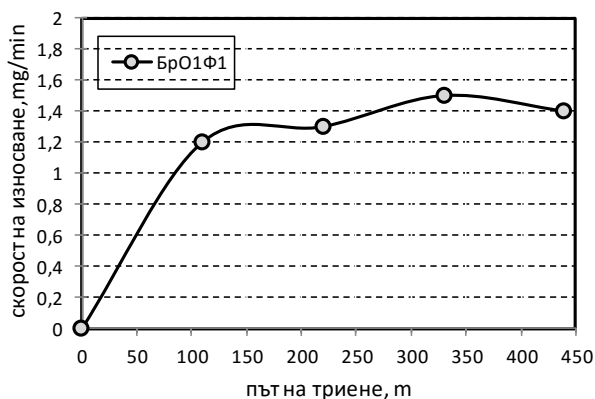
Фиг. 4.39. Зависимост на износването от пътя на триене за ИПМ 304 и ИПМ 305



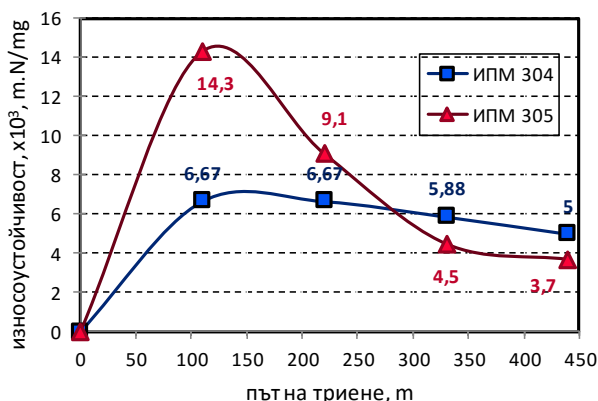
Фиг. 4.40. Зависимост на износването от пътя на триене за бронз БрО1Ф1



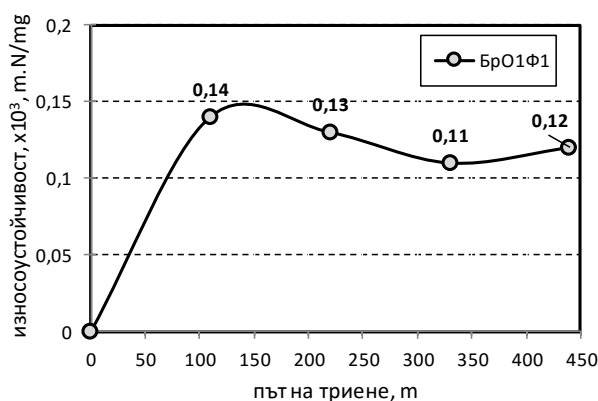
Фиг. 4.41. Зависимост на скоростта на износване от пътя за ИПМ 304 и ИПМ 305



Фиг. 4.42. Зависимост на скоростта на износване от пътя за БрО1Ф1



Фиг. 4.43. Износоустойчивост от пътя на триене за ИПМ 304 и ИПМ 305



Фиг. 4.44. Износоустойчивост от пътя на триене за бронз БрО1Ф1

4.4. Теоретичен модел на интензивността на износване при сухо триене

Получаването на теоретичен модел на редуцираната интензивност на износването от нормалното натоварване се осъществява с помощта на закона за контактното взаимодействие в трибологията.

Изхожда се от закона за износването в класическата трибология във вида:

$$m = k\mu.P.L \quad (4.29)$$

Разделяме двете страни на уравнение (4.29) на произведението PL , при което следва отношението

$$i_r = \frac{m}{P.L} = \mu.k \quad (4.30)$$

Параметърът i_r в (4.30) се нарича *редуцирана интензивност на масовото износване* и представлява разрушената маса от повърхностния слой при триене за единица път на триене L и единица натоварване P . Измерва се в $[mg/N.m]$.

Тук се поставя задачата да се намери аналитичен модел за влиянието на натоварването върху редуцираната интензивност на износване, т.е. зависимостта $i_r = i_r(P)$, известна още в трибологията като закон за редуцираната интензивност.

Законът за контактното взаимодействие най-общо изразява отношението между изследваното смущение A и съответната реакция R на трибосистемата и в диференциална форма има вида:

$$\frac{dR}{R} = \eta \frac{dA}{A} \quad (4.31)$$

където dA/A е относителното смущение и представлява отношение на елементарното смущение dA в много малък участък към интегралното смущение R за определени граници на неговото изменение; dR/R представлява относителната реакция на трибосистемата на действащото върху нея смущение. Параметърът η се нарича комуникативен (контактен) потенциал на контактното взаимодействие.

В случая, който се изследва, външно смущение се явява натоварването P , т.е. $A \approx P$, а реакцията на системата е редуцираната интензивност на износване i_r , т.е. $R \approx i_r$ и уравнение (4.31) приема вида:

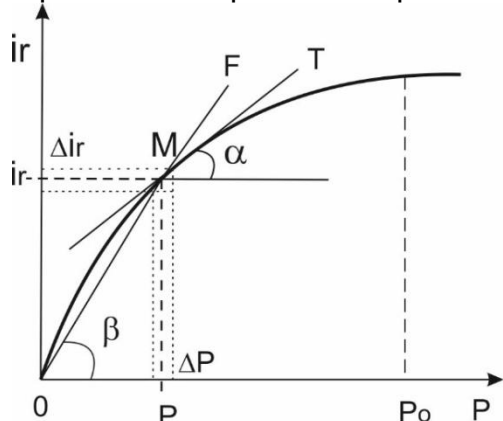
$$\frac{di_r}{i_r} = \eta_p \frac{dp}{p} \quad (4.32)$$

Разглежда се експерименталната крива на зависимостта на интензивността на износването i_r от натоварването P в интервала $0 \leq P \leq P_o$, където P_o е стойността на натоварването в края на разглеждания участък от кривата (фиг.4.49).

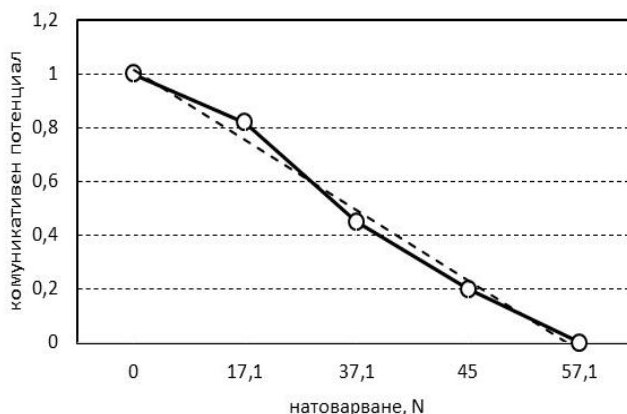
От кривата за комуникативния потенциал на редуцираната интензивност следва:

$$\eta_p = \frac{tg\alpha}{tg\beta} \quad (4.37)$$

Зависимостта на комуникативния потенциал от натоварването $\eta_p = \eta_p(P)$ графично е изобразена на фиг.4.50.



Фиг. 4.49. Общ вид на кривата на изменение на редуцираната интензивност на износване от натоварването



Фиг. 4.50. Зависимост на комуникативния потенциал от натоварването

Зависимостта на фиг. 4.50 е права линия, която може да се апроксимира с функцията от вида:

$$\eta_p(P) = 1 - \frac{P}{P_o} \quad (4.38)$$

където P е текущата стойност на натоварването, а P_o – граничната му стойност в интервала $0 \leq P \leq P_o$.

$$i_r = c.P \exp\left(-\frac{P}{P_o}\right) \quad (4.41)$$

Формула (4.41) представлява търсеният закон за изменение на редуцираната интензивност на износване от натоварването в диапазона $0 \leq P \leq 57,1 \text{ N}$ при скорост на плъзгане $0,82 \text{ m/s} = \text{const}$.

4.5. Изводи

В настоящата глава са разработени методики и е проведено сравнително изследване на характеристиките на статичното и динамичното триене, и износването при сухо триене в атмосферна среда в три трибосистеми, съдържащи: СКАМ ИПМ 304, ИПМ 305 и калаен бронз БрО1Ф1 при контактно взаимодействие с едно и също противотяло.

