Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет транспорту та механічної інженерії

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ
ОСВІТИ «МАГІСТР»

ПІДВИЩЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИРОБІВ МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА

спеціальність 131 Прикладна механіка
освітня програма Прикладна механіка

Виконав: здобувач вищої освіти
Групи ІМм-21
Борисюк В’ячеслав Вікторович

_____
(підпис)

Керівник:
К.т.н., доцент
Гальчук Тетяна Никифорівна

_____
(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«___» _____ 20__ р.
К.т.н., доцент
Гарант освітньої програми:
Четвержук Тарас Іванович

_____
(підпис)

Луцьк – 2023 рок

Луцький національний технічний університет

Факультет: транспорту та механічної інженерії
Кафедра: прикладної механіки та мехатроніки
Ступінь вищої освіти: магістр
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 131 Прикладна механіка
Освітня програма: Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____
(*Редько Р.Г.)*
“___” _____ 2023р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ
Борисюку В’ячеславу Вікторовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи *Підвищення триботехнічних характеристик виробів машинобудівного виробництва*.
Керівник роботи *Гальчук Тетяна Никифорівна, к.т.н., доцент*.
затверджені наказом закладу вищої освіти від “ *28* ” *грудня 2022 р*. № *986/01-02*

2. Строк подання студентом проекту (роботи) *01.12.2023* р.

3. Вихідні дані до роботи: *порошки заліза, міді, графіту, типова технологія виготовлення порошкових виробів, нормативні дані, стандартні методики для експериментальних досліджень.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):
Анотація. Вступ. Розділ 1. Огляд літератури з сучасного стану антифрикційних виробів. Розділ 2. Матеріали, методика та техніка експериментальних досліджень. Розділ 3. Дослідження триботехнічних властивостей композиційних виробів. Розділ 4. Вибір та конструювання технологічного оснащення. Розділ 5. Оцінка очікуваної економічної ефективності. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу
Креслення заготовки – 1 лист (ф.А1), КН – 1 лист (ф.А2), складальне креслення верстатного пристрою - 1 лист (ф.А1), складальне креслення контрольного

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання *04.01 .2023 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	*Розділ 1. Огляд літератури з сучасного стану антифрикційних виробів*	*18.05.2023р.*	
2.	*Розділ 2. Матеріали, методика та техніка експериментальних досліджень*	*20.09.2023р.*	
3.	*Розділ 3. Дослідження триботехнічних властивостей композиційних виробів*	*19.10.2023р.*	
4.	*Розділ 4. Вибір та конструювання технологічного оснащення.*	*26.10.2023р.*	
5.	*Розділ 5. Оцінка очікуваної економічної ефективності*	*01.11.2023р.*	
6.	*Висновки*	*10.11.2023р.*	
7.	*Формування списку використаних джерел*	*14.11.2023р.*	
8.	*Формування додатків*	*21.11.2023р.*	
9.	*Оформлення ілюстративного матеріалу*	*28.11.2023р.*	
10.	*Нормоконтроль*	*8.122023р.*	
11.	*Інструментальна перевірка на академічний плагіат*	*09.12.2023р.*	
12.	*Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту*	*12.12.2023р.*	

Здобувач вищої освіти _____ *Борисюк В.В.*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ *Гальчук Т.Н.*

АНОТАЦІЯ

Борисюк В.В. Підвищення триботехнічних характеристик виробів машинобудівного виробництва. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра освітньої програми «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2021.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків (згідно структури кваліфікаційної роботи, затвердженої кафедрою).

У роботі досліджено отримання методом порошкової металургії пористих залізо-мідь-графітових виробів з підвищеними триботехнічними характеристиками.

Проведено аналіз літературних джерел за темою магістерської кваліфікаційної роботи, щодо оптимального вибору складу і кількості компонентів порошкових композитів. Вибрано методику та обладнання для експериментальних досліджень механічних та триботехнічних характеристик виробів із порошкового композиту. Розроблено конструкцію технологічного оснащення та технологічні параметри процесу для отримання спечених антифрикційних виробів із композиційного матеріалу на основі порошку заліза.

Ключові слова: втулка, тертя, зношування, властивості, технологія, машинобудування, порошковий композит.

ABSTRACT

Borysiuk V.V.Improvement of tribotechnical characteristics of machine-building products. Manuscript.

Qualifying thesis of the "Applied Mechanics" educational program, specialty 131 Applied Mechanics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2023.

The paper examines the production of porous iron-copper-graphite products with increased tribotechnical characteristics by the powder metallurgy method.

An analysis of literary sources on the topic of the master's qualification thesis was carried out, regarding the optimal selection of the composition and number of components of powder composites. Methodology and equipment were selected for experimental studies of mechanical and tribotechnical characteristics of powder composite products. The design of technological equipment and process parameters for obtaining sintered anti-friction products from composite material based on iron powder have been developed.

Keywords: sleeve, friction, wear, properties, technology, mechanical engineering, powder composite.

Зміст

		стр.
	ВСТУП…….	8
1.	Розділ 1. Огляд літератури з сучасного стану антифрикційних виробів……	11
1.1.	Склад антифрикційних матеріалів для виробів машинобудування..	11
1.2.	Властивості виробів з антифрикційних матеріалів……...	16
1.3.	Аналітичний огляд порошкових композицій для виробів антифрикційного призначення……..	17
1.4.	Аналіз факторів, що впливають на зношування композиційних виробів…….	18
1.5.	Аналіз методик і установок для визначення триботехнічних властивостей виробів …….....	23
1.6.	Висновки до 1-го розділу……..	27
2.	Розділ 2. Матеріали, методика та техніка експериментальних досліджень……..	29
2.1.	Матеріали та методика експериментальних досліджень……...	29
2.2.	Визначення механічних характеристик виробів з композитів на основі порошку заліза……...	31
2.3.	Визначення триботехнічних властивостей виробів з композитів на основі порошку заліза……	32
2.4.	Планування експерименту та методика статистичної обробки отриманих результатів……...	33
2.5	Висновки до 2-го розділу……..	36
3.	Розділ 3. Дослідження триботехнічних властивостей композиційних виробів……..	38
3.1.	Обладнання і режими отримання спечених антифрикційних	38

виробів із композиційного матеріалу на основі порошку заліза…...

