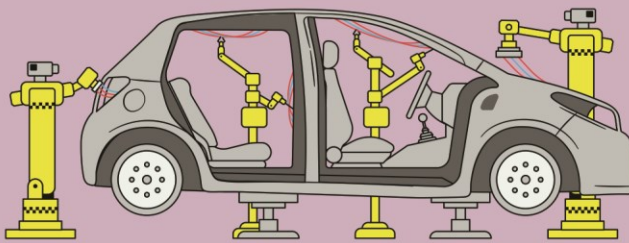


МЕТОДИ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ МАТЕРІАЛІВ



Лабораторний практикум з дисципліни
для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти
спеціальності G8 «Матеріалознавство»

Хмельницький національний університет

МЕТОДИ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ МАТЕРІАЛІВ

*Лабораторний практикум з дисципліни
для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти
спеціальності G8 «Матеріалознавство»*

*Затверджено на засіданні кафедри
трибології, автомобілів та матеріалознавства.
Протокол від 12.02.2026 № 6*

Хмельницький 2026

Методи трибологічних випробувань матеріалів : лабораторний практикум з дисципліни для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності G8 «Матеріалознавство» / О. М. Маковкін, М. О. Диха. Хмельницький : ХНУ, 2026. – 36 с.

Укладачі: Маковкін О. М., канд. техн. наук, доц.;
Диха М. О., канд. техн. наук, ст. викл.

Відповідальний за випуск: Диха О. В., д-р техн. наук, проф.

Випусковий редактор: Яремчук В. С.

Технічне редагування і верстка: Карпанасюк В. П.

Макетування здійснено редакційно-видавничим відділом Хмельницького національного університету (м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1). Підп. 30.04.26. Зам. № 36є/26, електронне видання, 2026.

© ХНУ, 2026

Вступ

Розвиток сучасного машинобудування, транспортної техніки та матеріалознавства супроводжується підвищенням вимог до надійності, довговічності та ефективності роботи вузлів тертя машин. Значна частина відмов деталей і механізмів пов'язана з процесами тертя та зношування поверхонь, що зумовлює необхідність використання науково-обґрунтованих методів дослідження трибологічних характеристик матеріалів. Експериментальні трибологічні випробування дозволяють оцінювати зносостійкість матеріалів, визначати механізми зношування, аналізувати вплив умов роботи на працездатність вузлів тертя та обґрунтовувати вибір матеріалів і технологій зміцнення поверхонь.

Метою дисципліни «Методи трибологічних випробувань матеріалів» є формування у здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності G8 «Матеріалознавство» системних знань, умінь і практичних навичок щодо сучасних методів експериментального дослідження процесів

тертя і зношування, принципів організації трибологічних випробувань, методів вимірювання характеристик зносу та обробки експериментальних результатів.

Завданням дисципліни є формування системи знань, умінь та навичок щодо застосування фізичних основ тертя і зношування для аналізу роботи вузлів машин; використання сучасних методів вимірювання коефіцієнта тертя та величини зносу; практичного застосування конструкцій машин тертя та методик проведення трибологічних випробувань; планування експериментальних досліджень і вибору оптимальних умов їх проведення; виконання статистичної обробки та інтерпретації результатів; визначення параметрів моделей зношування; оцінювання експлуатаційних властивостей матеріалів і покриттів у вузлах тертя; обґрунтування інженерних рішень щодо підвищення надійності, довговічності та ефективності роботи машин і механізмів.

Після завершення вивчення дисципліни здобувач повинен демонструвати поглиблені знання у сфері трибології, механізмів тертя і зношування матеріалів та визначати методи їх експериментального дослідження; планувати та проводити трибологічні експерименти з використанням сучасних машин тертя та вимірювального обладнання; застосовувати методи інженерного аналізу для оцінювання інтенсивності зношування матеріалів та експлуатаційних характеристик поверхонь тертя; обирати та обґрунтовувати методи трибологічних випробувань залежно від умов роботи вузлів тертя, властивостей матеріалів і типу контактної взаємодії; застосовувати методи статистичної обробки результатів експерименту, будувати математичні моделі процесів зношування та визначати їх параметри; використовувати сучасне лабораторне обладнання та програмне забезпечення для проведення трибологічних досліджень і аналізу отриманих результатів; узагальнювати результати експериментальних досліджень, формулювати висновки щодо працездатності матеріалів та рекомендації щодо їх застосування у вузлах тертя машин.

Захист лабораторної роботи проводиться під час наступного заняття у формі усного опитування, що забезпечує об'єктивне оцінювання рівня засвоєння навчального матеріалу та сформованих практичних навичок. Для самоперевірки до кожної роботи подано перелік контрольних питань. Здобувачі, які виконали всі лабораторні роботи та успішно їх захистили, допускаються до підсумкового семестрового контролю з дисципліни. У разі пропуску лабораторного заняття з поважної причини його необхідно відпрацювати у термін, визначений викладачем.

Розподіл балів за лабораторні роботи і критерії оцінювання визначаються робочою програмою дисципліни. Оцінювання результатів виконання та захисту лабораторної роботи здійснюється за стобальною системою відповідно до критеріїв, визначених у програмі дисципліни. До початку виконання лабораторних робіт здобувачі проходять інструктаж з охорони праці та техніки безпеки з обов'язковим підписом у відповідному журналі, що зберігається у відповідальній особи за лабораторію.

Лабораторна робота 1

Планування експерименту та прогнозування оптимальних параметрів трибологічних випробувань на основі програми «Statistica»

Мета: формування практичних навичок планування багатфакторного експерименту, статистичної обробки результатів трибологічних випробувань, побудови математичних моделей та прогнозування оптимальних параметрів процесів тертя і зношування з використанням програмного пакета *Statistica*.

Матеріали та інструменти: ПК з установленим програмним забезпеченням *Statistica*; експериментальні дані трибологічних випробувань (інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя тощо); методичні матеріали з планування експерименту; довідкові матеріали з теорії тертя та зношування.

Короткі теоретичні відомості та методичні рекомендації

Планування експерименту в межах цієї лабораторної роботи використовується як інструмент для встановлення кількісного впливу керованих факторів на показники тертя і зношування та подальшого визначення їх оптимальних значень. У роботі застосовується підхід DOE не як теоретична основа, а як практичний засіб побудови експериментальної матриці, отримання регресійної моделі та аналізу результатів у програмі *Statistica*.

При виконанні роботи необхідно виділити керовані фактори (наприклад, навантаження, швидкість ковзання, температура) та параметри відгуку (інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя). Рівні факторів задаються у межах, що відповідають умовам трибологічних випробувань, і використовуються для формування плану експерименту.

Для побудови плану в роботі можуть застосовуватись:

- повний факторний план типу 2^k , коли кожний фактор задається на двох рівнях і кількість дослідів визначається як $N = 2^k$;
- D-оптимальні плани, які використовуються для зменшення кількості експериментів при збереженні точності моделі;
- плани поверхні відгуку (RSM), що дозволяють враховувати нелінійність процесу та виконувати оптимізацію.

Обробка результатів експерименту виконується шляхом побудови регресійної моделі. У найпростішому випадку використовується лінійна залежність: $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$, а для більш точного опису процесу – квадратична модель: $y = b_0 + \sum b_{ix_i} + \sum b_{ij}x_ix_j + \sum b_{iix_i^2}$.

Отримані коефіцієнти моделі використовуються для оцінки впливу факторів та подальшого прогнозування поведінки трибосистеми.

Оцінка адекватності моделі виконується за результатами дисперсійного аналізу (ANOVA), де аналізуються значущість факторів та відповідність

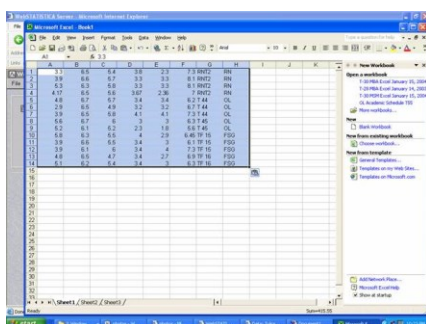
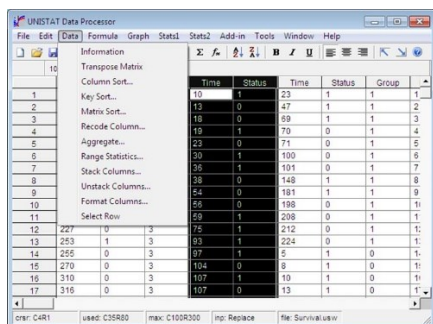
моделі експериментальним даним. У межах лабораторної роботи достатньо інтерпретувати p -значення та загальну адекватність моделі.

Завершальним етапом є визначення оптимальних параметрів процесу. Оптимізація виконується на основі отриманої регресійної моделі та графічного аналізу поверхні відгуку з урахуванням критерію мінімізації зношування або коефіцієнта тертя.

Порядок та зміст виконання

1. Запуск програми та створення нового проєкту.

Запустити програму Statistica через меню *Пуск* або ярлик на робочому столі. У головному вікні обрати: File → New → Spreadsheet. Відкриється електронна таблиця для введення експериментальних даних.



Кожний стовпчик таблиці відповідає окремому фактору або відгуку експерименту.

2. Формування структури експериментальних даних.