Основните изводи са следните:

1. С увеличаване на натоварването стойността на статичния коефициент на триене и скокът на коефициента на триене за трите системи намаляват нелинейно като преминават през минимум и максимум. Стойностите на минимума и максимума зависят от големината на натоварването и естеството на материалите.

2. Статичният коефициент на триене в трибосистеми с калаен бронз БрО1Ф1 достига стойности, които са от 1,2 до 2,45 пъти по-големи от тези на ИПМ 304 и ИПМ 305. При високи натоварвания най-малък статичен коефициент на триене 0,16 и скок на коефициента на триене – 0,03 има трибосистема с ИПМ 304, съдържаща в структурата си калай.

3. С увеличаване на натоварването динамичният коефициент на триене в трибосистеми със СКМ намалява нелинейно и достига стойности, характерни за течното триене: за ИПМ 304 – 0,05 и за ИПМ 305 – 0,08. За трибосистеми с БрО1Ф1 динамичният коефициент нараства и приема стойности от 0,26 до 0,37, характерни за сухото триене.

4. С увеличаване на натоварването, масовото износване в трите трибосистеми нараства по нелинеен закон с увеличаване на пътя на триене. При максимално натоварване $P = 57,1 \text{ N}$ ($p_a = 2 \text{ MPa}$) и скорост на плъзгане $0,82 \text{ m/s}$ най-малко износване има ИПМ 304, което е 3,5 пъти по-малко от това на ИПМ 305 и 4,6 пъти по-малко от износването на бронза.

5. В стационарен режим на сухо триене (след приработване) при малка скорост на плъзгане $0,22 \text{ m/s}$ и натоварване $P = 12,5 \text{ N}$ ($p_a = 1 \text{ MPa}$) се отчита, че износоустойчивостта на СКМ е по-висока с два порядъка в сравнение с тази на бронза. Тя зависи от пътя на триене, както следва: при 110 m ИПМ 304 има 47,6 пъти по-голяма износоустойчивост от бронза, а ИПМ 305 – 102 пъти. При 4 пъти по-голям път на триене – 440 m тези съотношения се променят: ИПМ 304 – 42 пъти, а ИПМ 305 – 31 пъти.

6. При режим на триене – скорост $0,22 \text{ m/s}$ и натоварване $P = 12,5 \text{ N}$ ($p_a = 1 \text{ MPa}$) върху повърхността на противотялото от стомана Р6М5 се наблюдава слой със светъл цвят с жълтеникав оттенък с дебелина $25 \mu\text{m}$.

7. Получен е теоретичен модел на интензивността на износване от натоварването за СКМ в условия на сухо триене.

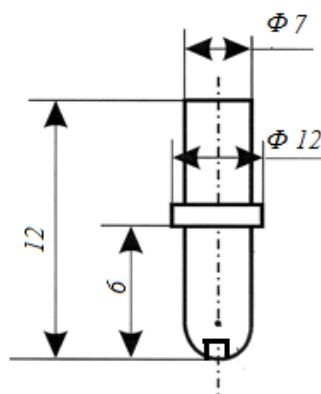
Глава 5. Контактни взаимодействия в трибосистеми при гранично триене

5.1. Изследване влиянието на натоварването върху износването при гранично триене с грес „Литол 24“

Изследват се характеристиките на износването – масово износване, скорост на износване, интензивност на износване и износоустойчивост на самосмазващи се композитни материали ИПМ 304, ИПМ 305 и калаен бронз БрО1Ф1 при различно натоварване в границите от $17,1 \text{ N}$ до $57,1 \text{ N}$ при гранично смазване с грес „Литол 24“.

5.1.1. Устройство и методика

Изследването се провежда с триботестер от типа „Палец-диск“ (Rubtester), описан в глава 4, фиг. 4.12. Образецът от изследваните материали има цилиндрична форма с височина 20 mm .



Контактната повърхнина има формата на пръстен с външен диаметър $7,1 \text{ mm}$, вътрешен диаметър $1,5 \text{ mm}$ и дълбочина 3 mm . По този начин в контактната равнина на триене се оформя малка цилиндрична камера с радиус $0,75 \text{ mm}$ и височина 3 mm , която се запълва с грес „Литол 24“, осигуряваща гранично мазане в процеса на триене (фиг. 5.1).

Фиг. 5.1. Форма и размери на образца при изпитване на гранично триене

В таблица 5.1 са представени стойности на параметрите на експеримента. В случая контактното налягане е с по-високи стойности от това при сухото триене, поради по-малката номинална контактна площ.

Таблица 5.1. Параметри на експеримента при гранично триене

Параметър	Стойност
Натоварване	17,1 N ; 37,1 N ; 57,1 N
Номинално контактното налягане	2,1 MPa ; 3,5 MPa ; 4,6 MPa
Скорост на плъзгане	$V = 0.82 \text{ m/s}$
Брой цикли на триене	200 ÷ 1000
Път на триене	46,4 ÷ 232 m
Противотяло	Стомана 45

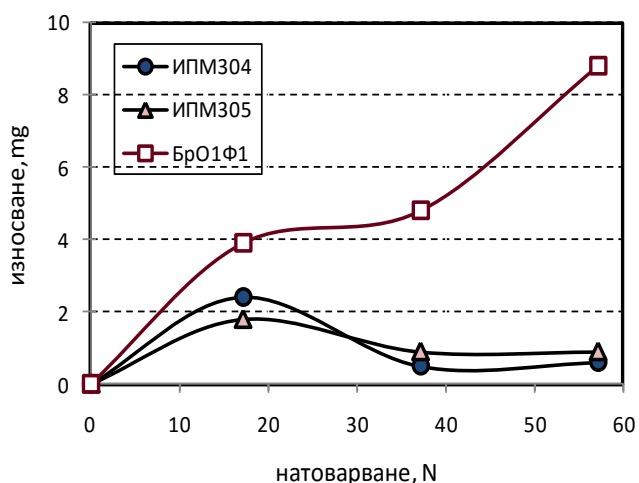
5.1.2. Резултати и анализ

Резултатите за характеристиките на износването – масово износване [mg], скорост на износване [mg/min], редуцирана интензивност на износване [kg/m.N] и износоустойчивост [m.N/kg] са изчислени по формули от (4.24) до (4.28), за трите образеца.

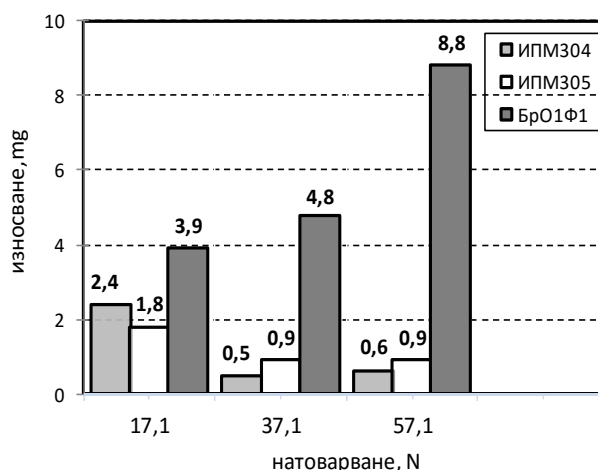
Построени са графични зависимости на следните характеристики:

- Изменение на масовото износване от пътя на триене и от нормалното натоварване;
- Изменение на скоростта на износване от пътя на триене и от нормалното натоварване;
- Изменение на интензивността на износване от пътя на триене и от нормалното натоварване.

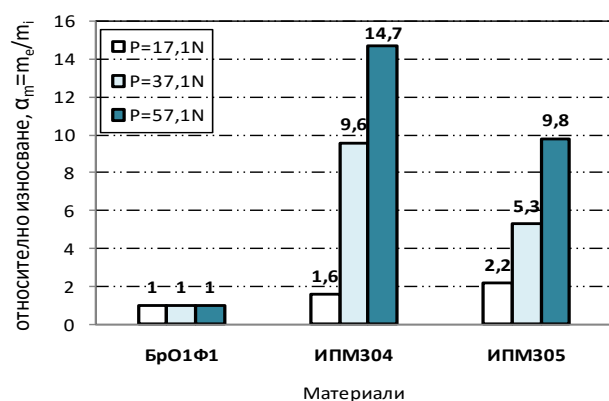
На фигури 5.20 до 5.25 са представени сравнителни резултати за образците под формата на графики и диаграми.