3.2. Властивості виробів із композицій на основі порошку заліза…….. 41

3.3. Дослідження триботехнічних властивостей композиційних виробів……. 43

3.3.1. Вплив пористості на триботехнічні властивості виробів……... 43

3.3.2. Вплив режимів спікання виробів на їх зношування ……. 44

3.4 Висновки до 3-го розділу…….. 47

4. Розділ 4. Вибір та конструювання технологічного оснащення…..... 48

4.1. Вибір обладнання для формування виробу……..... 48

4.2. Розрахунок прес-форми……..... 50

4.3. Розрахунок деталей прес-форм на міцність……. 53

4.3.1. Тиск пресування……. 53

4.3.2. Бічний тиск……. 53

4.3.3. Розрахунок матриці…… 54

4.3.4. Розрахунок пуансонів……... 55

4.4. Висновки до 4-го розділу……..... 55

5. Розділ 5. Оцінка очікуваної економічної ефективності……. 57

5.1. Розрахунок витрат на проведення дослідження……..... 57

5.2. Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості дослідження…… 59

5.3. Економічна ефективність…….. 59

5.4. Висновки до 5-го розділу…….. 60

Висновки……. 61

Список використаних джерел……... 63

Додатки…… 66

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасному загальному машинобудуванні для всіх технологічних і транспортних машин використовується широка номенклатура підшипників ковзання, що виготовляються із різних антифрикційних матеріалів. Значна увага всіх виробників приділяється проблемам тертя і зношування. Так як їх наслідки пов’язані із збитками експлуатації. Проблема виникає внаслідок втрат матеріалів під час зношування і як результат поломками обладнання. Тому актуальною проблемою наукових досліджень є пошук ефективних методів підвищення триботехнічних характеристик виробів. У зв'язку із цим іде розроблення та дослідження нових видів триботехнічних матеріалів для виготовлення антифрикційних виробів. На рівні із виробами з компактних матеріалів досить часто використовуються пористі антифрикційні матеріали, які працюють у великому діапазоні швидкостей та навантажень. В порах акумулюється змазка. Вони сприяють утворенню стабільної масляної плівки на поверхні тертя, що дає можливість виробу працювати і в разі недостатнього змащення або його відсутності. Також порошкові підшипники мають невисоку вартість та виготовляються із недефіцитної сировини, в основному порошків заліза, міді та графіту. Вони мають високі експлуатаційні властивості та просту технологію виготовлення.

Мета і задачі дослідження. Метою магістерської кваліфікаційної роботи є дослідження отримання методом порошкової металургії пористих залізо-мідь-графітових виробів з підвищеними триботехнічними характеристиками.

При цьому повинні бути вирішені такі задачі:

- провести аналіз літературних джерел за темою магістерської кваліфікаційної роботи, щодо оптимального вибору складу і кількості компонентів порошкових композитів;

- вибрати методику та обладнання для експериментальних досліджень механічних та триботехнічних характеристик виробів із порошкового композиту;

- вибрати обладнання і розробити конструкцію технологічного оснащення для отримання спечених антифрикційних виробів із композиційного матеріалу на основі порошку заліза;

- розробити технологічні параметри процесу для отримання виробів з антифрикційного композиту на основі порошку заліза;

- дослідити вплив пористості та режимів спікання на триботехнічні властивості композиційних виробів.

Об'єкт дослідження – втулка вихлопного клапану автомобілів з композиційного матеріалу на основі порошку заліза та технологічний процес її виготовлення.

Предмет дослідження – триботехнічні властивості композиційних матеріалів на основі порошку заліза для втулки вихлопного клапану автомобілів.

Методологія і методика досліджень. Під час виконання роботи використовувались сучасні методи, прилади та обладнання. Результати досліджень опрацьовані методами математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше запропоновано проводити відновлення залізного порошку в суміші із мідним. Оскільки при цьому досягаються оптимальні технологічні та фізико-механічні властивості спечених виробів із ПЖРВ –ГК – ПМ. Доведено залежності зносостійкості та коефіцієнта тертя від величини пористості для композиційного порошкового виробу. Встановлено, що механічні властивості виробів порошкового композиту підвищуються із-за вмісту міді та графіту, та регулюються тиском пресування.

Практичне значення одержаних результатів. На базі порошку заліза розроблено антифрикційний матеріал для втулки ковзання. Вибрано оптимальні

параметрами отримання втулки вихлопних клапанів автомобілів з антифрикційними властивостями.

Апробація результатів магістерської роботи. Робота доповідалась та отримала позитивний відгук на розширеному засіданні науково семінару кафедри прикладної механіки та мехатроніки, ІІІ студентській науково-технічній конференції «Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії» м. Луцьк 21 листопада 2023 року.

Достовірність теоретичних положень магістерської кваліфікаційної роботи підтверджується повною відповідністю поставленим задачам.