У першому рядку таблиці задати назви змінних: *Load* – навантаження, Н; *Speed* – швидкість ковзання, м/с; *Temperature* – температура, °С; *Wear* – інтенсивність зношування; *Friction* – коефіцієнт тертя. Далі ввести експериментальні значення або тестові дані.

Data: BankBreakdowns.sta (Zv by 1203c)							
Region	Product	Date	Gender	Age	Procedure	Period	
1 Bohemia without Prague	Overdrafts	12/10/2011	Females	60 years and more	other	4Q2011	
2 Moravia and Silesia	Overdrafts	1/30/2010	Males	60 years and more	other	1Q2010	
3 Prague	Overdrafts	9/19/2011	Males	40-59 years	other	3Q2011	
4 Bohemia with Prague							
5 Bohemia without Prague							
6 Prague							
7 Moravia and Silesia							
8 Moravia and Silesia							
9 Bohemia with Prague							
10 Bohemia without Prague	Loans						
11 Bohemia without Prague	Overdrafts						
12 Bohemia without Prague	Loans						
13 Bohemia without Prague	Overdrafts						
14 Moravia and Silesia	Loans						
15 Moravia and Silesia	Overdrafts						
other							
Total							

Data: STATISTICA Reporting Tables: BankBreakdowns							
Procedure	Product	Gender		Age			Total
		Females	Males	20-39 years	40-59 years	60 years and more	
		N	N	N	N	N	
ASM	Loans	60	103	163	47	65	51
	Overdrafts	42	63	105	36	34	35
	Total	102	166	268	83	99	86
BSM	Loans	84	115	199	57	80	62
	Overdrafts	53	91	144	44	36	144
	Total	137	206	343	101	114	98
other	Loans	128	220	348	94	152	102
	Overdrafts	102	142	244	82	86	76
	Total	230	362	592	176	238	178
Total		469	734	1203	360	451	362

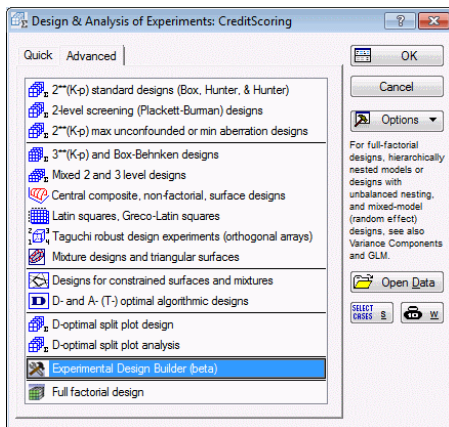
Назви змінних рекомендується задавати латиницею без пробілів.

3. Виклик модуля планування експерименту.

У головному меню обрати: Statistics → Industrial Statistics → Experimental Design (DOE). Відкриється вікно модулів планування експерименту.

4. Вибір типу плану експерименту.

Обрати тип плану залежно від задачі: Factorial Designs – повний або дробовий факторний план; Response Surface Designs – оптимізація та побудова поверхні відгуку. Натиснути ОК для переходу до налаштувань плану.



5. Задання факторів та їх рівнів.

Вказати кількість факторів (наприклад, 3). Для кожного фактора задати: мінімальний рівень; максимальний рівень; фізичний зміст параметра. Підтвердити введення параметрів.

Available Factorial Designs (with Resolution)															
		Factors													
Run	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
4	Full	III													
8		Full	IV	III	III	III									
16			Full	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III	
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
64					Full	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV	

Available Resolution III Plackett-Burman Designs					
Factors	Runs	Factors	Runs	Factors	Runs
2-7	12, 20, 24, 28, ..., 48	20-23	24, 28, 32, 36, ..., 48	36-39	40, 44, 48
8-11	12, 20, 24, 28, ..., 48	24-27	28, 32, 36, 40, 44, 48	40-43	44, 48
12-15	20, 24, 28, 36, ..., 48	28-31	32, 36, 40, 44, 48	44-47	48
16-19	20, 24, 28, 32, ..., 48	32-35	36, 40, 44, 48		

Рівні факторів повинні відповідати реальним умовам трибологічних випробувань.

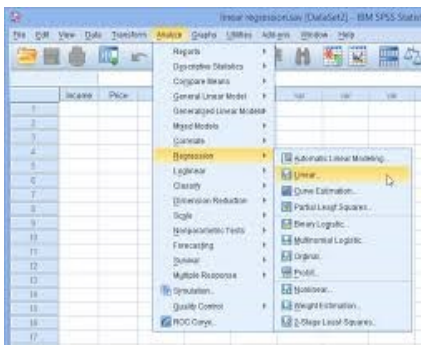
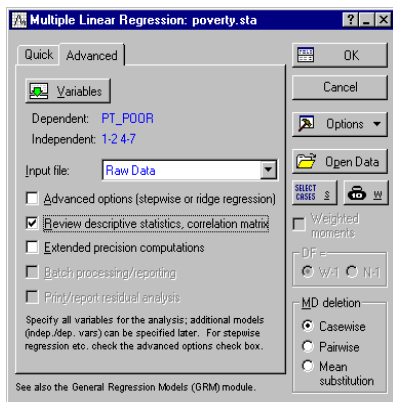
6. Генерація матриці плану експерименту.

Натиснути Generate Design. Програма автоматично сформує матрицю експерименту. Зберегти отриману таблицю.

Independent variables			
Temperature (°C)	Enzyme Concentration (%)	Incubation time (min)	Colour (% transmittance)
$X_1(x_1)$	$X_2(x_2)$	$X_3(x_3)$	y_3
)	0.01 (-1)	30 (-1)	93.234
)	0.01 (-1)	30 (-1)	94.894
)	0.1 (1)	30 (-1)	93.364
)	0.1 (1)	30 (-1)	94.024
)	0.01 (-1)	90 (1)	92.814
)	0.01 (-1)	90 (1)	92.654
)	0.1 (1)	90 (1)	94.084
)	0.1 (1)	90 (1)	92.954
)	0.055 (0)	60 (0)	95.084
)	0.055 (0)	60 (0)	93.084
)	-0.02 (-1.68)	60 (0)	94.294
)	0.13 (1.68)	60 (0)	94.364
)	0.055 (0)	9.54 (-1.68)	94.354
)	0.055 (0)	110.45 (1.68)	93.554
)	0.055 (0)	60 (0)	93.524
)	0.055 (0)	60 (0)	93.254
)	0.055 (0)	60 (0)	92.974
)	0.055 (0)	60 (0)	93.514
)	0.055 (0)	60 (0)	93.894
)	0.055 (0)	60 (0)	86.664

7. Регресійний аналіз результатів.

Обрати: Statistics → Multiple Regression. Вказати: залежну змінну (наприклад, *Wear*); незалежні змінні (фактори). Запустити обчислення.



. regress VO2max age weight heart_rate i.gender

Source	SS	df	MS
Model	4196.48274	4	1049.12069
Residual	3076.77786	95	32.3871353
Total	7273.2606	99	73.4672787

Number of obs = 100
F(4, 95) = 32.39
Prob > F = 0.0000
R-squared = 0.5770
Adj R-squared = 0.5592
Root MSE = 5.691

VO2max	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
age	-.1651375	.0627244	-2.63	0.010	-.2896612 -.0406138
weight	-.3845712	.0433226	-8.88	0.000	-.4705773 -.2985651
heart_rate	-.1179705	.0321695	-3.67	0.000	-.181835 -.0541061
gender					
Male	13.20788	1.344397	9.82	0.000	10.53892 15.87685
_cons	87.8303	6.384743	13.76	0.000	75.15498 100.5056

8. Дисперсійний аналіз (ANOVA).

У вікні результатів регресії обрати вкладку ANOVA. Проаналізувати: F-критерій; p-значення факторів. Визначити статистично значущі параметри.

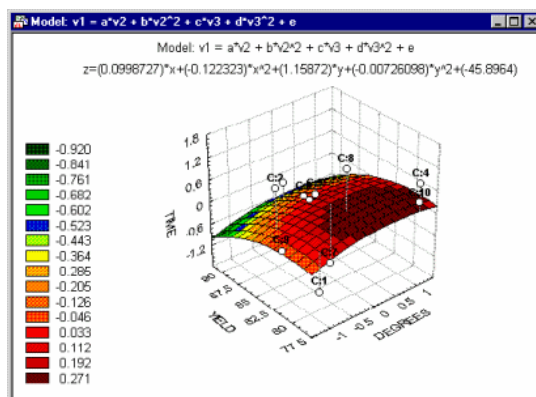
Data: Analysis of Variance (Adstudy)*

Analysis of Variance (Adstudy)
Marked effects are significant at p < .05000

Variable	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
MEASURE04	4.8534	3	1.61778	341.6266	46	7.426666	0.217834	0.883527
MEASURE05	56.9988	3	18.99958	282.9212	46	6.150462	3.089131	0.036198
MEASURE06	10.6218	3	3.54061	436.0982	46	9.480395	0.373467	0.772520
MEASURE07	52.0934	3	17.36445	253.1266	46	5.502753	3.155593	0.033560
MEASURE08	6.0745	3	2.02484	380.0055	46	8.260989	0.245108	0.864384
MEASURE09	103.7812	3	34.59372	350.9388	46	7.629105	4.534441	0.007238
MEASURE10	7.1295	3	2.37651	449.6905	46	9.775880	0.243099	0.865804
MEASURE11	25.6812	3	8.56040	307.7200	46	6.689561	1.000000	0.399670

9. Побудова поверхні відгуку.