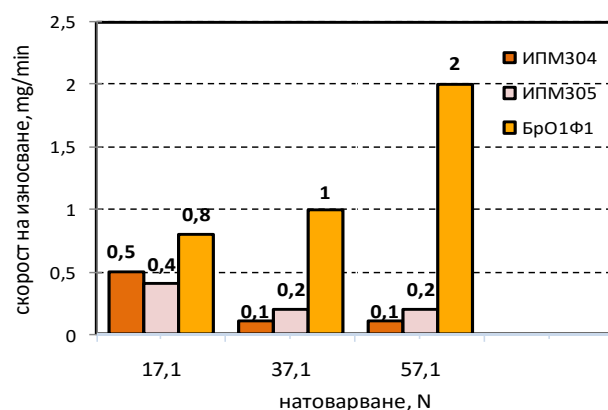
Фиг. 5.20. Зависимост на масовото износване от натоварването за образци ИПМ 304, ИПМ 305 и БрО1Ф1 при гранично триене с "Литол 24" и път на триене $L=232 \text{ m}$



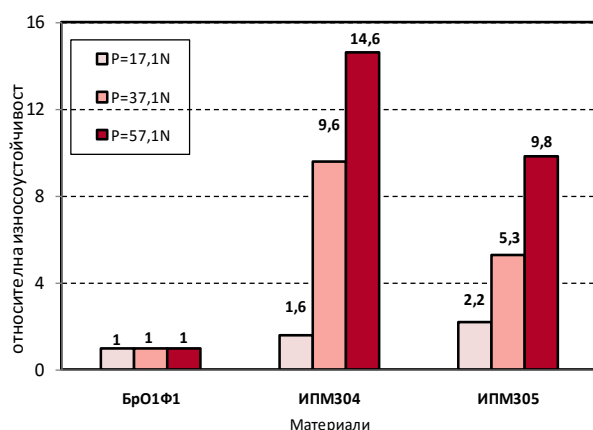
Фиг. 5.21. Диаграма на масовото износване на образци ИПМ 304, ИПМ 305, БрО1Ф1 при различно натоварване и път на триене $L=232 \text{ m}$



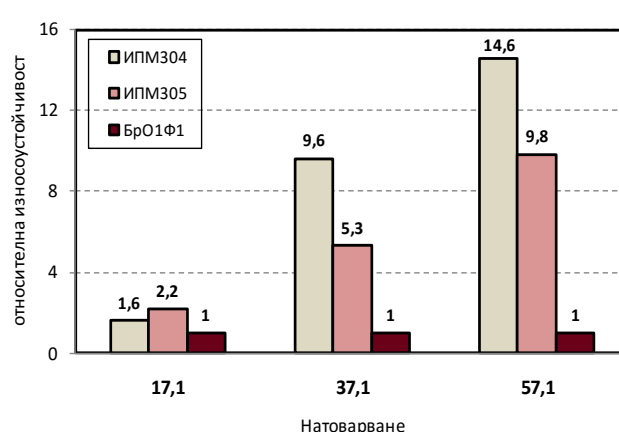
Фиг. 5.22. Диаграма на относителното масово износване α_m на образци ИПМ 304, ИПМ 305, БрО1Ф1 при различно натоварване и път на триене $L=232$ m



Фиг. 5.23. Диаграма на скоростта на износване на образци ИПМ 304, ИПМ 305, БрО1Ф1 при различно натоварване и $L=232$ m при гранично триене с „Литол 24“



Фиг. 5.24. Относителна износоустойчивост на всеки образец при три вида натоварване и $L=232$ m при гранично триене с „Литол 24“

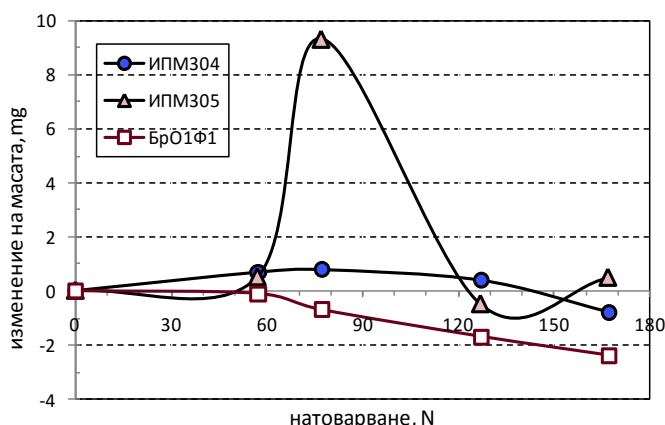


Фиг. 5.25. Относителна износоустойчивост на трите вида образци за всяко натоварване и $L=232$ m при гранично триене с „Литол 24“

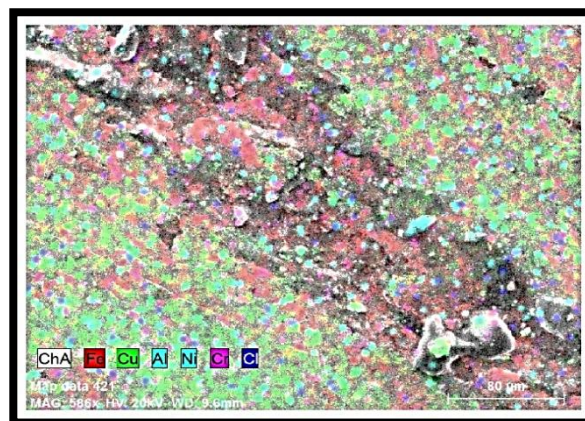
5.2. Влияние на металоплакираща композиция АМК върху износването при гранично триене с грес „Литол 24“ при различно натоварване

Проведено е изследване на характеристиките на износване на образци от ИПМ 304, ИПМ 305 и БрО1Ф1 при гранично триене с грес „Литол 24“ с добавяне на 5% металоплакираща композиция АМК [125]. Изпитанията са направени при високо натоварване в диапазона от 57,1N до 167,1N и при скорост на плъзгане $V = 0.82$ m/s = const и път на триене $L = 232$ m = const с помощта на триботестер „Палец-диск“ (Rubtester). Като противотяло е използван материал от Ст45.

На фиг. 5.26 е представена зависимостта на изменението на масата на образците от натоварването. Знакът (-) по ординатната ос на координатната система показва намаляване на масата, т.е. стойността на износването в [mg], а положителните стойности – знак (+) показват увеличаване на масата, т.е. натрупване на вещество върху повърхностния слой на образците.



Фиг. 5.26. Изменение на масата на образци ИПМ 304, ИПМ 305 и БрО1Ф1 при гранично триене с „Литол 24“+ АМК при натоварване $P=167,1\text{N}$; скорост на плъзгане $V=0,82\text{m/s}$ и път на триене $L=232\text{ m}$



Фиг. 5.34. Микроструктура на повърхностния слой на противотялото след гранично триене с „Литол 24“+ АМК при натоварване $P=167,1\text{N}$; скорост на плъзгане $V=0,82\text{m/s}$ и път на триене $L=232\text{ m}$

Механизмът на формиране на сервовитния филм при триене с грес „Литол 24“+ АМК е различен от механизма на изграждане на трансферния филм при гранично триене само с грес „Литол 24“ (фиг. 5.34). В случай без добавка АМК основният механизъм е термодифузионният механизъм, характерен за избирателното пренасяне на елементи от тялото върху повърхнината на противотялото и последващи трибохимични процеси на взаимодействие.

5.3. Изследване влиянието на скоростта на плъзгане върху характеристиките на износване при гранично триене

Изследват се характеристиките на износване на СКАМ ИПМ 304, ИПМ 305 и калаен бронз БрО1Ф1 при високи скорости на плъзгане, и постоянно натоварване при гранично триене с грес „Литол 24“.

5.3.1. Устройство и методика

За осъществяване на изследването е разработен триботестер по кинематичната схема „Палец-диск“ (фиг.5.35).



Фиг. 5.35. Снимка на триботестер за изследване на износването при високи скорости в условия на гранично триене

Противотялото представлява хоризонтален диск с диаметър 80 mm и дебелина 4 mm, закрепен за плоча, която се върти около вертикалната си ос. Контратялото е изработено от стомана Ст3П по БДС 5292-61.

В процеса на триене се измерва вертикалната вибрационна скорост w_z на рамката, за която са закрепени неподвижно образците и температурата на повърхнината в близост до контакта. Измерването на вибрационната скорост се осъществява с виброметър PCE-VT 204.