Публікації. Результати магістерської роботи опубліковані у праці – Борисюк В. Отримання спечених антифрикційних виробів із композиційного матеріалу на основі порошку заліза: тези ІІІ студентської науково-технічної конференції «Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії». Луцьк: ЛНТУ, 2023. С.9-11.

URL: https://drive.google.com/file/d/1_deYwBn4JXO5u9_hga3n3B39M/view?usp=drive_link.

РОЗДІЛ 1

Огляд літератури з сучасного стану антифрикційних виробів

1.1. Склад антифрикційних матеріалів для виробів машинобудування

Для виготовлення підшипників ковзання в сучасних машинах і приладах широко використовуються антифрикційні матеріали, оскільки вони мають стійкість до вібрацій, безшумність роботи та невеликі габарити. Основні властивості антифрикційних матеріалів - антифрикційність та опір втомленості. Крім того, вироби з матеріалу повинні працювати в широкому діапазоні швидкостей ковзання (0,001–100 м/с і більше), навантажень (1–25 МПа і більше), температур (до 100°С і більше). Створити універсальний антифрикційний матеріал, здатний працювати у вузлах тертя різного призначення є не можливим. Тому виникає потреба в розробці матеріалів тертя для конкретних заданих умов роботи. На даний час налічується багато вузлів тертя, у яких використовуються вироби з антифрикційних матеріалів – циліндричні й кулькові підшипники, підп’ятники, вкладиші, напрямні, струмознімачі, ущільнення, шарнірні пристрої, поршневі кільця та ін. [1]. Антифрикційні матеріали працюють в умовах: за граничного тертя, у вакуумі, тертя без змащення, еластогідродинамічного тертя, за підвищених температур, високих швидкостей, великих навантажень, у різних агресивних середовищах, інертних газах та ін. [1]. Основними вимоги до матеріалів з яких виготовляються вироби антифрикційного призначення є: висока зносостійкість; низький коефіцієнт тертя; оптимальна поверхнева й об’ємна міцність; припрацьовуваність; висока втомна міцність; здатність протистояти схоплюванню; наявність у матеріалі запасу твердого або рідкого мастила тощо.

Також для виробів, що працюють у специфічних умовах, необхідні матеріали із спеціальними властивостями.

Основними антифрикційними матеріалами є:

- *Антифрикційні матеріали на основі олова і свинцю* (бабіти) [2]. Бабіти мають низькі значення твердості (НВ 12–32) і температури плавлення (240–320°С), хороше припрацювання, але невелику опірність втомі. Тому їх використовують для тонкого (менше 1 мм) покриття робочої поверхні опори ковзання. Найбільш поширені марки бабітів на олов'яній основі є Б93, Б88, Б83С. Висока зносостійкість цих сплавів зумовлена значною міцністю вторинних структур, що утворюються на поверхні сплаву. Використовують їх для підшипників відповідального призначення, що працюють за великих швидкостей і навантажень (дизелів, парових турбін тощо). Дешевшими є бабіти на основі свинцю – БКА, БК2, БК2Ш. Використовуються для тонкостінних вкладень. Характеризується не різко вираженою неоднорідною структурою; підвищеним опором руйнуванню; зниженою твердістю; міцним з'єднанням із основою.
- *Антифрикційні матеріали на основі міді* (бронзи і латуні) [2]. Бронзи бувають олов'янисті, алюмінієві. Для підшипників ковзання застосовуються бронзи з високим (до 10%) і низьким (до 3%) вмістом олова та легувальними домішками – Sn, Pb, Ni, P, Fe, Sn, Sb та ін. Так, наприклад, для виготовлення втулок, торцевих дисків та інших антифрикційних деталей використовують олов'янисті бронзи, які деформуються (БрОФ 8-0,3, БрОЦС4-4-2,5). Також широко використовуються сплави, що не містять олова (безолов'янисті), наприклад БрСуСФ6-12-0,3, БрСуН6-2, БрКМцЗ-1. Для важконавантажувальних вузлів тертя (дорожніх машин, важкого верстатного устаткування) застосовують високоміцні алюмінієві бронзи: БрА9Мц2, БрА9Ж4, БрА10- Ж4-Н4, БрАП-Жб-Нб. Як замінники бронз для опор тертя застосовують латуні. Латуні за своїми антифрикційними властивостями значно поступаються бронзам. Двофазні латуні ЛЦ16Д04, ЛЦ38Мц2С2, ЛЦ40МцЗА та інші використовують для малих швидкостей ковзання (менше 2,0 м/с) і невисоких навантажень, наприклад для опор тертя приладів. Необхідно

відзначити, що бронза використовується як компонент порошкових антифрикційних матеріалів. Найпоширеніші матеріали: пориста бронза, просочена мастилом, і бронзографітові матеріали. До складу пористої олов'янистої бронзи входить 6–12% олова. Бронза, що містить 9–11% олова має оптимальні властивості. Пориста бронза заміняє литу бронзу, завдяки чому економиться кольоровий метал та застосовується в основному для виготовлення підшипників ковзання, що працюють у легких умовах, наприклад для приладів, робота яких характеризується малими швидкостями ковзання (менше 1,5 м/с) і невеликими навантаженнями (приблизно 0,5–1 МПа). Такі підшипники не потребують додаткового змащення протягом 3000–5000 год, мають низький і стабільний коефіцієнт тертя (0,01–0,04), низький рівень шуму і надійно працюють у діапазоні температур від –60 до +120°С. В умовах додаткового змащування граничне навантаження для пористої бронзи досягає 8 МПа (якщо V=1 м/с). Високі антифрикційні характеристики мають матеріали із вмістом мідних порошків, отриманих методом порошкової металургії. Це такі як: бронзографіти, складнолеговані бронзи, мідно графіти. Графіт використовують як тверде мастило (1–25%) і його вміст залежить від умов роботи матеріалів. Графіт, наявний у бронзі, у процесі тертя поступово утворює графітову плівку на поверхні контр тіла, яка постійно відновлюється у разі механічних пошкоджень. До цих матеріалів належать БрОГр10-3, БрОГр9-3, БрОГр8-4. Властивості спечених бронз і бронзографітів покращують легуванням титаном, нікелем, свинецем, цинком, кобальтом, залізом, алюмінєм тощо, що призводить до збільшення границі міцності до 3,5 МПа. Для важконавантажених вузлів тертя проводять комплексне легування основи такими елементами, як нікель, вольфрам, молібден, ванадій, хром і залізо, що зменшує вміст олова до 0,5–0,6%. Мідно графітові матеріали використовують в основному для виготовлення нерухомих контактних, радіальних ущільнень і щіток, в яких мідь забезпечує провідність, а графіт (до 75%.) підвищує зносостійкість і контактний опір.