Обрати: Graphs → Surface Plot. Вказати два фактори та один відгук. Побудувати тривимірну поверхню або ізолінії.



10. Оптимізація параметрів.

Використати модуль Response Optimizer. Задати критерій оптимізації: мінімум зношування; мінімум коефіцієнта тертя.

Отримати оптимальні значення факторів.

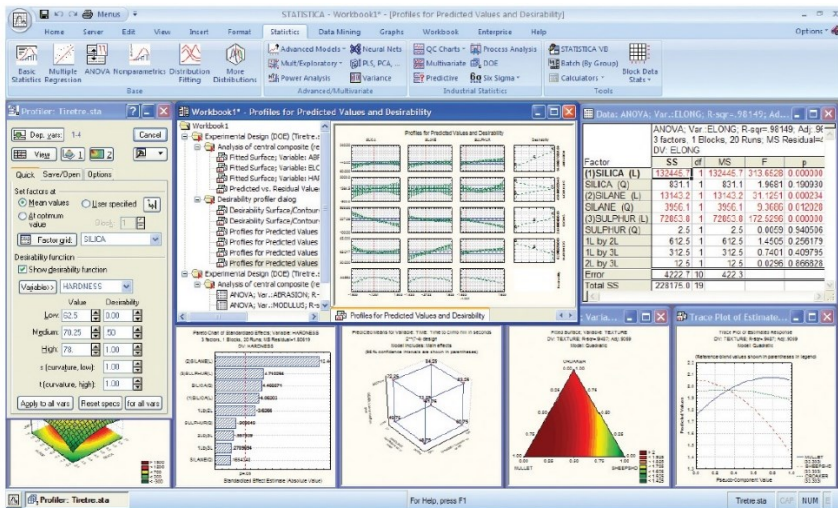


Figure 18 StatSoft's STATISTICA DOE module provides a host of interactive graphical output

11. Збереження та оформлення результатів.

Зберегти файл проєкту: File → Save As. Експортувати графіки та таблиці у ф. *.png*, *.jpg* або *.docx*. Використати результати для оформлення звіту.

Вимоги до оформлення та захисту звіту

Звіт має містити:

- мету роботи;
- вихідні дані та умови проведення експерименту;
- обґрунтування вибору факторів і параметрів відгуку;
- опис типу плану експерименту та матрицю планування;
- результати експериментальних досліджень;
- результати статистичної обробки даних у програмі Statistica (регресійний аналіз, дисперсійний аналіз (ANOVA));
- рівняння регресійної моделі;
- оцінку статистичної значущості факторів;
- перевірку адекватності моделі;
- висновки.

Захист звіту передбачає коротке усне пояснення виконаної роботи з обґрунтуванням вибору факторів, типу плану експерименту та отриманої регресійної моделі, інтерпретацією результатів статистичного аналізу та по-

ясненням отриманих оптимальних параметрів. Під час захисту здобувач повинен відповісти на контрольні питання та продемонструвати розуміння методики планування експерименту і обробки результатів.

Контрольні питання

1. У чому полягає сутність планування експерименту та які його основні завдання?
2. Які переваги використання методів планування експерименту порівняно з класичним підходом зміни одного фактора?
3. Що називають факторами експерименту та параметрами відгуку у трибологічних дослідженнях?
4. У чому полягає принцип побудови повного факторного плану типу 2^k ?
5. З якою метою застосовуються D-оптимальні плани експерименту?
6. Який загальний вигляд лінійної та квадратичної регресійної моделі?
7. Яке призначення дисперсійного аналізу (ANOVA) при обробці результатів експерименту?
8. Яким чином здійснюється оптимізація параметрів трибологічних випробувань на основі регресійної моделі?

Література: [1, с. 50–95; 2, с. 5–10]

Лабораторна робота 2

Вивчення конструкції та принципу роботи універсальної машини тертя УМТ-1

Мета: формування практичних навичок аналізу конструкції, принципу роботи та технічних можливостей універсальної машини тертя УМТ-1, а також проведення трибологічних випробувань матеріалів на тертя і зношування.

Матеріали та інструменти: універсальна машина тертя УМТ-1, дослідні зразки матеріалів, контртіло.

Короткі теоретичні відомості та методичні рекомендації

Процеси тертя і зношування визначаються властивостями матеріалів і станом контактуючих поверхонь. Найбільший вплив мають твердість, модуль пружності, адгезійні та теплофізичні властивості, а також шорсткість поверхні.

Твердість визначає опір зношуванню, модуль пружності – характер контактних деформацій, адгезія – схильність до схоплювання, а теплофізичні властивості – температурний режим у зоні контакту.

Дослідження тертя і зношування виконують поетапно: від визначення властивостей матеріалів до лабораторних і натурних випробувань. У цій ро-

боті реалізується лабораторний етап – випробування на машинах тертя з визначенням коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування залежно від навантаження, швидкості ковзання і умов змащування.

Машини тертя класифікують за:

- характером руху – обертального та зворотно-поступального;
- типом контакту – торцевого тертя та тертя по твірній.

Вибір схеми випробувань визначається умовами роботи вузла тертя та типом контактної взаємодії.

У цій роботі виконуються випробування на машинах тертя з визначенням коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування залежно від навантаження, швидкості ковзання та умов змащування. За результатами встановлюють залежності характеристик тертя і зношування від параметрів процесу.

Машини тертя поділяють за характером руху на установки обертального та зворотно-поступального типу (рис. 2.1).

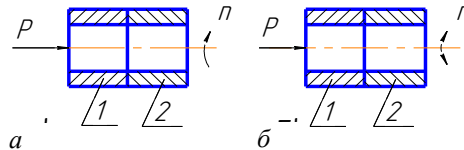


Рис. 2.1 – Схеми випробувань зразків на машинах обертального (а) та зворотно-поступального рухів (б):

1 – нерухомий зразок; 2 – зразок, що обертається (контртіло)

У межах кожного класу машини поділяють на дві групи: машини торцевого тертя і машини тертя по твірній (рис. 2.2).

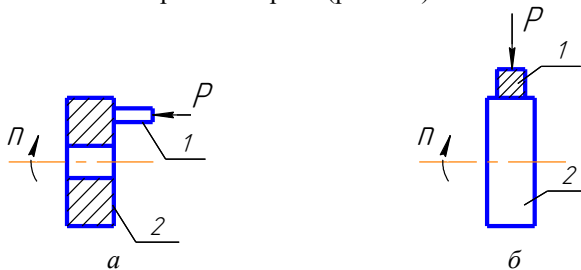


Рис. 2.2 – Схеми випробувань на машинах тертя (а – торцеве; б – по твірній):

1 – нерухомий зразок; 2 – зразок, що обертається (контртіло)

Машини тертя за коефіцієнтом взаємного перекриття контактуючих поверхонь поділяють на дві підгрупи з:

1) великим перекриттям (≈ 1) – забезпечують стабільний контакт і моделюють роботу реальних вузлів;

2) з малим перекриттям (≈ 0) – характеризуються локальним контактом і підвищеними напруженнями, що дозволяє досліджувати інтенсивне зношування.

У практиці застосовують різні типи машин тертя для моделювання умов роботи вузлів машин.

Універсальною лабораторною установкою є машина тертя УМТ-1, яка дозволяє реалізувати схеми: «диск–палець», «вал–втулка», «кільце–кільце» (обертальний рух) та «вал–втулка» (зворотно-поступальний рух), рис. 2.3.

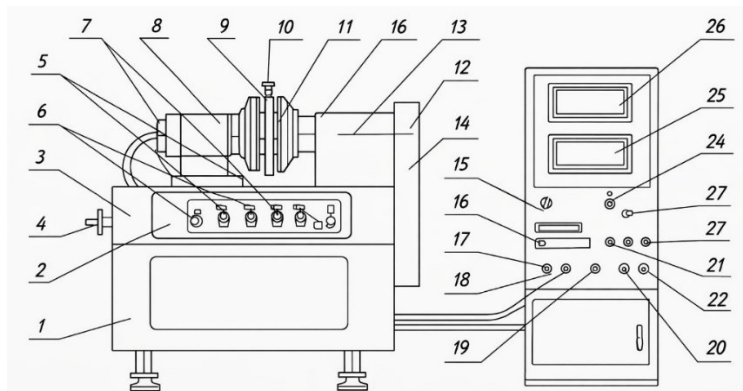


Рис. 2.3 – Загальний вигляд установки і пульта управління машини тертя УМТ-1

1 – опора віброізоляційна; 2 – станина; 3 – панель;

4 – маховик переміщення силовимірювача; 5 – редуктор; 6 – регулятори тиску;

7 – манометри; 8 – силовимірювач; 9 – гвинт кріплення зразка; 10 – зразок;

11 – контртіло; 12 – привод; 13 – кожух; 14 – лампа сигнальна;

15 – лічильник обертів; 16 – частотомір; 17 – регулятор швидкості «Грубо»;

18 – регулятор швидкості «Точно»; 19 – пакетний вимикач; 20 – кнопка «Пуск»;

21 – кнопка «Стоп»; 22 – установка нуля «Грубо»; 23 – установка нуля «Точно»;

24 – тумблер установки діапазону вимірювання моменту тертя;

25 – потенціометр реєстрації моменту тертя;

26 – потенціометр реєстрації температури

Кінематична схема машини тертя УМТ-1 наведена на рис. 2.4.