В таблица 5.7 са представени стойности на основните параметри на експеримента.

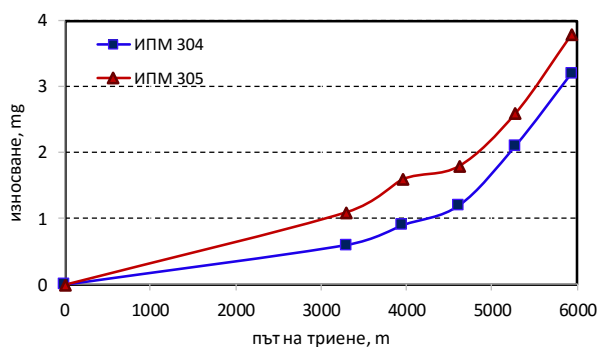
Таблица 5.7. Параметри на експеримента

Параметър	Стойност
Натоварване на всеки образец	7,5 N
Номинална контактна площ	$36,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
Номинално контактно налягане	
Обороти на въртене	$2500 \pm 4500 \text{ min}^{-1}$
Скорост на плъзгане	$9,2 \pm 16,5 \text{ m/s}$
Материал на контратялото	Стомана 3П
Продължителност на триене	6 min

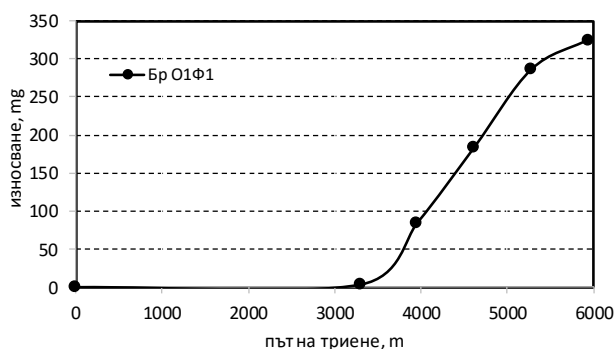
5.3.2. Резултати и анализ

С описаното устройство и методика са проведени изпитания и са получени резултати за характеристиките на износването и нормалната компонента на вибрационната скорост при различни скорости на плъзгане за материалите ИПМ 304, ИПМ 305 и БрО1Ф1. За масовото износване при всеки опит е приета средно-аритметичната стойност от износването на двата образца от един и същи материал.

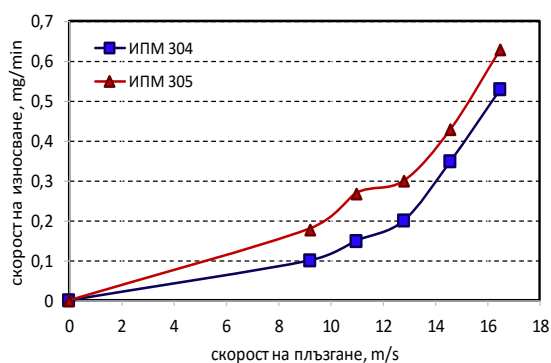
На фигури 5.36, 5.37, 5.38 и 5.39 са представени графично зависимостите на износването и скоростта на износване съответно от пътя на триене и от скоростта на плъзгане.



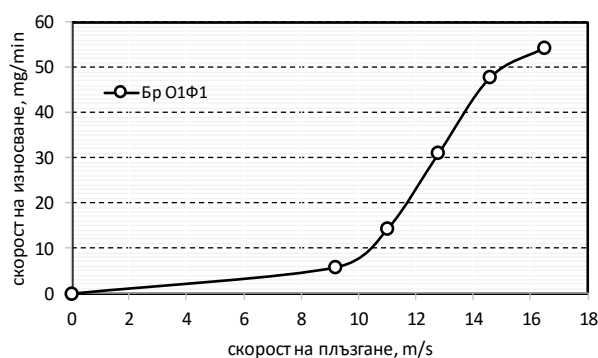
Фиг. 5.36. Изменение на износването от пътя на триене за СКМ



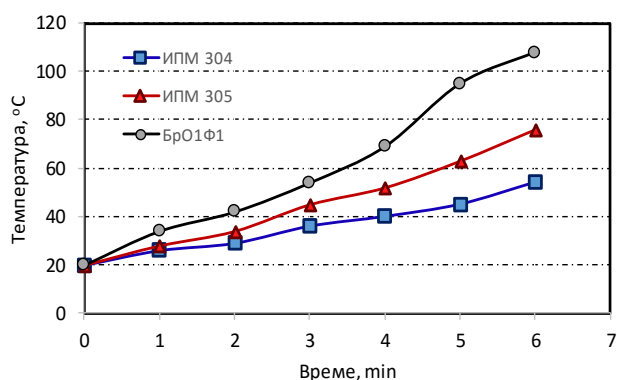
Фиг. 5.37. Изменение на износването от пътя на триене за калаен бронз



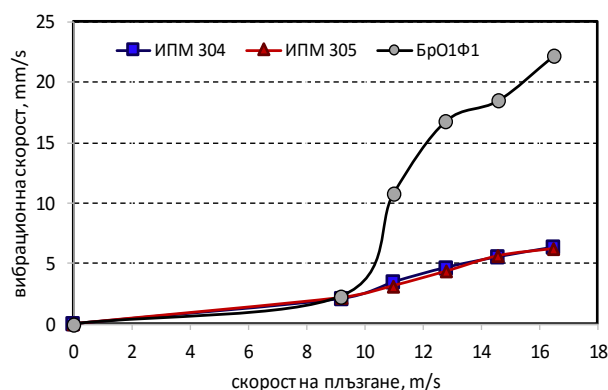
Фиг. 5.38. Изменение на скоростта на износване от скоростта на плъзгане за SKAM



Фиг. 5.39. Изменение на скоростта на износване от скоростта на плъзгане за калаен бронз



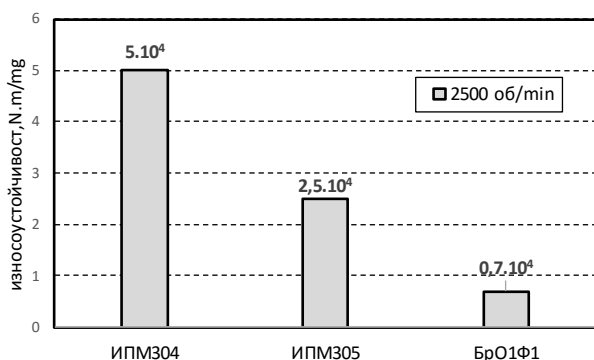
Фиг. 5.40. Изменение на средната температура в близост до контакта в режим на гранично триене при 4500 об/мин



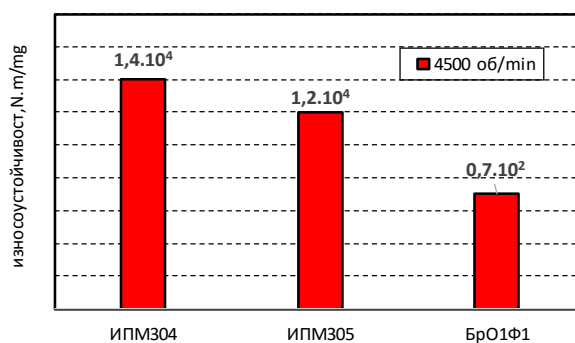
Фиг. 5.41. Изменение на средната вибрационна скорост w_z от скоростта на плъзгане в режим на гранично триене за калаен бронз

Изменението на средната температура в близост до контакта при 4500 об/мин и изменението на средната вибрационна скорост от скоростта на плъзгане са представени съответно на фиг. 5.40 и 5.41.

На фигури 5.42 и 5.43 са представени диаграми на редуцираната износоустойчивост на изследваните материали при два скоростни режима – 2500 об/мин и 4500 об/мин.



Фиг. 5.42. Диаграма на износоустойчивостта на материалите в режим на гранично триене при 2500 об/мин (скорост на плъзгане 9,2 m/s)



Фиг. 5.43. Диаграма на износоустойчивостта на материалите в режим на гранично триене при 4500 об/мин (скорост на плъзгане 16,5 m/s).