- *Антифрикційні матеріали на основі алюмінію [2]*. Сплави на основі алюмінію застосовують як у біметалевому, так і монометалевому виконанні. З останніх виготовляють втулки, підшипники ковзання, шарніри та ін. Алюмінієві антифрикційні сплави із вмістом олова до 20%, замінюють безолов'янисті бронзи. Підшипники у вигляді литих монометалевих втулок виготовляють зі сплавів з підвищеною конструкційною міцністю: АМКО-1, АМгК-2, АММгК-1 та ін. Антифрикційні сплави на основі алюмінію виготовляють методами порошкової металургії. Вони мають переваги такі, як мала питома маса, невисока вартість і велика корозійна стійкість. Підшипникові матеріали на основі алюмінію містять 10...60% пор, мають легуючі домішки та просочуються маслом. Матеріали на основі алюмінію, з вмістом міді або магнію, рекомендовано для виготовлення підшипників, що працюють за низьких питомих навантажень у вузлах тертя, наприклад у приладах, сільськогосподарських машинах. Для виготовлення деталей вузлів тертя, що працюють без змащення, використовуються матеріали на основі алюмінію, із вмістом графіту, сульфідів, оксидів, карбідів. До підшипникових матеріалів на основі алюмінію, що працюють за підвищених температур, вводять порошки твердих сплавів (WC, TiC), а деколи – нітрид бору.
- *Антифрикційні матеріали на основі заліза*. На основі заліза використовують як антифрикційні матеріали сталь і чавун. Серед сталей використовують мідисті сталі з малим вмістом вуглецю, або графітизовані сталі з вкрапленнями вільного графіту. В основному використовують чавуни для підшипників та інших деталей вузлів тертя. Антифрикційність чавунів забезпечується наявністю в структурі вільного графіту. Антифрикційні чавуни містять 2,8...3,8% C, 1,5...2,7% Si, 0,4...1,2% Mn, а також залежно від марки чавунів у їхній структурі можуть міститися такі елементи: Ni, Cr, Cu, P і S. Найпоширенішими антифрикційними чавунам – А4С-1, А4С-2, А4С-3, ковкий А4-1, високоміцний А4В-1. Найпоширенішими антифрикційними матеріалами на основі заліза є спечені матеріали [3, 4]. Вони успішно конкурують з литими сплавами. На основі заліза використовуються спечені антифрикційні матеріали:

пористе залізо, залізо–графіт, залізо–мідь–графіт, сульфідовані залізографітові матеріали, матеріали з присадками як твердим мастилом фторидів кальцію або барію та інших присадок, складно-леговані пористі матеріали та ін. Легувальні домішки підвищують фізико-механічні властивості й забезпечує працездатність матеріалів для умов абразивного зношування, підвищених навантажень, швидкостей ковзання і температур, впливу агресивних середовищ. Вони розширюють межі застосування спечених антифрикційних матеріалів. Пористе залізо за умови рясної подачі мастила зберігає свою працездатність із навантаження 2,0–2,5 МПа і швидкості ковзання 1–2 м/с. Робоча температура не повинна перевищувати 70–80°С, для збереження ефекту самозмащування. Використовується для виготовлення самозмащувальних підшипників ковзання, побутової апаратури, приладів, лічильних пристроїв, прядильних кілець та ін. Залізографіт – найпоширеніший матеріал на основі заліза, наприклад ЖГр3, ЖГр4. Найстабільніші фізико-механічні, технологічні властивості та структуру має залізографітовий матеріал з вмістом графіту 0,8–1%. Гранична швидкість ковзання для цих матеріалів становить 2–3 м/с, а тривалість роботи не перевищує 3–5 тис. год.[3] Також широко застосовують у промисловості композиційні матеріали залізо–мідь і залізо–мідь–графіт (ЖДЗ, ЖД5). Мідь в порошковому матеріалі на основі заліза підвищує його міцність, дозволяє регулювати зміну розмірів внаслідок усадки під час спікання. Кількість міді, що вводиться в антифрикційний матеріал на залізній основі, становить 2,5–20%. Оптимальним є до 5–9% [4]. За властивостями є схожими до пористого заліза і залізографіту. Використовуються при роботі зі змащенням, значно рідше в режимі самозмащування. Введення до складу композиту міді покращує механічні властивості матеріалу та підвищує його мікротвердість. Найбільш розповсюдженими марками матеріалу є ЖГр1ДЗ, ЖГр1Д5, ЖГр1, 5Д5, ЖГр4Д7. Вони мають високі триботехнічні характеристики, що дає можливість їх використовувати у відповідальних вузлах тертя та витримувати статичні навантаження 60–290 МПа. Легування залізо–мідь–графітових антифрикційних матеріалів фосфором підвищує їх опір пластичній деформації в умовах тертя.