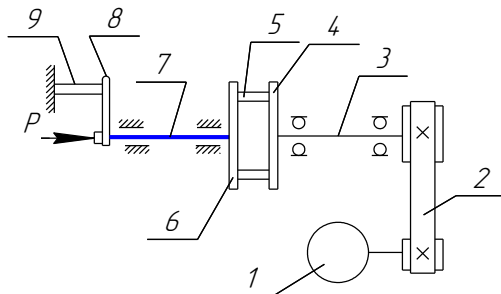


Рис. 2.4 – Кінематична схема машини тертя УМТ-1

**1 – електродвигун; 2 – клинопасова передача; 3 – шпindel; 4 – контртіло;
5 – зразок; 6 – тримач зразка; 7 – шток; 8 – важіль; 9 – пружний елемент**

Принцип роботи полягає в обертанні контртіла та притисканні до нього зразка із заданим навантаженням, у результаті чого в зоні контакту виникають сили тертя та процеси зношування.

У процесі випробувань регулюють навантаження, швидкість ковзання, тривалість та умови змащування, що дозволяє визначити їх вплив на коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування.

Навантаження на зразок створюється через шток за допомогою динамометра або системи подачі стисненого газу, що забезпечує точне регулювання та підтримання притискної сили. Переміщення штока у вертикальному напрямку компенсує зношування, завдяки чому навантаження під час експерименту залишається практично сталим.

Сила тертя, що виникає в зоні контакту, створює момент на вимірному важелі, викликаючи деформацію пружного елемента. Ця деформація перетворюється диференціальним датчиком в електричний сигнал, який реєструється потенціометром.

Така система дозволяє точно визначати силу тертя та аналізувати процеси трибологічної взаємодії матеріалів у різних режимах навантаження і швидкості ковзання.

Випробувальна установка УМТ-1 складається зі станини, встановленої на віброізоляційних опорах, що зменшують вплив вібрацій і підвищують точність вимірювань. У станині розміщено електродвигун привода та панель із редукторами, регуляторами і манометрами для створення та контролю навантаження за допомогою системи стисненого газу.

На станині встановлені силовимірювач і привод із тримачем зразка, що забезпечує його надійне закріплення та точне позиціонування відносно контртіла. Обертання контртіла здійснюється через клинопасову передачу, закриту захисним кожухом.

Керування установкою здійснюється з пульта: запуск – кнопкою «Пуск», регулювання швидкості – регуляторами «Грубо» і «Точно», контроль – за допомогою частотоміра та лічильника обертів.

Вимірювання параметрів процесу здійснюється потенціометрами: температури в зоні контакту та моменту сили тертя з можливістю перемикання діапазонів вимірювання.

Порядок та зміст виконання

1. Відкрити кожух привода та встановити паси клинопасової передачі у положення, що відповідає заданому передавальному відношенню та необхідному діапазону частоти обертання шпинделя.

2. Встановити рукоятки регуляторів швидкості «Грубо» і «Точно», розташовані на пульті управління, у крайнє положення, обертаючи їх у напрямі, протилежному руху годинникової стрілки.

3. Встановити тумблер перемикання діапазону вимірювання моменту тертя у положення, що відповідає умовам експерименту за даними таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати випробувань

Матеріал пари тертя	Маса або розмір		Шлях тертя, м	Величина зносу	Температура T , °C
	до випробувань	після випробувань			
1	2	3	4	5	6

4. Увімкнути електродвигун машини натисканням кнопки «Пуск» на пульті управління та встановити необхідну частоту обертання контртіла за показаннями приладу, обертаючи рукоятки регуляторів «Грубо» та «Точно» у напрямі за ходом годинникової стрілки.

5. Визначити початкові параметри досліджуваних зразків (геометричні розміри або масу), після чого встановити зразки у тримач (диск) та надійно їх закріпити.

6. Увімкнути машину тертя, перевірити правильність роботи установки на холостому ході та створити навантаження у парі тертя до початкової величини P шляхом подачі стисненого повітря в камеру 10 з подальшим поступовим збільшенням до максимального значення $P_{\max}$.

7. Зафіксувати після проходження визначеного шляху тертя (періоду припрацювання) показання моменту сили тертя та температури у зоні контакту, після чого відвести диск від контртіла та зупинити машину тертя.

8. Промити після завершення випробування зразки в бензині, висушити їх та визначити величину зношування лінійним або масовим методом.

Отримані результати вимірювань і розрахунків занести до таблиці 2.1.

Вимоги до оформлення та захисту звіту

Звіт має містити:

- тему і мету лабораторної роботи;
- призначення, будову та технічні можливості універсальної машини тертя УМТ-1;
- основні параметри та режими проведення трибологічних випробувань;
- порядок проведення експерименту на машині тертя УМТ-1;
- вихідні дані дослідження;
- результати експериментальних вимірювань у табличному вигляді (табл. 2.1);
- аналіз отриманих результатів;
- висновки за результатами лабораторної роботи.

Захист звіту передбачає коротке усне пояснення методики проведення випробувань на чотирикульковій машині тертя, обґрунтування вибору режимів навантаження та швидкості ковзання, а також інтерпретацію отриманих експериментальних результатів. Здобувач повинен пояснити побудовані графічні залежності, результати апроксимації експериментальних даних та визначені параметри моделі зношування, а також оцінити вплив мастильних матеріалів на інтенсивність зношування. Під час захисту необхідно продемонструвати розуміння застосованої моделі та відповісти на контрольні питання.

Контрольні питання

1. Яке призначення універсальної машини тертя УМТ-1 та для яких трибологічних досліджень вона застосовується?
2. Які основні вузли входять до конструкції машини тертя УМТ-1?
3. У чому полягає принцип роботи машини тертя УМТ-1?
4. Які схеми випробувань можуть бути реалізовані на машині УМТ-1?
5. Які основні параметри процесу тертя можна змінювати під час проведення випробувань на машині УМТ-1?
6. Яким чином у машині УМТ-1 створюється та регулюється навантаження у зоні контакту зразків?
7. Які основні характеристики процесу тертя та зношування визначають під час випробувань на машинах тертя?

Література: [3, с. 10–18; 11, с. 7–9]

Лабораторна робота 3

Визначення інтенсивності зношування металевих зразків під час випробувань на універсальній машині тертя УМТ-1

Мета: формування практичних навичок експериментального визначення та розрахунку інтенсивності зношування металевих зразків під час випробувань на універсальній машині тертя УМТ-1.

Прилади та обладнання: універсальна машина тертя УМТ-1, аналітичні ваги, штангенциркуль, лінійка, металеві зразки.

Короткі теоретичні відомості та методичні рекомендації

Під час роботи машин поверхні деталей, що контактують, піддаються тертю, внаслідок чого відбувається їх зношування – поступова зміна розмірів, форми та властивостей поверхневих шарів.

Зношування – процес руйнування або відокремлення матеріалу під час тертя. **Знос** – результат зношування, який оцінюється зміною розмірів

(лінійний), об'єму або маси. **Інтенсивність зношування** характеризує швидкість руйнування матеріалу і визначається відношенням величини зносу до шляху тертя або часу.

Інтенсивність зношування залежить від навантаження, швидкості ковзання, властивостей матеріалів, умов змащування та середовища.

У процесі тертя відбуваються зміни структури поверхневих шарів, найбільш інтенсивні на стадії припрацювання. Поряд із зношуванням можуть виникати процеси **пошкоджуваності**, що супроводжуються різкими змінами стану поверхні.

Класифікація видів зношування (за Б. І. Костецьким) базується на аналізі механізмів руйнування, умов тертя та їх розвитку в часі.

Для дослідження процесів тертя і зношування застосовується машина тертя УМТ-1, яка дозволяє змінювати навантаження та швидкість ковзання і визначати коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування.

Інтенсивність лінійного зношування визначається як відношення товщини зношеного шару до шляху тертя.

$$I_h = \frac{\Delta h}{L_T}. \quad (3.1)$$

Якщо зношування оцінюють за зміною маси Δm або об'єму тіла ΔV , то масова і об'ємна інтенсивність зношування розраховуються за відповідними формулами:

$$I_m = \frac{\Delta m}{L_T}, \quad (3.2)$$

$$I_v = \frac{\Delta V}{L_T}. \quad (3.3)$$

Формулами (3.2) і (3.3) доцільно користуватись тоді, коли площа тертя у процесі спрацювання залишається незмінною, наприклад, на ділянці стаціонарного зносу. Між інтенсивністю лінійного, об'ємного і масового зношування є взаємозв'язок:

$$I_h = \frac{I_v}{A_T} = \frac{I_m}{\rho \cdot A_T}, \quad (3.4)$$

де A_T – площа поверхні елемента, який зношується; ρ – густина матеріалу.