5.4. Изводи

В режим на гранично триене са получени експериментални зависимости за характеристиките на износване, контактната температура и вибрационната скорост в три трибосистеми: със СКМ ИПМ 304, ИПМ 305 и бронз БрО1Ф1. Изследванията са проведени в два режима на гранично смазване – с грес „Литол 24” и грес „Литол 24” + добавка 5% на металоплакираща композиция АМК.

Основните резултати водят до следните заключения:

1. При гранично триене с „Литол 24”, при три пъти увеличаване на натоварването, износването на ИПМ 304 и ИПМ 305 рязко намалява, както следва: при ИПМ 304 кривата има експоненциален характер и при най-голямо натоварване от 57,1 N ($p_a = 4,6$ МПа) износването достига 14,7 пъти по-малки стойности от тези на бронза; при ИПМ 305 износването плавно намалява и достига стойност 9,8 пъти по-малка от тази на бронза.

2. При високи натоварвания в граничен режим на триене с „Литол 24” в трибосистемите със СКМ върху повърхността на противотялото се наблюдава образуване на светъл слой.

3. С увеличаване на скоростта на плъзгане в границите от 9,2 m/s до 16,5 m/s в граничен режим на триене с „Литол 24” износването на всички материали нараства по нелинеен закон. Абсолютната износоустойчивост на ИМП 304 и ИПМ 305 нараства в зависимост от скоростта на плъзгане, както следва:

– при скорост на плъзгане 9,2 m/s износоустойчивостта на ИПМ 304 е 7 пъти по-голяма от износоустойчивостта на бронза и 2 пъти по-голяма от тази на ИМП 305;

– при скорост на плъзгане 16,5 m/s износоустойчивостта на СКМ е с два порядъка по-голяма от износоустойчивостта на бронза.

4. С увеличаване на скоростта на плъзгане от 9,2 m/s до 16,5 m/s за време 6 минути контактната температура нараства право пропорционално за различните материали. За ИПМ 304 тя нараства с 34°C, за ИМП 305 – с 56°C, а за БрО1Ф1 – с 88°C.

5. При екстремални стойности на скоростта на плъзгане в границите от 9,2 m/s до 16,5 m/s в трите трибосистеми се появяват вибрационни движения, чиито вибрационни скорости нарастват с увеличаване на скоростта на плъзгане за различните материали, както следва:

– за калаен бронз БрО1Ф1 нормалната вибрационна скорост нараства от 2,2 mm/s до 22,3 mm/s;

– за СКМ нормалните вибрационни скорости нарастват само 3 пъти, от 2,1 mm/s до 6,3 mm/s;

Наличието на минимални вибрационни скорости в трибосистеми със СКМ, според нас, се дължи на демпфиращите свойства на контактния филм и вътрешната контактна мрежа на СКМ. Вътрешната контактна мрежа се формира от нишките меден фосфид, разположени по границите на зърната на твърдите разтвори. Твърдите разтвори са съответно: при ИМП 304 от мед-калай Cu-Sn, а при ИМП 305 от мед-никел Cu-Ni. Тази контактна мрежа се вижда в микроструктурата на СКМ, показана на фиг. 2.3 за ИПМ 304 и на фиг. 2.4 за ИМП 305.

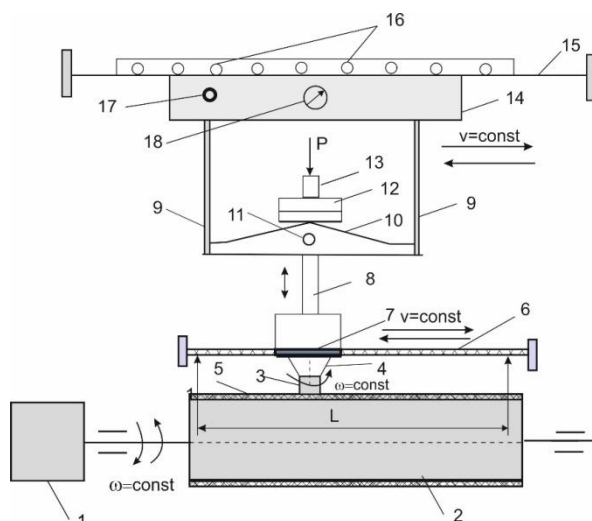
6. При гранично триене с грес „Литол 24” + добавка 5% металоплакираща композиция АМК е регистриран ефект на триене без износване в трибосистеми със СКМ. Той се наблюдава при режим на високи натоварвания в диапазон от 57,1N до 167,1N ($4,6 \leq p_a \leq 13,5$ МПа) и се изразява във формиране и поддържане на металоплакиращ слой с дебелина 3 μ m.

Глава 6. Износване в трибосистеми с композитни покрития и материали при сухо абразивно триене и вибрационно натоварване

6.1. Устройства и методика за изследване на абразивно износване при вибрационно натоварване

6.1.1. Устройства

Изследването на абразивното износване, под действието на периодично натоварване, е направено с триботестер „Палец-цилиндър“, чиято схема е представена на фиг. 6.1.



Фиг. 6.1. Функционална схема на триботестер „Палец-цилиндър“ за изследване на абразивно износване под действието на вертикални вибрации

Обозначенията на фиг. 6.9 са описани, както следва:

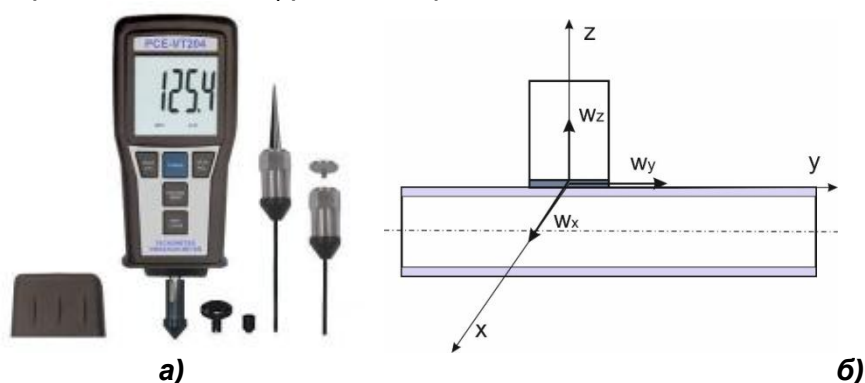
1 – електродвигател; 2 – цилиндър; 3 – образец с покритие; 4 – натоварваща глава; 5 – абразивна повърхнина; 6 – неподвижна рейка; 7 – зъбен пръстен; 8 – механизъм за закрепване на образца; 9 – вибрираща рамка; 10,11 – фиксиращ застопоряващ механизъм; 12,13 – тежести и натоварващ механизъм; 14 – вибратор; 15 – носеща конструкция на вибратора; 16 – двигателен механизъм на вибратора; 17 – бутон за включване и изключване на вибратора; 18 – регулатор на параметрите на вибрациите.

Изследваният образец 3 контактува чрез челната си повърхнина с абразивната повърхнина 5 на противотялото, което представлява хоризонтален цилиндър 2. Образецът 3 има диаметър на контактната площадка $\varnothing = 17 \text{ mm}$ и се закрепва в държача към натоварваща глава 4 посредством еластична връзка, която позволява самонагаждане на образца спрямо повърхнината 5 и му дава възможност да се върти около собствената си вертикална ос. Тези обстоятелства гарантират условия за последователно равномерно износване на цялата номинална контактна площ на образца. Натоварващата глава 4 чрез хоризонтален зъбен пръстен 7 се зацепва с неподвижна рейка 6, разположена успоредно на образувателната на цилиндъра 2 и по този начин се осигурява релативна трансляция на образца по образувателната на цилиндъра 2. Образецът 3 е захванат чрез приспособление 8 за вибриращата рамка 9, чрез която се предават вибрации от вибратора 14 по оста на образца. Централното нормално натоварване P по оста на образца се осигурява чрез избор на подходящи тежести 12 в натоварващ механизъм 13.

Вибраторът 14 е монтиран на носеща конструкция 15, в която се движи трансляционно едновременно с вибриращата рамка 8, натоварващата глава 4 и

образеца 3 по образувателната на цилиндъра 2. Повърхнината с твърдо-закрепения абразив се моделира с импрегниран корунд с определена твърдост и едрина на зърната, който е закрепен неподвижно за повърхнината на цилиндъра 2. Цилиндърът 2 извършва ротация около хоризонталната си ос с постоянна ъглова скорост. Движението на образеца 3 представлява равнинно движение: номиналната контактна площадка извършва транслация по образувателната на цилиндъра и едновременно ротира около вертикална ос, минаваща през нейния център.