Такі композити мають вищу зносостійкість унаслідок тертя без мастила. Оптимальними є матеріали на основі заліза, із вмістом 1,2% графіту і 0,2...0,4% фосфору Для деяких композиційних матеріалів, що вводять молібден [5]. Для композитів залізо–графіт–молібден характерним є зменшення коефіцієнта тертя під час збільшення швидкості ковзання та питомого навантаження. Додавання сірки позитивно впливає на фізико-механічні властивості та структуру залізографіту. Вона поліпшує експлуатаційні характеристики матеріалів. Сірка вводиться в антифрикційні матеріали на основі заліза як легувальний елемент і у вигляді сульфідів різних матеріалів.

1.2. Властивості виробів з антифрикційних матеріалів

Під час вибору антифрикційного матеріалу для виробів конструкційного призначення розглядають властивості механічні, фізичні, хімічні, технологічні та експлуатаційні [6,7]. Вказані властивості мають різний прояв у статичних і динамічних станах, а також залежать від характеру навантаження. Серед механічних властивостей для статичного впливу навантаження можна виділити такі [8] як за: видом (розтягування, стискання, згин, кручення); часом прикладання навантаження (постійне, змінне); температурними умовами (низька, висока температура); впливом середовища (корозія, адсорбція). В разі динамічного навантаження в умовах змінного навантаження властивості розрізняють за: видом навантаження; геометрією; температурою; впливом середовища.

До основних механічних властивостей відносять [7]: пружність, пластичність, міцність, в’язкість, повзучість, твердість і зносостійкість, що визначаються напруженнями та деформаціями матеріалу під впливом навантаження (таблиця А.1).

До основних фізико-хімічних властивостей матеріалів відносяться [7]: густина, температури фазових переходів, тепло- та електропровідність, теплоємність, коефіцієнти теплового розширення, діелектрична і магнітна

проникність та антикорозійні властивості (таблиця А.2). Перераховані властивості залежать від хімічного складу композиту та його структури.

Є два шляхи зниження зносу під час тертя – зменшення нормального навантаження на пару тертя або підвищення міцності поверхневого шару. На збільшення зносостійкості шарів при їх зміцненні впливають складові напруження (табл. А.3).

Отже, при виборі матеріалу для виготовлення антифрикційного виробу необхідно комплексно враховувати як експлуатаційно-технологічні, так і фізико-механічні характеристики.

1.3. Аналітичний огляд порошкових композицій для виробів антифрикційного призначення

У порошковій металургії для виготовлення використовується не литий метал, а порошки чистих металів та їх сплавів, а також порошки неметалічних матеріалів. Ця особливість галузі виробництва дає можливість виготовляти вироби з металевих елементів так і поєднувати в одному матеріалі метали з неметалевими компонентами [9]. А також дає можливості для створення нових матеріалів для виробів з різноманітним комплексом механічних і фізико-хімічних властивостей. Методами порошкової металургії створена велика група нових композиційних матеріалів, до яких відносяться і антифрикційні матеріали. За останні 20 років основна маса порошкових виробів (до 70%) це деталі вузлів тертя. Для їх виготовлення використовують леговані порошкові матеріали [10]. На сьогоднішній день є велика кількість наукових публікацій як вітчизняних так і закордонних вчених, що висвітлюють питання технологій, конструкцій та способів виготовлення антифрикційних виробів методами порошкової металургії. Так, у роботі [11] наведено результати досліджень механічних та триботехнічних характеристик металоскляних залізовуглецевих сплавів. Показано, що введення у порошкову суміш 2% карбіду бору значно підвищує зносостійкість матеріалу та коефіцієнт тертя (0,27–0,42) порівняно з матеріалами без B4C. Автори в роботі [4] проаналізували граничні умови

можливого використання втулок з нового композиційного підшипникового матеріалу на основі міді, з добавленням нікелю, молібдену і твердого мастила CaF2. Досліджено триботехнічні властивості при випробуваннях в умовах важконавантаженого реверсивного тертя (температура 400–600°С і навантаження до 6,0 МПа на повітрі). Результати досліджень показали, що тверде мастило рівномірно розподілене вздовж контактних поверхонь, оскільки воно покриває всю область тертя, забезпечує високу зносостійкість. Підшипникові втулки виготовлені із композиту добре себе зарекомендували під час роботи у шасі транспортних засобів. В роботі [3] досліджено триботехнічні характеристики композиційного антифрикційного матеріалу Fe–W–CaF2 в парі зі сталлю 1Х18Н9Т на повітрі (температура 500 °С, тиск 0,8–3,3 МПа, швидкості ковзання 0,5–2,0 м/с). Встановлено, що при сталому тиску (0,8 МПа) зі збільшенням швидкості ковзання з 0,5 до 2 м/с його коефіцієнт тертя і знос зменьуються ($f_т$ з 0,3 до 0,26, $I_м$ з 5 до 2 мг/км та $I_л$ з 30 до <5 мкм/км). В разі сталої швидкості ковзання (0,5 м/с) виробу з матеріалу зі збільшенням тиску на пару тертя з 0,8 до 3,3 МПа його $f_т$ зменшується з 0,3 до 0,26, а $I_м$ і $I_л$ збільшується – з 5 до 8,4 мг/км і з 30 до 57 мкм/км, відповідно. Показано, що вміст структурної (антифрикційної) складової у вторинних змащувальних плівках залежать від умов тертя (P, V) виробу з порошкового композиційного матеріалу. В роботі [12] було показано що, використання композиційних матеріалів триботехнічного призначення на основі епоксидних олігомерів пов'язано з особливими властивостями епоксидів, які мають високу технологічність, адгезійну здатність, корозійну стійкість та низьку усадку. Досліджено залежності інтенсивності зношування від швидкості, навантаження та шляху тертя. В роботі [5] представлено аналіз процесів тертя та зносу пористих підшипників ковзання, модифікованих шарами твердого мастила, для високих температур. Відмічається, що для температури 300 °С відбувається значне зниження швидкості зносу, а коефіцієнт тертя склав 0,04. В роботі [13] досліджувалися триботехнічні характеристики композиційного антифрикційного матеріалу Fe–W–CaF2 в парі зі сталлю 65Г на повітрі без