Таким чином інтенсивність лінійного зношування також може бути визначена за зміною маси або об'єму елемента пари тертя:

$$I_h = \frac{\Delta V}{L_T \cdot A_T}, \quad (3.5)$$

$$I_h = \frac{\Delta M}{\rho \cdot L_T \cdot A_T}. \quad (3.6)$$

Усі три формули дозволяють різними методами визначити одну величину – інтенсивність лінійного зношування. Інтенсивність лінійного зношування I_h – величина безрозмірна, її числове значення не залежить від вибору системи одиниць і може змінюватись у широких межах від 10^{-3} до 10^{-13} .

Якщо взяти похідну за часом від абсолютного лінійного зносу, знайдемо швидкість зношування:

$$\frac{d}{dt} \Delta h = \frac{dI_h}{dt} L_T + I_h \cdot V, \quad (3.7)$$

де $V = \frac{dL}{dt}$ – швидкість відносного руху деталей, які труться.

Формула (3.7) свідчить, що інтенсивність зношування матеріалу може змінюватись з часом. Зносостійкість матеріалу оцінюють величиною, яка є зворотною до інтенсивності або швидкості зношування.

Основним робочим органом тертя установки УМТ-1 (рис. 3.1) є диск, який обертається з постійною швидкістю.

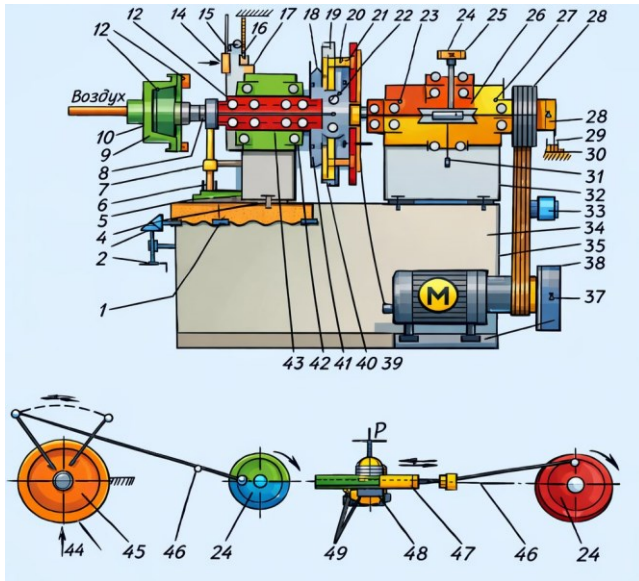


Рис. 3.1 – Кінематична схема машини УМТ-1 з рухом:

a – коливальним; *б* – зворотно-поступальним

1 – передача «гвинт-гайка»; 2 – маховик; 3 – редуктор; 4 – затискач;
5 – вимірювач сили; 6 – датчик; 7 – важіль; 8 – опора; 9 – мембрана;

10 – камера пневматична; 11, 12 – шток; 13 – підшипник; 14 – двигун; 15 – важіль;
 16 – елемент пружний; 17 – датчик перенавантаження; 18 – стрічка; 19 – диск;
 20 – зразок «палець»; 21 – зразок «диск»; 22 – підшипник сферичний;
 23, 23 – підшипник; 24 – кривошип; 26 – передача черв'ячна; 27 – шпindelь;
 28, 37 – шків; 29 – прапорець; 30 – датчик циклів; 31 – вал; 32 – привод;
 33 – датчик діапазонів; 34 – станина; 35 – клинопасова передача;
 36 – електродвигун; 38 – вісь; 39, 40 – диск; 41 – фланець; 42 – підшипник;
 43 – вал пустотілий; 44 – зразок «втулка»; 45 – зразок «вал»; 46 – шатун;
 47 – зразок «стрижень»; 48 – скоба; 49 – зразок «палець»

Порядок та зміст виконання

1. Визначити вихідні розміри або масу зразків для випробувань на знос. Встановити зразки в диск, закріпити їх і включити машину тертя.
 2. Прикласти на пари тертя вихідне навантаження P , шляхом подачі стисненого повітря у камеру 10. Включити машину тертя і поступово довести навантаження до величини $P_{\max}$.
 3. Після проходження визначеного шляху тертя зняти промити зразки в бензині, висушити їх і визначити величину зносу лінійним та масовим методом.
 4. Розрахувати за формулами (3.1) та (3.2) масову та лінійну інтенсивність зношування.
 5. Побудувати експериментальні залежності масової лінійної інтенсивності зношування від номінального тиску. Порівняти отримані результати.
- Дані випробувань занести в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати випробувань

Матеріал пари тертя	Маса або розмір				Шлях тертя, м	Інтенсивність зносу	
	до випробувань		після випробувань			Зразок 1	Зразок 2
	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 1	Зразок 2			
1	2	3	4	5	6	7	8

Вимоги до оформлення та захисту звіту

- Звіт має містити:
- тему і мету лабораторної роботи;
 - основні визначення понять «зношування», «знос», «пошкоджувальність» і «пошкодження» (1–3 речення);
 - формули для розрахунку лінійної, масової та об'ємної інтенсивності зношування (формули 3.1–3.6);
 - взаємозв'язок між лінійною, масовою та об'ємною інтенсивністю зношування;
 - вихідні дані експерименту;
 - порядок проведення випробувань на знос на універсальній машині тертя УМТ-1;

- результати експериментальних вимірювань у табличному вигляді (табл. 3.1);
- розрахунок лінійної та масової інтенсивності зношування зразків;
- графічні залежності масової та лінійної інтенсивності зношування від номінального тиску;
- порівняльний аналіз отриманих результатів;
- висновки за результатами лабораторної роботи.

Захист звіту передбачає коротке усне пояснення методики проведення випробувань на чотирикульковій машині тертя, обґрунтування вибору режимів навантаження та швидкості ковзання, а також інтерпретацію отриманих експериментальних результатів. Здобувач повинен пояснити побудовані графічні залежності, результати апроксимації експериментальних даних та визначені параметри моделі зношування, а також оцінити вплив мастильних матеріалів на інтенсивність зношування. Під час захисту необхідно продемонструвати розуміння застосованої моделі та відповісти на контрольні питання.

Контрольні питання

1. Що таке інтенсивність зношування?
2. Як визначається швидкість зношування?
3. Як визначається інтенсивність лінійного зношування?
4. Як визначається масова інтенсивність зношування?
5. Як визначається об'ємна інтенсивність зношування?
6. Взаємозв'язок лінійної, масової та об'ємної інтенсивності зношування.
7. Якими параметрами характеризується знос?
8. Як експериментально визначити інтенсивність зношування на установці УМТ-1?

Література: [3, с. 10–18; 11, с. 7–9]

Лабораторна робота 4

Теорія і практика лабораторних випробувань на чотирикульковій машині тертя

Мета: формування практичних навичок проведення лабораторних випробувань змащених поверхонь тертя на чотирикульковій машині, визначення параметрів двофакторної моделі зношування та аналізу впливу навантаження і швидкості ковзання на інтенсивність зношування матеріалів.

Матеріали та інструменти. Чотирикулькова машина тертя (експериментальна установка на базі свердильного верстата) з електродвигуном постійного струму типу П22У4 та блоком живлення з випрямлячем і автотрансформатором, комплект сталевих кульок діаметром 12,7 мм, мастильні матеріали М20 (без присадок) та М63/12–Г1 (з композицією присадок), система

навантаження з важільним механізмом і комплектом вантажів, мікроскоп МПБ-2 для вимірювання діаметра плям зношування, оптичний окуляр для проміжних вимірювань, комп'ютер з програмою Microsoft Excel для обробки експериментальних результатів та побудови графічних залежностей.

Короткі теоретичні відомості та методичні рекомендації

Лабораторна установка для дослідження зношування матеріалів за чотирикульковою схемою (рис. 4.1) використовується для проведення експериментальних випробувань з метою визначення інтенсивності зношування та параметрів моделі зношування. Обертання верхньої кульки 1 забезпечується приводом шпинделя, що дозволяє реалізувати необхідну швидкість ковзання.

У процесі виконання роботи верхня кулька 1 встановлюється у шпинделі, а три нижні кульки 2 розміщуються в опорному вузлі 4 та фіксуються гайкою 3 (рис. 4.1). Така схема формує чотирикульковий контакт, у якому реалізуються умови тертя та зношування.

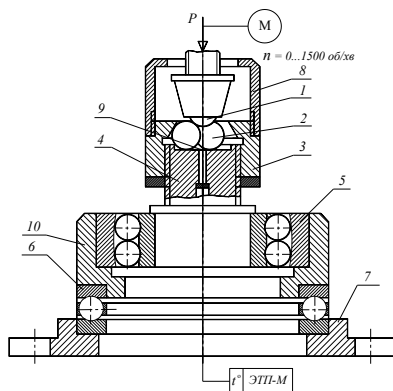
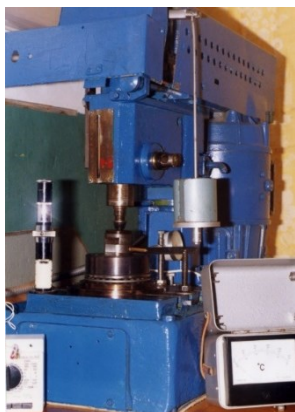


Рис. 4.1 – Загальний вигляд експериментальної установки і схема робочого вузла

Самовстановлення контактуючих тіл забезпечується підшипниковим вузлом 5, а передача та сприйняття навантаження здійснюється через упорний підшипник 6 та основу 7 (див. рис. 4.1). Навантаження на контакт створюється важільним механізмом і передається на верхню кульку

Під час випробувань визначаються розміри плям зношування на нижніх кульках 2. Після завершення експерименту верхню кульку 1 відводять, а вимірювання виконують за допомогою оптичного мікроскопа, встановленого на вимірювальній поверхні вузла кріплення (гайки 3, рис. 4.1). Отримані результати використовуються для подальшої обробки та визначення параметрів моделі зношування.