Измерването на параметрите на вибрациите – вибрационно преместване [mm], вибрационна скорост [mm/s] и вибрационно ускорение [mm/s²] се извършва с виброметър „PCR-VT 204“ (фиг. 6.2, а).



Фиг. 6.2. Виброметър „PCR-VT 204“ за измерване параметрите на вибрациите:
а) виброметър „PCR-VT 204“; б) регулатор

В таблица 6.1 са представени стойности на вибрационната скорост в три направления: вертикална вибрация - w_z , вибрация по направлението на плъзгане - w_y и напречна вибрация - w_x по направление x , за всяко показание на регулатора 18 (фиг. 6.2, б).

Таблица 6.1. Стойности на компонентите на вибрационната скорост

Тариране на регулатора	1	5	7	9	10
w_z mm/s	3	6	9	16	20
w_x mm/s	0,2	0,35	0,8	3,8	5
w_y mm/s	0,4	0,6	0,9	3,8	4,4
w , mm/s	3	6,04	9,08	16,87	21,08

С регулатора на вибрациите 18 се задават различни стойности на вибрационната скорост, изменяща се в диапазона $3 \leq w_z \leq 20$ mm/s. Този интервал на изменение на вибрационната скорост е избран в съответствие с изискванията за оценка и класификация на машини и съоръжения в ISO 2372 и VDI 2056. Машините и съоръженията са класифицирани в четири групи К, М, G и Т.

Скоростта на плъзгане V на образеца, по-конкретно на центъра на контактната площадка, има две компоненти V_y и V_x , които в съответствие с фиг.6.3 се определят по формулите:

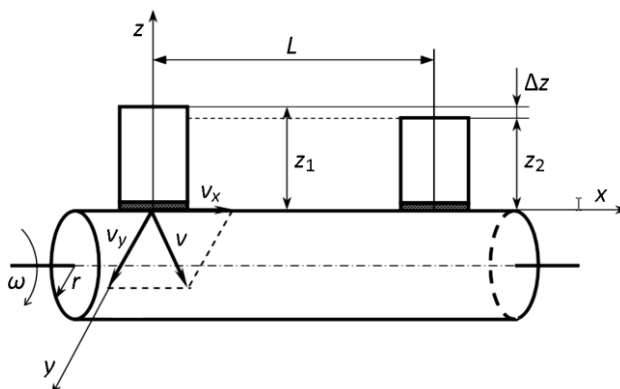
$$V_x = \frac{L}{t}; V_y = r \cdot \omega = r \frac{\pi \cdot n}{30}; V = \sqrt{V_y^2 + V_x^2} \quad (6.1)$$

където $L = 0,6$ m е хоризонталният път по образувателната на цилиндъра, който образецът изминава за един цикъл; времето $t = 2,28$ min е времето, за което образецът изминава дължината L по образувателната на цилиндъра; $r = 0,075$ m е радиусът на цилиндъра; $n = 40$ min⁻¹ са оборотите на въртене на цилиндъра.

Общият път на триене на образца по спираловидната линия се изчислява по формулата:

$$S = v \cdot t \cdot N \quad (6.2)$$

където N е броят цикли на плъзгане.



Фиг. 6.3. Схема на скоростта на плъзгане на центъра на контактната площадка на образца по въртящия се цилиндър

Настоящото изследване на наварени композитни покрития и сферографитен чугун GJS 600-3, микролегиран с различно съдържание на калай – 0.018, 0.02, 0.032 и 0.051% е проведено при еднакви условия на плъзгане като се променя само вибрационната скорост.

Образците имат цилиндрична форма с диаметър $d = 16.9 \text{ mm}$, височина 22 mm и еднаква грапавост на контактната повърхнина $R_a = 0.413 \text{ }\mu\text{m}$.

Изпитването е проведено при следните постоянни параметри: натоварване 4 kg (3.92 N), номинална контактна площ $A_a = 2,24 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ и номинално контактно налягане $p_a = 1,75 \text{ N/cm}^2$ ($p_a = P/A_a = 3,92/2,24 = 1,75 \text{ N/cm}^2$). Скоростта на плъзгане и пътят на плъзгане са съответно $v = 0.31 \text{ m/s}$ и $S = 24.49 \text{ m}$, определени по формули (6.1) и (6.2).

Като противотяло се използва абразивна шкурка от Корунд 120, която се сменя при изпитване на всеки отделен образец.

6.1.2. Методика за изследване на характеристиките на износването

Методиката за изследване на характеристиките на износването се състои в измерване на масовото износване на всеки образец, при зададени постоянни стойности на факторите: натоварване, път на триене, скорост на плъзгане, вид на абразивната повърхнина и определена виброскорост. След това при същите условия на плъзгане се задава друга стойност на виброскоростта и отново се измерва масовото износване. Опитите се повтарят за всеки образец при няколко стойности на виброскоростта.

Изчисляват се характеристиките на износването, както следва:

► Масово износване m , [mg] – разрушената маса от повърхностния слой на образца за определен път на триене L , която се пресмята като разлика между масата на образца преди и след триене, т.е.

$$m = m_0 - m_i \quad (6.3)$$

► Скорост на масовото износване γ [mg/min] – характеристика на износването във времето, т.е. представлява разрушената маса за единица време на триене t :

$$\gamma = \frac{m}{t} \quad (6.4)$$

► Интензивност на масовото износване i_m [mg/m] – представлява разрушената маса при триене за единица път на триене L :

$$i_m = \frac{m}{L} \quad (6.5)$$

► Интензивност на линейно износване i [$\mu\text{m}/\text{m}$] – изменение на височината на образца, т.е. линейното износване на образца h [μm], след изминаване на определен път на триене L :

$$i = \frac{m}{\rho A_q L} = \frac{h}{L} \quad (6.6)$$

където: ρ е плътността на повърхностния слой на образца; A_q – номиналната (геометрична) контактна площ, а h е линейното износване на образца;

► Масова износоустойчивост I_m [m/mg] – изразява се като реципрочна стойност на масовата интензивност на износване i_m , т.е.

$$I_m = \frac{1}{i_m} = \frac{L}{m} \quad (6.7)$$

Масовата износоустойчивост представлява число, което показва колко метра път на триене ще измине образецът в дадените условия, за да се разруши от повърхнината му маса, равна на един милиграм.

► Линейна износоустойчивост I [m/ μm] – изразява се като реципрочна стойност на интензивността на линейното износване i , т.е.

$$I = \frac{1}{i} = \frac{\rho A_q L}{m} = \frac{L}{h} \quad (6.8)$$

Износоустойчивостта I показва колко метра път на триене ще измине образецът за да се намали повърхностният слой с един микрометър.

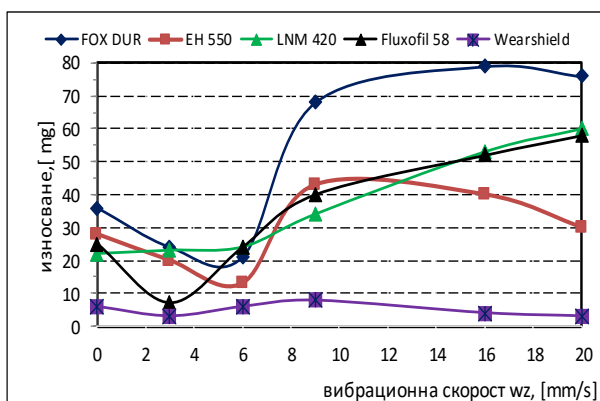
► Относителна износоустойчивост λ - характеризира влиянието на вибрациите върху износоустойчивостта и представлява отношение между износоустойчивостта I_w на образца при действие на вибрационно натоварване и износоустойчивостта I_i на образца без вибрация, при едни и същи условия на триене:

$$\lambda = \frac{I_w}{I_i} \quad (6.9)$$

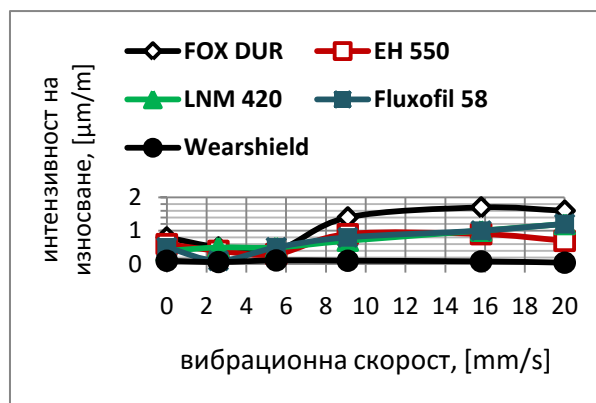
6.2. Абразивно износване на наварени прахови покрития в условия на нормално вибрационно натоварване

С описаните методика и устройство са изследвани композитни наварени покрития FOX DUR 350, EH 550, LNM 420, Fluxofil 58 и Wearshield 70.