змащування за підвищеної швидкості ковзання (15 м/с) і незначних (0,64–1,28 МПа) тисків. Встановлено, що зі збільшенням тиску вдвічі (з 0,64 до 1,28 МПа) коефіцієнт тертя зменшується з 0,25 до 0,2 (в 1,25 раз), а його знос зростає (в 1,95 раз) з 0,0158 до 0,030855 мг/км, але залишається незначним. Відбувається це внаслідок того, шо на поверхні матеріалу синтезуються вторинні структурні змащувальні плівки, які запобігають механічному контакту поверхонь пари тертя і забезпечують необхідні антифрикційні та експлуатаційні властивості.

1.4. Аналіз факторів, що впливають на зношування композиційних виробів

Проблеми тертя, зношування і змащення в машинах вивчає наука трибологія. На даний час розглядаються питання, пов’язані із процесом взаємодії поверхонь, що контактують в процесі їхнього взаємного переміщення. Створення і підбір триботехнічних матеріалів базуються на вирішенні взаємопов’язаних задач на основі вивчення механіки тертя і фізико-хімічних явищ, що проходять на поверхні.

Контакт взаємодії твердих тіл спостерігається лише в окремих зонах, розміри і густина розміщення яких залежать від величини прикладеного навантаження, а також від напружено-деформованого стану контактів. Ці контакти залежать від геометричної форми мікронерівностей і механічних властивостей поверхневого шару. Сумарна площа контактів мікронерівностей утворює фактичну площу дотику взаємодіючих тіл, яка впливає на виникнення високих напруг. Ковзання супроводжується інтенсивним деформуванням поверхневих шарів контактуючих тіл [14]. На ранній стадії досліджень зовнішнє тертя пояснювали механічним зачепленням між мікронерівностями спряжених поверхонь. В результаті поглибленого вивчення будови твердого тіла встановлено молекулярну взаємодію під час зовнішнього тертя. Найбільш повний опис процесу зовнішнього тертя пояснюють дві теорії тертя: молекулярно-механічна і адгезійно-деформаційна [15,16].

Накопичені наукові дані в області трибології показують, що процес тертя охоплює фізичні, хімічні та механічні явища. Тому процес тертя можна

представити як три послідовних, взаємопов’язаних етапи, а саме: взаємодія поверхонь; зміна поверхневих шарів в результаті взаємодії; руйнування поверхонь внаслідок двох попередніх етапів.

Взаємодія поверхонь – найбільш важливий етап процесу тертя. Головним для його оцінки є уявлення про подвійну природу взаємодії та про локальний, дискретний характер контактування в плямах дотику [14]. Механізм зовнішнього тертя зводиться до відтиснення більш м’якого матеріалу вкоріненими нерівностями (деформаційні складові сили тертя) і подолання адгезійних зв’язків, що виникають у контактній зоні (адгезійна складова).

Процес деформаційного руйнування поверхні тертя аналогічний процесу деформації і руйнування металів, який протікає у вигляді таких стадій [14]:

Перша стадія – пружно-пластична деформація. На цій стадії проходить подрібнення блоків в межах зерен. Механізм процесу дислокаційний, при цьому проходить накопичення дислокацій.

Друга стадія – в основному пластична, за участі деструкційної деформації не дислокаційної природи. Деструкційна деформація проявляється в поворотах і переміщеннях фрагментів, які складаються із більшої кількості блоків, і розвивається в усіх напружених об’ємах.

Третя стадія – локалізація деструкції в зоні руйнування, де з’являється перша тріщина, що призводить до руйнування матеріалу.

Крім деформаційного руйнування поверхневого шару існують інші явища, що супроводжують процес тертя. Зокрема окислення поверхні матеріалу, що обумовлює протікання найбільш розповсюдженого при нормальній роботі вузла тертя окислювального зношування. Механізм окислювального зношування у випадку тертя матеріалів на залізній основі полягає в неперервному утворенні та руйнуванні шарів твердих розчинів кисню в залізі і шарів різного типу хімічних сполук кисню із залізом. Кисень із адсорбованого шару дифундує у поверхневі шари металу завдяки їх пластичному деформуванню, що призводить до збільшення густини точкових дефектів –

вакансій, а також міжвузлових атомів, що обумовлює протікання в цьому шарі дифузії кисню, утворення твердого розчину кисню в залізі і оксидів різного хімічного складу (FeO, Fe_3O_4, Fe_2O_3) [2]. Процеси окислення значно ускладнюються, якщо композиційні матеріали є багатокомпонентними за складом. В роботах [2,9] вивчалося протікання окислювальних реакцій і склад плівок, що утворилися в результаті тертя типових фрикційних матеріалів на основі заліза МКВ–50, ФМК–8, ФМК–11. У поверхневих плівках цих матеріалів присутні оксиди заліза і оксиди всіх інших металічних компонентів. Плівки характеризувалися шаровою структурою і високою твердістю (до 11000 МПа). Оксиди кремнію, карбіди кремнію та бору, що входять до складу матеріалів, перешкоджають зриванню плівок.