Для прогнозування пропонується використовувати модель у вигляді залежності інтенсивності зношування від двох безрозмірних параметрів:

навантаження $W = \frac{\sigma}{E^*}$ і швидкості ковзання $U = \frac{V \cdot R^*}{v}$.

$$\frac{du_w}{ds} = K_w W^m U, \quad (4.1)$$

де σ – тиск в контакті, МПа; E^* – приведений модуль пружності матеріалів контактуючих тіл, МПа; V – швидкість ковзання, м/с; R^* – приведений радіус контактуючих тіл, м: $R^* = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$; v – кінематична в'язкість мастильного матеріалу (при 100 °C), м²/с; u_w – лінійний знос тіл, м; S – шлях тертя для тіла, що зношується, м; K_w , m – параметри закономірності зношування.

Розрахункова схема випробувань показана на рис. 4.2.

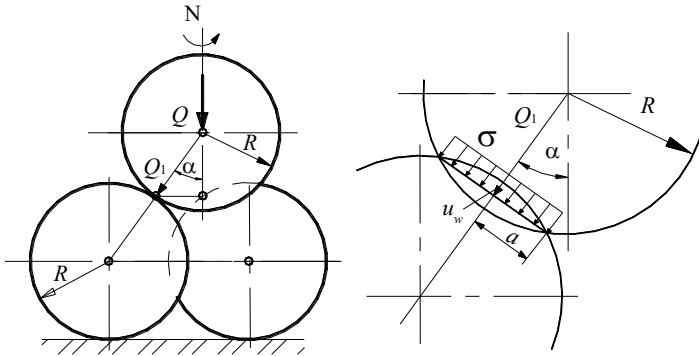


Рис. 4.2 – Геометрія контакту при випробуваннях за чотирикульковою схемою

Приймаючи припущення про рівномірний розподіл контактного тиску по площадці контакту маємо: $\sigma = \frac{Q_1}{\pi a^2}$, де Q_1 – сила, що діє по нормалі до кожної нижньої кульки; a – радіус кругової площадки контакту спряжених кульок.

Сила Q_1 виражається через загальну силу Q , що діє на верхню кульку: $Q_1 = 0,4082Q$.

З геометричної схеми максимальний знос в контактi кульок визначається : $u_w(S) = \frac{a(S)^2}{2R}$.

Експериментальна залежність радіусу кругової площадки контакту від шляху тертя представляється у вигляді степеневої апроксимації:

$$a(S) = cS^\beta, \quad (4.2)$$

де c , β – параметри апроксимації, які визначаються за наслідками випробувань на чотирикульковій машині тертя.

Після інтегрування виразу (4.1) і підстановки (4.2) отримаємо рівняння для визначення параметрів зношування:

$$\frac{c^2 S^{2\beta}}{2R} = K_w \left(\frac{Q_1}{c^2 \pi E^*} \right)^m \left(\frac{VR^*}{v} \right) \frac{S^{1-2\beta m}}{1-2\beta m}. \quad (4.3)$$

З умови виконуваності рівняння (4.3) за будь-яких S випливає: $2\beta = 1 - 2\beta m$, звідки:

$$m = \frac{1-2\beta}{2\beta}. \quad (4.4)$$

Для знаходження коефіцієнта K_w використовується вираз:

$$K_w = \frac{\beta c^{2m+2}}{R} \left(\frac{\pi E^*}{Q_1} \right)^m \left(\frac{v}{VR^*} \right). \quad (4.5)$$

Порядок та зміст виконання

1. Ознайомитись з методичними вказівками до лабораторної роботи, принципом дії чотирикулькової машини тертя та методикою визначення інтенсивності зношування матеріалів у присутності мастильних матеріалів.

2. Підготувати експериментальну установку до роботи: перевірити справність вузлів машини тертя, очистити контактні поверхні, встановити комплект сталевих кульок діаметром 12,7 мм у робочий вузол та закріпити їх відповідно до конструкції установки.

3. Підготувати досліджувані мастильні матеріали (М20 та М63/12–Г1), нанести мастильний матеріал у зону контакту кульок та встановити необхідне навантаження на верхню кульку за допомогою важільної системи і набору вантажів.

4. Налаштувати режим роботи установки: встановити частоту обертання шпинделя 200 об/хв, що відповідає швидкості ковзання 0,077 м/с, та переконатися у стабільності роботи установки.

5. Провести випробування упродовж заданого часу. Через кожні 20 хв зупиняти установку, відводити верхню кульку та вимірювати оптичним мікроскопом діаметр плями зношування на нижніх кульках. Для кожного вимірювання визначати середньоарифметичне значення з трьох результатів (для трьох кульок). Отримані експериментальні дані занести до таблиці залежності розміру площадки зношування від тривалості випробувань.

Таблиця 4.1 – Залежність розмірів площадки зношування від тривалості випробувань

Час випробувань	20 хв	40 хв	60 хв	80 хв	150 хв	180 хв
Площадка зношування <i>a</i> , мм						

6. Побудувати графік залежності площі зношування від часу випробувань із використанням програмного забезпечення Microsoft Excel та виконати степеневу апроксимацію експериментальної залежності (рис. 4.3). За результатами апроксимації визначити параметри відповідної функціональної залежності (табл. 4.2).

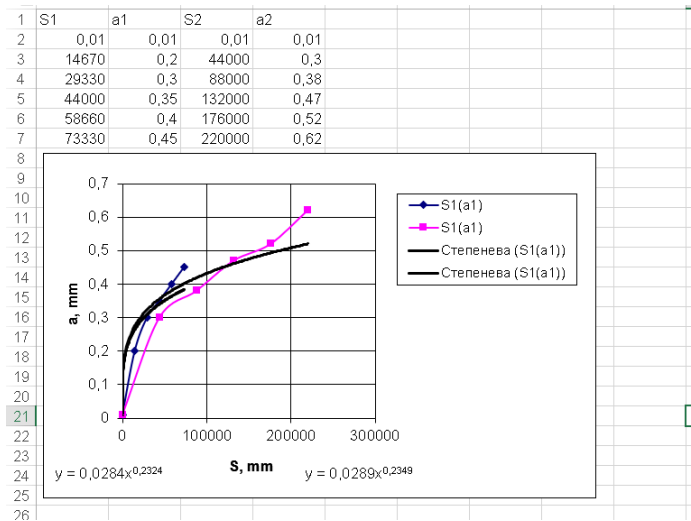


Рис. 4.3– Приклад обробки результатів випробувань за допомогою програми Microsoft Excel

Таблиця 4.2 – Параметри апроксимуючої залежності

Тип масла	M20	M63/12–Г ₁
<i>c</i> , мм ^{1–β}		

β		
---------	--	--

7. Використовуючи отримані експериментальні дані та аналітичні залежності моделі зношування (4.4–4.5), розрахувати параметри двофакторної моделі зношування та занести результати розрахунків у відповідну таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Параметри моделі зношування

Тип масла	M20	M63/12–Г ₁
m		
K_w		

8. Проаналізувати отримані результати, порівняти вплив різних мастильних матеріалів на інтенсивність зношування та сформулювати висновки за результатами виконаної лабораторної роботи.

Вимоги до оформлення та захисту звіту

Звіт має містити:

- тему та мету лабораторної роботи;
- короткі теоретичні відомості щодо процесів тертя і зношування та методів їх дослідження;
- опис експериментальної установки (чотирикулькової машини тертя) та її основних елементів;
- характеристику використаного обладнання та матеріалів (тип машини, кульки, мастильні матеріали, система навантаження, вимірювальні прилади);
- опис принципу роботи установки та методики проведення випробувань;
- вихідні дані експерименту;
- результати експериментальних вимірювань;
- обробку результатів (у програмі Microsoft Excel), побудову графічних залежностей;
- аналіз отриманих результатів;
- відповіді на контрольні питання;
- висновки за результатами лабораторної роботи.

Захист звіту передбачає коротке усне пояснення методики проведення випробувань на чотирикульковій машині тертя, обґрунтування вибору режимів навантаження та швидкості ковзання, а також інтерпретацію отриманих експериментальних результатів. Здобувач повинен пояснити побудовані графічні залежності, результати апроксимації експериментальних даних та визначені параметри моделі зношування, а також оцінити вплив мастильних матеріалів на інтенсивність зношування. Під час захисту необхідно продемонструвати розуміння застосованої моделі та відповісти на контрольні питання.

Контрольні питання

1. У чому полягає принцип методу випробувань на чотирикульковій машині тертя?
2. Яка схема контакту тіл реалізується у чотирикульковій машині тертя?
3. Які параметри характеризують інтенсивність зношування у двофакторній моделі зношування?
4. Як визначається діаметр плями зношування на нижніх кульках?
5. Який вплив мають навантаження та швидкість ковзання на інтенсивність зношування?
6. З якою метою використовується степенева апроксимація залежності розміру площадки зношування від шляху тертя?
7. Які експлуатаційні властивості мастильних матеріалів можна оцінити за результатами випробувань на чотирикульковій машині тертя?