На фиг. 6.4 е представена графично зависимостта на масовото износване от големината на вертикалната вибрация w_z , а на фиг. 6.5 – зависимостта на интензивността на износване от големината на вертикалната вибрация w_z .



Фиг. 6.4. Зависимост на износването от вертикалната виброскорост w_z



Фиг. 6.5. Зависимост на интензивността на износване от вертикалната виброскорост w_z

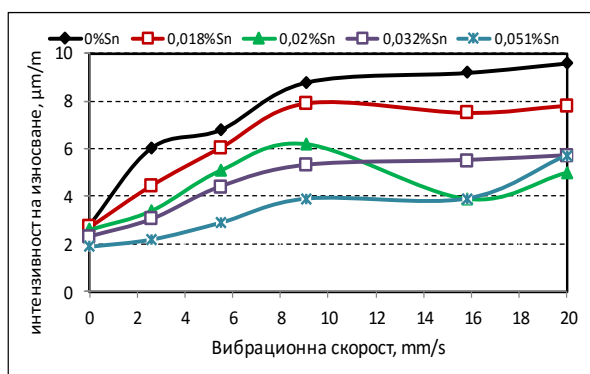
6.3. Абразивно износване на сферографитен чугун GJS 600-3, микролегиран с калай, в условия на нормално вибрационно натоварване

С описаните методика и устройство са извършени следните изследвания:

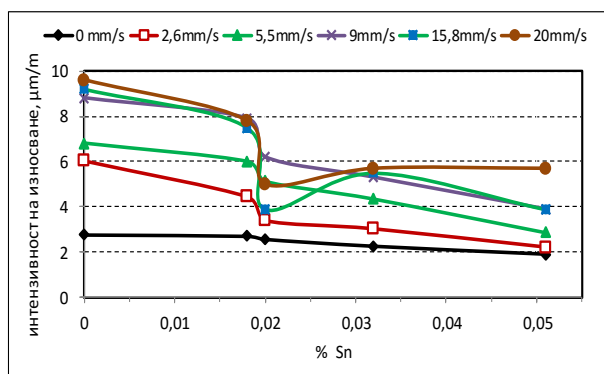
- Изследване влиянието на големината на вибрационната скорост върху характеристиките на износването – масово износване, скорост, интензивност на износването и изнosoустойчивост на сферографитни чугуни GJS 600-3 без наличие на калай и сферографитен чугун GJS 600-3, микролегиран с различно съдържание на калай – 0,018%, 0,02%, 0,032% и 0,051%.

- Изследване влиянието на количеството на калая в сферографитен чугун GJS 600-3 върху характеристиките на износването при действието на различни вибрационни скорости.

Въз основа на резултатите в таблица 6.4 са построени графично зависимости на интензивността на износването i_w от нормалната компонента на вибрационната скорост w_z (фиг. 6.11) и зависимостта на интензивността на износване от процентното съдържание на калай в сферографитен чугун GJS 600-3 (фиг. 6.12).



Фиг. 6.11. Зависимост на интензивността на износване от вибрационната скорост w_z за чугуни с различно процентно съдържание на калай



Фиг. 6.12. Зависимост на интензивността на износване от процентното съдържание на калай за различни вибрационни скорости

6.4. Изводи

Основните изводи в настоящата глава на дисертацията са следните:

1. Експериментално е получена зависимост на масовото износване от вибрационната скорост за пет вида наварени електродъгови покрития FOX DUR, EH 550, LNM 420, Fluxofil 58 и Wearshield 70 при еднакви условия на триене. Зависимостта има нелинеен характер с изразен минимум на износването за всички изследвани покрития.

2. Установени са три участъка в кривата на изменение на износването от вибрационната скорост за всички изследвани покрития: участък на намаляване на износването при вибрационна скорост $0 < w_z \leq 5,5 \text{ mm/s}$, участък на експоненциално нарастване на износването при $5,5 < w_z \leq 9,1 \text{ mm/s}$ и участък на пропорционално увеличаване на износването при $9,1 < w_z \leq 20 \text{ mm/s}$.

3. В условия на виброабразивно износване максимална износоустойчивост има покритие Wearshield 70, която, при вибрационна скорост 20 mm/s , достига около 2,7 пъти по-висока стойност от тази в условия без вибрации.

4. Проведено е сравнително изследване на характеристиките на износването на сферографитен чугун GJS 600-3 без легиране и микролегиран с различно съдържание на калай в условия на сухо абразивно триене с вибрационно натоварване.

5. Получени са експериментални резултати за зависимостта на интензивността на износване от нормалната вибрационна скорост и от процентното съдържание на калай.

6. Установени са два етапа в изменението на износването от вибрационната скорост – нестационарен етап, при който вибрационната скорост се изменя в граници $0 < w_z \leq 9,1 \text{ mm/s}$ и стационарен етап – при изменение на вибрационната скорост в интервала $9,1 < w_z \leq 20 \text{ mm/s}$.

7. Представен е механизъм за износването при вибро-абразивно триене на сферографитни чугуни GJS 600-3, микролегиран с калай, който се основава на контактният подход в трибологията, свързан с понятието „вътрешна контактна мрежа”.

III. ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научни приноси

1. Получен е нов теоретичен модел в трибологията за зависимостта на редуцираната интензивност на износване от натоварването в екстремален режим на сухо триене в трибосистеми със самосмазващи се композитни антифрикционни материали (СКАМ) ИПМ 304 и ИПМ 305, разработени в Института по проблеми на материалознанието към Украинската Академия на науките.

Научно-приложни приноси

2. Установени са експериментални зависимости за влиянието на работната среда – вакуум (10^{-3} Pa) и въздух върху големината и характера на изменение на динамичния коефициент на триене и линейното износване в трибосистеми със СКАМ ИПМ 304 и ИПМ 305 при две кинематични позиции на образците – неподвижна сфера и въртящ се хоризонтален диск:

2.1. Потвърдено е, че във вакуум (10^{-3} Pa) коефициентът на триене има по-малки стойности и по-устойчив характер с течение на времето в сравнение с тези във въздух при еднакви режими на триене.

2.2. Установено е, че кинематичната позиция на образеца в трибосистемата влияе по различен начин върху големината и характера на изменение на

коефициента на триене, на линейното износване и на продължителността на приработване. Най-малки стойности на коефициента на триене и на линейното износване във вакуум (10^{-3} Pa) имат образци ИПМ 304 и ИПМ 305 в позиция на неподвижна сфера. Във въздушна среда за двата материала се наблюдава обратен ефект – коефициентът на триене има по-малки стойности в позиция на въртящ се диск. Това се обяснява с различните механизми на топлообмен на трибосистемата във въздушна и вакуумна среда.

2.3. Доказано е, че в кинематична позиция „неподвижна сфера“ на образец ИПМ 305 във вакуум (10^{-3} Pa) и във въздух след определен път на плъзгане настъпва ефект на триене без износване. Върху повърхнината на тялото се формира контактен трансферен слой с различна дебелина: във вакуум – 260 μm , а във въздух дебелината е 5 пъти по-голяма – 1,3 mm.

3. Установени са експериментални зависимости за влиянието на натоварването върху характеристиките на статичното сухо триене в три трибосистеми със СКАМ ИПМ 304, ИПМ 305 и калаен бронз БрО1Ф1.

4. Доказано и потвърдено е, че в режим на сухо динамично триене, влиянието на натоварването и пътя на плъзгане върху коефициента на триене и характеристиките на износването в три трибосистеми: със СКАМ ИПМ 304, ИПМ 305 и калаен бронз БрО1Ф1.