Хімічний склад і структура поверхонь тертя визначаються не тільки оксидами металів. У разі стабільного процесу тертя двох контактуючих поверхонь виникає так званий робочий шар більш складного складу та структури. Цей шар утворюється за участі продуктів зношування всіх компонентів, що є в матеріалі, в результаті їх виносу на поверхню і розподілу на ній в процесі тертя. Робочий шар складається із проміжного шару і поверхневих шарів матеріалів, що мають змінені структуру та хімічний склад [17]. Поверхневий шар може складатися із м’яких структурних складових (ферит, графіт та ін.), які, деформуючись, витягуються в напрямку дії сил тертя і виходять на поверхню у вигляді плівки, в якій неможливо виділити окремі компоненти, що її утворюють. Такі тонкі поверхневі плівки утворюються при високих ступенях деформації. У поверхневому високо-деформованому шарі, товщиною до 10 мкм з постійним рівнем напруження, часто спостерігаються фрагментовані структури. Процес нормального тертя і зношування без пошкоджень зумовлений збереженням цієї стабільної структури, здатної квазіпружно сприймати зміни навантаження [17].

Великий вплив на утворення та властивості робочого шару на поверхнях пари тертя мають дифузійні процеси. Вони протікають в найтонших шарах під впливом локально високих температур, тиску, деформацій, що виникають під

час тертя. Реалізуються такі процеси з великими швидкостями і можуть призводити до суттєвих змін хімічного складу поверхневих шарів, перерозподілу елементів у них. Хімічний склад змінюється в результаті взаємодії матеріалу пари тертя із змащенням і повітрям або іншим навколишнім середовищем. У літературі описано ряд спостережень щодо збільшення концентрації вуглецю, зменшення вмісту нікелю, переносу міді на поверхнях тертя та ін. [10]. Проведені розрахунки коефіцієнтів дифузії показали, що вони є значно вищими в умовах тертя [14].

Тертя є динамічним процесом, при якому протікають різні фізико-хімічні явища, що супроводжуються утворенням так званих вторинних структур, властивості яких відрізняються від властивостей початкових матеріалів. Утворення вторинних структур можна уявити як процес аморфизації та механо-хімічного легування поверхневого шару. Цей процес включає такі явища: диспергування матеріалу поверхонь тертя, подрібнення дисперсоїду із частинками оксидів, графіту та інших речовин, що входять до матеріалу у вигляді присадок.

На певному етапі можливе спікання суміші із рекристалізацією структури на поверхнях пари тертя під дією високих локальних температур і тиску та перехід в новий стан із особливими характеристиками і структурою, аналогічною, в деякій мірі, дисперно-зміцнюючим матеріалам. Характер і властивості вторинних структур, що виникають безпосередньо в процесі роботи, мають вирішальний вплив на зносостійкість пари тертя [10,13]. Тому під час розробки матеріалів триботехнічного призначення, для забезпечення стабільності експлуатаційних властивостей, основну увагу приділяють збереженню структури і фазового складу в умовах тертя. В результаті контактування можливе схоплювання твердих тіл під дією молекулярних сил. При цьому утворюються міцні металічні зв’язки в зонах безпосереднього дотикання контактуючих матеріалів [16]. Сучасні уявлення про схоплювання під час тертя пов’язують із дислокаційними процесами [17]. Із адгезійною взаємодією та, зокрема, із схоплюванням пов’язане явище фрикційного

переносу, який спостерігається в процесі тертя матеріалів різної природи (метал–полімер, метал–графіт) або в процесі тертя більш м’якого металу по більш твердому (мідь–сталь). У випадку тертя таких пар на поверхні твердого елемента формується плівка переносу із м’якого матеріалу (матеріалу із меншим когезійним зв’язком) і тертя проходить за схемою: „м’який матеріал – м’який матеріал”.

У разі тертя зі змащенням може виникнути явище вибіркового переносу елементів. В цьому випадку активний компонент змащення хімічно реагує тільки із активними ділянками поверхні сплаву. У разі вибіркової адсорбції проходить вибіркове розчинення легуючого компонента, на місці атомів якого виникають вакансії. В результаті на поверхні утворюється плівка, збагачена вакансіями. Під час її деформування вакансії рухаються назустріч дислокаціям і частково анігілюють з ними. Велика частина дислокацій виходить на поверхню, несучи із собою атоми, які на поверхні набувають вільні зв’язки і легко вступають у хімічні реакції, утворюючи захисний шар [8].

Викладені уявлення про подвійну природу тертя твердих тіл і про процеси, що його супроводжують, дозволяють назвати основні фактори впливу на зносостійкість матеріалів. Це хороший тепловідвід, сумісність матеріалів, що складають пару тертя, еволюція структури і властивостей, здатність зберігати пружний контакт, наявність градієнта зсувного опору, наявність або відсутність вторинних структур, що формуються під час тертя, параметри характеристики міцності матеріалів.

1.5. Аналіз методик і установок для визначення триботехнічних властивостей виробів

В даний час відома велика кількість методів і машин, які використовуються для вивчення процесів зношування матеріалів, а також для пошуку способів підвищення їх зносостійкості. Багатогранність методів дослідження триботехнічних властивостей матеріалів викликає необхідність класифікувати їх в умовах тертя ковзання за певними ознаками. Д.В.

Конвісаров класифікував всі дослідницькі машини для вивчення зношування матеріалів, розділив їх за деякими ознакам на дев′ять груп [17].