Література: [3, с. 10–18, 6, с. 153–159, 7, с. 27–38]

Лабораторна робота 5

Визначення закономірностей зношування матеріалів за схемою випробувань на знос «кулька-циліндр»

Мета: формування практичних навичок проведення трибологічних випробувань матеріалів за схемою контакту «кулька-циліндр», дослідження процесу зношування поверхні циліндричного зразка при ковзанні сталевій кульки, визначення параметрів моделі зношування та аналізу впливу швидкості ковзання і контактного навантаження на інтенсивність зношування.

Матеріали та інструменти. Лабораторна установка для трибологічних випробувань за схемою «кулька-циліндр», електропривод з регулюванням швидкості обертання, шпindelна головка з тахометром, пристрій для закріплення зразка і вимірювання сили тертя, механізм створення регульованого контактного навантаження, каретка поздовжнього переміщення зразка, мікроскоп для вимірювання розмірів площадки контакту, випробувальні циліндричні зразки досліджуваних матеріалів, сталева кулька з підшипникової сталі ШХ15, мастильна олива (наприклад Castrol 10W-40), персональний комп'ютер з програмою Microsoft Excel для обробки результатів експерименту.

Короткі теоретичні відомості та методичні рекомендації

Метод трибологічних випробувань за схемою «кулька-циліндр» у межах даної лабораторної роботи використовується для експериментального визначення інтенсивності зношування матеріалів та оцінки впливу режимів тертя на їх зносостійкість. У дослідженні циліндричний зразок виготовляється з досліджуваного матеріалу, а як контртіло використовується сталева кулька з високою твердістю.

Випробування проводяться на лабораторній установці, схема та загальний вигляд якої наведені на рис. 5.1.

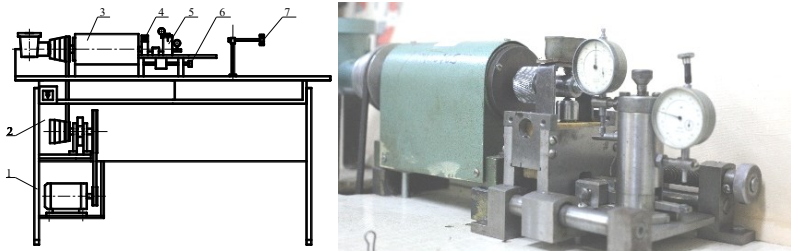


Рис. 5.1 – Схема і загальний вигляд установки для випробування на знос:

- 1 – лабораторний стіл; 2 – багатоступеневий електропривод;**
- 3 – шпиндельна головка з тахометром;**
- 4 – пристрій для закріплення зразка і вимірювання сили тертя;**
- 5 – пристрій для створення регульованого контактного тиску;**
- 6 – каретка поздовжнього переміщення зразка;**
- 7 – мікроскоп для вимірювання розмірів площадки контакту**

Установка включає електропривод 2, шпиндельну головку з тахометром 3, вузол закріплення зразка і вимірювання сили тертя 4, механізм створення навантаження 5, картку переміщення зразка 6 та мікроскоп 7 для контролю розмірів зони контакту.

Під час виконання роботи циліндричний зразок, встановлений у шпинделі 3, обертається, а кулька притискається до його поверхні через механізм навантаження 5 (див. рис. 5.1). У зоні контакту формується жолоб зношування, параметри якого визначаються експериментально за допомогою мікроскопа 7 та використовуються для розрахунку інтенсивності зношування.

Електропривод установки забезпечує обертання шпинделя 1, у якому закріплюється випробувальний зразок. Частота обертання контролюється тахометром, що дозволяє задавати необхідну швидкість ковзання. Контакт між кулькою та поверхнею циліндричного зразка створюється через механізм навантаження 17, який забезпечує прикладання заданої сили.

Робоча зона установки наведена на рис. 5.2.

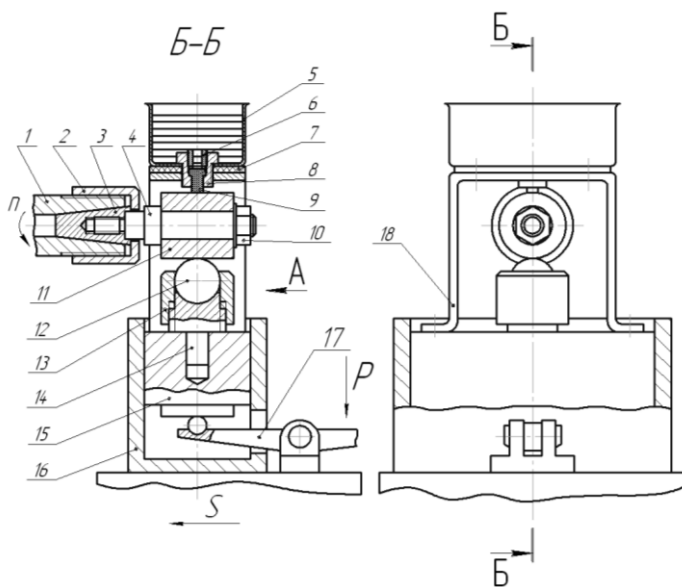


Рис. 5.2 – Схема трибологічних випробувань «циліндр-кулька»:
1 – шпиндель; 2 – гайка; 3 – хвостовик; 4 – оправка; 5 – ванна; 6 – пробка;
7 – гумова прокладка; 8 – ливникова втулка; 9 – фетрове осердя; 10 – гайка;
11 – випробувальний зразок; 12 – сталевая кулька; 13 – наконечник;
14 – упорний стрижень; 15 – повзун; 16 – корпус; 17 – важіль; 18 – кронштейн.

Випробувальний зразок 11 встановлюється на оправці 4 та фіксується гайкою 10. Оправка через хвостовик 3 закріплюється у шпинделі 1 за допомогою накидної гайки 2. Контртіло – сталевая кулька 12 – встановлюється у наконечнику 13 та притискається до поверхні зразка через упорний стрижень 14, повзун 15 і важіль навантаження 17.

Механізм навантаження змонтований у корпусі 16, який встановлений на каретці поздовжнього переміщення 6 (рис. 5.2), що забезпечує необхідне положення зони контакту під час випробувань. Подача мастильного матеріалу в зону тертя здійснюється через систему змащування, яка включає ванну 5, ливникову втулку 8 та фетрове осердя 9, що забезпечує рівномірне змочування поверхонь. Герметичність з'єднання забезпечується прокладкою.

Змащування зони тертя здійснюється за рахунок ковзання змоченого мастильною оливою фетрового осердя по сліду рухомого контакту кульки з поверхнею зразка, що забезпечує стабільні умови тертя під час проведення випробувань.

Теорія методу трибологічних випробувань матеріалів з схемою «кулька-циліндр».

Теоретична модель зношування має вигляд залежності інтенсивності зношування від безрозмірних параметрів контактного тиску і швидкості у вигляді:

$$\frac{du_w}{dS} = K_w \left(\frac{\sigma}{HB} \right)^m \left(\frac{V}{V^*} \right)^n, \quad (5.1)$$

де σ – тиск у контакті, МПа; HB – твердість за Брінелем, МПа; u_w – лінійне зношування циліндричної поверхні, м; S – шлях тертя для циліндра, м; K_w , m , n – параметри закономірності зношування; V, V^* – відповідно швидкість випробувань і базова швидкість ковзання, м/с.

В моделі зношування параметри K_w , m , n характеризують вплив факторів контактного тиску і швидкості ковзання на знос. Ці параметри характеризують конкретні умови зношування трибосистеми і визначаються за результатами експериментальних випробувань.

У цій лабораторній роботі для оцінки зносостійкості поверхні зміцненого циліндричного валу використана схема випробувань «кулька–циліндр», коли циліндр виготовлений з досліджуваного матеріалу, а як контрольний зразок використовується підшипникова кулька зі сталі ШХ15.

Розглядається контакт жорсткої кульки та жорсткого циліндру під дією навантаження Q , при цьому вважали, що зношується тільки циліндр, а сфера (кулька) не зношується. Приймали форму зношеної поверхні у вигляді колового жолоба з радіусом профілю $\bar{a}$.

Контактний тиск під жорсткою кулькою по зношеній поверхні жолоба циліндра розподілений рівномірно (див. рис. 5.3):

$$\sigma = \frac{Q}{\pi \bar{a}^2},$$

де Q – діюче при випробуваннях навантаження; $\bar{a}$ – радіус колової площадки контакту спряжених циліндра і кульки.

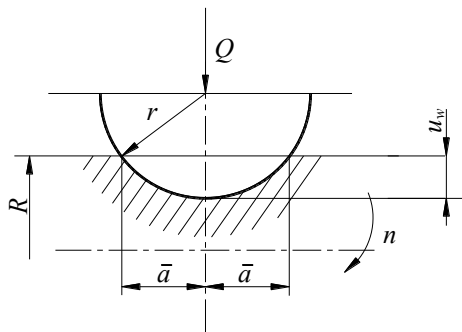


Рис. 5.3 – Розрахункова схема випробовувань

Зв'язок максимального зносу u_w і розміру площадки контакту в центрі площадки визначається з геометрії перетину спряженого циліндра і кульки. При цьому будемо розглядати контакт сфери радіусом r з циліндром радіусом R . З достатньою точністю шукану залежність можна подати у вигляді:

$$u_w(S) = \frac{a(S)^2}{2R^*},$$

де $R^* = \frac{Rr}{R+r}$ – приведений радіус в контакті циліндра і кульки.