4.1. Установено е, че с увеличаване на натоварването коефициентът на триене на СКАМ ИПМ 304 и ИПМ 305 намалява нелинейно и достига стойности, характерни за течното триене, съответно 0,05 за ИПМ 304 и 0,08 за ИПМ 305. За калаен бронз БрО1Ф1 коефициентът на триене нараства и приема стойности от 0,26 до 0,37, характерни за сухото триене.

4.2. Установено е, че в стационарен режим на сухо триене на въздух, при малка скорост на плъзгане $v = 0,82$ m/s и натоварване $P = 12,5$ N ($p_a = 1$ MPa), износоустойчивостта на СКАМ е по-висока с два порядъка в сравнение с износоустойчивостта на калаен бронз БрО1Ф1 и зависи от пътя на триене, както следва: при $L = 110$ m ИПМ 304 има 47,6 пъти по-голяма износоустойчивост от БрО1Ф1, а ИПМ 305 – 102 пъти; при $L = 440$ m за ИПМ 304 – 42 пъти, а за ИПМ 305 – 31 пъти.

4.3. Доказано е, че в атмосферна среда при режим на сухо триене с четири пъти по-малка скорост на плъзгане $v = 0,22$ m/s и натоварване $P = 12,5$ N ($p_a = 1$ MPa) върху повърхнината на противотялото от стомана Р6М5 се формира и поддържа трансферен контактен слой с дебелина 25 μm , в чиито химичен състав се съдържат химичните елементи мед Cu и калай Sn.

5. Установени са експериментални зависимости за влиянието на натоварването и скоростта на плъзгане върху характеристиките на износването, контактната температура и вибрационната скорост в три трибосистеми със СКАМ ИПМ 304, ИПМ 305 и калаен бронз БрО1Ф1 в два режима на гранично триене – смазване с грес „Литол 24“ и смазване с грес „Литол 24“ + добавка 5% металоплакираща композиция АМК.

6. Доказан е ефект на триене без износване в трибосистеми със самосмазващи се композитни материали ИПМ 304 и ИПМ 305 при гранично триене с грес „Литол 24“ + добавка от 5% металоплакираща композиция АМК в условия на гранично триене, при високо натоварване, изменящо се в диапазона $57,1 \leq P \leq 167,1$ N ($4,6 \leq p_a \leq 13,5$ MPa), като е получен металоплакиращ филм върху противотялото с дебелина 3 μm .

7. Установено е, че при сухо абразивно триене с наличие на вибрации, насочени нормално на релативната скорост, износването зависи от големината на

вибрационната скорост, както и от химичния състав, и механичните характеристики на покритията, и материалите.

Приложни приноси

В инженерната практика

8. Установени са оптимални режими за функциониране на трибосистеми със СКМ ИПМ 304 и ИПМ 305 в екстремални условия на сухо триене в атмосферна среда ($p_a = 1 \text{ MPa}$, $v = 0,22 \text{ m/s}$) и на гранично триене ($p_a = 4,6 \text{ MPa}$, $v = 0,82 \text{ m/s}$), при които се постига изнosoустойчивост от 9,8 до 14,7 пъти по-висока от изнosoустойчивостта на калаен бронз БрО1Ф1. Получените резултати могат да се използват за разработване на опорни конструкции – плъзгащи лагери и сепаратори на търкалящи лагери.

В педагогическата практика

9. Разработени са два лабораторни стенда по кинематични схеми „Палец-диск“ и „Палец-цилиндър“ за изследване характеристиките на триенето и износването при високи скорости и наличие на вибрации в режими на сухо абразивно и гранично триене, които могат да се използват за обучение на редовни и задочни магистри от специалностите КПТМ и МТТ при МТФ – ТУ, София.

IV. СПИСЪК НА ОТПЕЧАТАНИ СТАТИИ, ВКЛЮЧЕНИ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Kandeva, M., **Tinka Grozdanova**, Effect of Vibration Velocity on the Wear Under Conditions of Abrasive Friction, Proceedings of 14th International Conference on Tribology SERBIATRIB '15, Belgrade, Serbia, 13-15 May 2015, p.p. 272-278.

2. **Грозданова, Т.**, Триене в контактна система „СКМ ИПМ 304 – стомана“ в условия на вакуум и въздушна среда, Трибологичен журнал БУЛТРИБ, Доклади от 11-та международна конференция по трибология BULTRIB '15, 11-13 Септември 2015, Созопол, България, Година V, Брой 05 (05), 2015, 260-267.

3. **Грозданова, Т.**, Триене в контактна система „СКМ ИПМ 305 – стомана“ в условия на вакуум и въздушна среда, Трибологичен журнал БУЛТРИБ, Доклади от 11-та международна конференция по трибология BULTRIB '15, 11-13 Септември 2015, Созопол, България, Година V, Брой 05 (05), 2015, 268-273.

4. Симеонова, Ю., Г. Сотиров, М. Аструкова, **Т. Грозданова**, Нови самосмазващи се антифрикционни материали за работа в екстремни условия, SENS 2009, Fifth Scientific Conference with International Participation, 2-4 Nov., 2009, Sofia, Bulgaria, Proceedings, 293.

5. Сименова, Ю., **Т. Грозданова**, Л. Динкова, Някои особености на процесите триене и износване във вакуум, Аеро-космически изследвания в България, БАН, кн. 15, София, 1999, 125-129.

Благодарности

Изказвам искрена благодарност на научния си ръководител доц. д-р инж. Мара Крумова Кандева - Иванова, на инж. Пламен Иванов и на ръководителя на катедра „Теория на механизмите и машините“ към МТФ доц. д.т.н. инж. Николай Николов за тяхното безрезервно съдействие и помощ при провеждане на експерименталните изследвания и оформянето на дисертацията.

Изказвам благодарност на семейството си за моралната подкрепа и разбиране, и особено на сина си Светлин Колев за закупуването на нов съвременен компютър, и помощта при техническото оформяне на дисертацията, с което направи възможно реализирането ѝ за по-кратко време.

CONTACT INTERACTIONS IN TRIBOSYSTEMS UNDER EXTREME CONDITIONS

Summary

A complex study is carried out about contact interactions in tribological systems containing composite materials and coatings, and operating under extreme conditions: dry friction in vacuum and air environment; dry and boundary friction in the presence of Litol 24 grease without and with 5% metalplating additive; dry friction on abrasive surface accompanied by normal to the contact surface vibrations.

Three groups of materials in tribosystems are investigated, namely self-lubricating antifrictional composite materials (SLACM) IPM 304 and IPM 305; cladded composite coatings, and spheroid graphite cast iron GJS 600-3 microalloyed by different content of tin (0.018, 0.02, 0.032 and 0.051%).

A new for tribology theoretical model is obtained on the reduced wear intensity in tribosystems with SLACM IPM 304 and IPM 305 under extreme dry friction regime.

It is established that the kinematic position of the specimen in a tribosystem with SLACM IPM 304 and IPM 305 affects the coefficient of friction and the wear under vacuum and in air atmosphere.

It is proved that after a given process of dry friction under vacuum and in atmosphere, a specific transfer film is obtained on the contact surfaces in tribosystems with SLACM IPM 304 and IPM 305 for particular friction characteristics. The same effect is observed under boundary friction conditions when the lubricant is Litol 24 grease without and with 5% of special metalplating additive.

In the case of dry friction on abrasive surface accompanied by normal to the relative velocity vibration, it is observed that the wear in tribosystems containing composite materials and coatings depends on the vibration speed value, whereas this relationship passes through a minimum value.

Optimal regimes of operation of tribosystems with SLACM IPM 304 and IPM 305 are established for the extreme conditions of dry friction in air atmosphere ($p_a = 1 \text{ MPa}$, $v = 0,22 \text{ m/s}$) and of boundary friction conditions ($p_a = 4,6 \text{ MPa}$, $v = 0,82 \text{ m/s}$), where the wearresistance is 9,8 to 14,7 times higher than the wearresistance of tin-bronze БрО1Ф1. The obtained results can be applied in the design and construction of bearing structures: sliding bearings and rolling bearings separators.

Two tribotester devices are developed and patterned according to the kinematic schemes "pin-on-disk" and "pin-on-cylinder". They are applied in the study of the friction and wear characteristics under dry abrasive and boundary conditions at high velocities and in presence of vibrations.