Нехай експериментальна залежність радіусу колового жолобу зносу циліндра від шляху тертя представляється у вигляді степеневі апроксимації:

$$\bar{a}(S) = cS^\beta, \quad (5.2)$$

де c , β – параметри апроксимації, які визначаються за наслідками випробувань.

Інтегруючи вираз (5.1), з урахуванням (5.2) отримаємо інтегральну форму моделі зношування циліндра:

$$\frac{c^2 S^{2\beta}}{2R^*} = K_w \left(\frac{Q_1}{c^2 \pi H B} \right)^m \left(\frac{V}{V^*} \right)^n \frac{S^{1-2\beta m}}{1-2\beta m}. \quad (5.3)$$

З умови виконуваності рівняння (5.3) при будь-яких S слідує:

$$m = \frac{1-2\beta}{2\beta}. \quad (5.4)$$

Для знаходження параметра n провести випробування при двох значеннях швидкості ковзання V_1 і V_2 , звідки отримаємо дві групи даних з параметрами і відповідно два рівняння типу 5.3:

$$\bar{a}_1 = c_1 S^\beta;$$

$$\bar{a}_2 = c_2 S^\beta.$$

Після розв'язку системи рівнянь знаходиться параметр n :

$$n = (2m+2) \frac{\lg(c_1/c_2)}{\lg(V_1/V_2)}. \quad (5.5)$$

Коефіцієнта K_w знаходиться за формулою:

$$K_w = \frac{\beta c_1^{2m+2}}{R^*} \left(\frac{HB}{Q} \right)^m \left(\frac{V^*}{V} \right)^n. \quad (5.6)$$

Порядок та зміст виконання

1. Ознайомитися з принципом роботи лабораторної установки для випробувань за схемою «кулька–циліндр» та методикою визначення параметрів зношування матеріалів.

2. Підготувати лабораторну установку до роботи: перевірити справність електроприводу, шпиндельного вузла, механізму навантаження та вимірювального обладнання; очистити контактні поверхні та встановити випробувальний циліндричний зразок на оправку. Зразки обточували до стану гладкої поверхні $D = 24$ мм. Твердість обточеної поверхні становила 200 HB. Сила притискання кульки становила 50 Н, змащування поверхні зразка здійснювали оливою Castrol 10W-40 (67 %) ASEA A3/33.

3. Встановити сталю кульку з підшипникової сталі ШХ15 у накопичувач механізму навантаження та відрегулювати положення вузла контакту так, щоб кулька контактувала з поверхнею зразка. Підготувати систему змащування: заповнити ванну мастильною оливою (Castrol 10W-40) та забезпечити змочування фетрового елемента, який подає мастильний матеріал у зону контакту.

4. Встановити задане контактне навантаження на кульку (50 Н) за допомогою важільного механізму навантаження. Налаштувати режим роботи установки: встановити частоту обертання зразка 340 об/хв, що відповідає швидкості ковзання 25,6 м/хв; після завершення першої серії випробувань встановити частоту обертання 680 об/хв (швидкість ковзання 51,3 м/хв).

5. Провести випробування на зношування упродовж заданого часу. Через кожні 20 хв зупиняти установку та за допомогою мікроскопа вимірювати розміри жолоба зношування на поверхні циліндричного зразка. Отримані експериментальні дані занести до таблиці 5.1, у якій фіксується залежність параметрів зношування від тривалості випробувань при різних швидкостях ковзання.

Таблиця 5.1 – Результати випробувань на знос

Тривалість випробувань t , хв	Швидкість ковзання	
	V_1	V_2
20		
40		
60		
80		

6. Побудувати графіки залежності радіуса жолоба зношування від тривалості випробувань із використанням програмного забезпечення Microsoft Excel для кожного режиму швидкості. Виконати степеневу апроксимацію експериментальних даних. За результатами апроксимації визначити параметри відповідної залежності та використати їх для розрахунку параметрів моделі зношування. На основі отриманих експериментальних даних і аналітичних залежностей (5.4–5.6) визначити закономірності процесу зношування та занести результати розрахунків до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати розрахунку параметрів моделі зношування

Параметри	m	n	K_W

Проаналізувати отримані результати, порівняти зносостійкість досліджуваних зразків при різних швидкостях ковзання та сформулювати висновки щодо впливу режимів роботи трибосистеми на інтенсивність зношування матеріалів.

Вимоги до оформлення та захисту звіту

Звіт має містити:

- тему і мету лабораторної роботи;
- короткі теоретичні відомості про метод трибологічних випробувань за схемою «кулька–циліндр»;
- схему лабораторної установки та її основні елементи;
- вихідні дані експерименту;
- результати експериментальних вимірювань у табличному вигляді (див. табл. 5.1);
- графічні залежності радіуса жолоба зношування від тривалості випробувань для різних швидкостей ковзання;
- результати степеневі апроксимації експериментальних даних;
- розрахунок параметрів моделі зношування;
- аналіз отриманих результатів;
- висновки за результатами лабораторної роботи.

Захист звіту передбачає коротке усне пояснення методики проведення випробувань за схемою «кулька–циліндр», обґрунтування вибраних режимів випробувань та інтерпретацію отриманих експериментальних і розрахункових результатів. Здобувач повинен пояснити побудовані графічні залежності, результати апроксимації та визначені параметри моделі зношування, а також оцінити вплив швидкості ковзання і контактного навантаження на інтенсивність зношування. Під час захисту необхідно продемонструвати розуміння застосованої моделі та відповісти на контрольні питання.

Контрольні питання

1. У чому полягає принцип трибологічних випробувань за схемою «кулька–циліндр»?
2. Які основні елементи має лабораторна установка для проведення випробувань за цією схемою?
3. Яку функцію виконує сталеві кулька у трибологічній парі «кулька–циліндр»?
4. Яким чином створюється і регулюється контактне навантаження під час випробувань?
5. Як визначаються геометричні параметри жолоба зношування на поверхні зразка?
6. З якою метою виконується степеневі апроксимація експериментальних даних?
7. Які параметри характеризують закономірність зношування у моделі зношування?
8. Який вплив мають швидкість ковзання та контактний тиск на інтенсивність зношування матеріалів?

Література: [3, с. 10–18, 6, с. 153–159, 7, с. 27–38]

Література

1. Герасименко С. С., Голубова Г. В., Потапова М. Ю., Червона С. П. Статистика : навчальний посібник / за ред. О. Г. Осауленка. Київ : НАСОО, 2022. 265 с.
2. Dykha A.V., Kuzmenko A.G. Solution to the problem of contact wear for four-ball wear-testing scheme // Journal of Friction and Wear. – 2015. – Vol. 36, No. 2. – P. 138–143.
3. ASTM G99-23. Standard Test Method for Wear and Friction Testing with a Pin-on-Disk or Ball-on-Disk Apparatus. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2023.
4. Диха О. В., Свідерський В. П., Дробот О. С., Машовець Н. С. Технологічне забезпечення довговічності технічних трибосистем : монографія. Хмельницький : ХНУ, 2021. <https://elar.khmnpu.edu.ua>
5. Пат. на корисну модель 29595 Україна, G01B 21/06. Спосіб підвищення точності вимірювання лінійного зношування / Я. М. Гладкий, С. К. Підченко, А. А. Таранчук, О. М. Маковкін, О.А. Лаба. – заявл. 12.03.2007 ; опубл. 25.01.2008, Бюл. № 2. – 4 с.
6. Dykha, A.V., Marchenko, D.D. & Dytyniuk, V.A. Determination of the Parameters of the Wear Law Based on the Results of Laboratory Tests. J. Frict. Wear 41, 153–159 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068366620020038>
7. Dykha, O., Staryi, A., Getman, M., & Fasolia, V. Theory and experiment of tribological test methods. Problems of Tribology, 27(4/106), 27–38. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-106-4-27-38>
8. Stechyshyn, M., Dykha, O., Oleksandrenko, V., Tsepenyuk, M., Kurskoi, V., & Oleksandrenko, Y. (2024). Experimental installation for wear tests of materials and coatings. Problems of Tribology, 29(1/111), 32–37. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-111-1-32-37>

Зміст

Вступ	3
<i>Лабораторна робота 1</i> Планування експерименту та прогнозування оптимальних параметрів трибологічних випробувань на основі програми «Statistica»	5
<i>Лабораторна робота 2</i> Вивчення конструкції та принципу роботи універсальної машини тертя УМТ-1	11
<i>Лабораторна робота 3</i> Визначення інтенсивності зношування металевих зразків під час випробувань на універсальній машині тертя УМТ-1	16
<i>Лабораторна робота 4</i> Теорія і практика лабораторних випробувань на чотирикульковій машині тертя	20
<i>Лабораторна робота 5</i> Визначення закономірностей зношування матеріалів за схемою випробувань «кулька–циліндр»	26
Література.....	35