Відповідно класифікації І.В. Крагельського [2] за кінематичною ознакою всі машини для досліджень на тертя і знос малих зразків діляться на два класи: I – машини поступального руху; II – машини зворотно-поступального руху.

В середині кожного класу машини поділяються на дві групи: машини торцевого тертя та машини тертя по утворюючій.

В середині кожної групи розрізняють дві підгрупи: машини з коефіцієнтом взаємного перекриття (Квз), що прямує до одиниці та машини з Квз, що прямує до нуля (пальчикові машини).

Розподілення за кінематичною ознакою, як підкреслює автор, необхідне, так як характери розрушення поверхонь тертя при поступальному і зворотно-поступальному різко відмінні.

Таким чином за класифікацією І. В. Крагельського [2] є 8 різних типів машин. Такий підрозділ потрібний у зв′язку з необхідністю збереження видів розрушення поверхонь тертя.

Характеристики і опис численних типів дослідницьких машин наведено у роботах [18, 19].

Відома класифікація Р. М. Матвієвського [17], який класифікував усі машини для дослідження мастильних властивостей рідин за принципом контактування поверхонь тертя вузлів, що досліджуються.

Згідно з цією класифікацією машини діляться на три групи (рис. А.1):

1) з контактом поверхонь тертя по площі;
2) з лінійним контактом поверхонь, що труться;
3) з точковим контактом поверхонь, що труться.

В наш час відома велика кількість машин для дослідження процесів зношування матеріалів. Розрізняють спеціалізовані машини тертя та універсальні. Вони працюють за різними схемами контакту.

Велике використання має схема торцевого тертя зразків. Однією з найбільш поширених машин, що працюють по цій схемі контакту є установка И–47–К–54 [17], яка випускається під маркою МТФ–1. Вона відноситься до машин поступального руху з торцевим тертям з Квз, що прямує до одиниці. Ця машина призначена для оцінки зносу і коефіцієнта тертя металевих та неметалевих матеріалів. Дослідження ведуться на двох кільцевих зразках, що труться торцями. Перевага машин – можливість одержання на ній широкого діапазону температур (до 1000 °С).

Схема торцевого тертя циліндричних зразків найшла широке використання у машинах тертя: для дослідження матеріалів на тертя в агресивних середовищах машина МТ–3 конструкції І.В. Васильєва [18], машина конструкції М.Д.Безбородько, Г.В. Виноградова та інших для дослідження пластмас [18].

До машин одностороннього руху відносяться: установка Амслера марки МИ–1М [18], що призначена для оцінки інтенсивності зношування підшипникових матеріалів. Дослідження на ній проводять за двома схемами:

1) на 2-х притиснутих один до другого роликах, що обертаються з постійним числом обертів;
2) на ролику, що обертається, до якого притискується вкладиш.

За принципом контактування поверхонь тертя дана установка відноситься до установок з лінійним контактом. Суттєвим недоліком машини є її мала швидкість ковзання (до 0,4 м/с), відсутність пристрою для самоцентрування зразка і його підігріву чи можливості охолодження. Дослідження на знос проводяться як із змазкою так і без неї.

Схема досліджень вал–вкладиш у присутності змащувального середовища дозволяє досліджувати матеріали з більш кращим наближенням до реальних умов. Дослідження за даною схемою проводились на машинах МТ–2 (типу Моора і Федергафа), ЛТС, МТГ, “Олмент” та інших [18]. В умовах сухого тертя матеріали досліджувались на машинах НИДИ і М22–Н [18]. Існує цілий ряд машин з точковим контактом тертя. Найбільш поширені з них: КТ–2, МАСТ–1,

ЧИМ 3/3. Багатьма дослідниками використовується дослідження за схемою втирання валом або диском, що обертаються, по плоскій поверхні зразка. Машини Шпінделя, Шкоди–Савіна відносяться до цієї серії машин. Цю схему для дослідження антифрикційних властивостей матеріалів при граничному терті у середовищі гасу використовували: О.Е. Кестнер, О.Д. Куріцина, С.Л.Гудзейт; при сухому терті Е.Р. Бузе, Е.Н. Скотт, Д.Ф.Вілкок.

Однією з найбільш зручних машин для умов граничного тертя є пальчиковий прилад тертя Анічкова і Єліна АЕ–5. Він дозволяє проводити дослідження на тертя, зношування та заїдання в умовах штучного терморегулювання. Пара тертя, що досліджується представляє собою три пальчики, які з'єднанні у кільце. Змащення здійснюється за допомогою подачі її краплинами до центру диска. Знос визначається зважуванням зразків на аналітичній вазі.

Із закордонних машин тертя найбільше поширення отримали установки "Тімкен", "SAE", Арчарда. Пальчикова машина Арчарда відноситься до машин одностороннього руху. Можуть бути використані дві схеми контакту: торець пальчикового зразка – утворююча циліндра, утворююча пальчикового зразка – утворююча циліндра. Знос визначається зважуванням зразків чи лінійним вимірюванням. Крім того вимірюється сумарний знос за допомогою голки профілографа, яка встановлюється зверху зразка, що досліджується. Дослідження на ній можуть проводитись у широкому діапазоні навантажень і швидкостей, вдається відновити різні види зносу, за допомогою подачі змазки чи працюючи без змащення. Дискова машина тертя Барвелла і Стронга відноситься до машин одностороннього руху [18]. Дослідження ведеться за схемою нерухомого зразка і диску, що обертається. Висока точність вимірювання зносу дозволяє вести короткочасні дослідження.

Крім машин одностороннього (поступального) руху широке розповсюдження отримали машини зворотно-поступального руху. Для проведення дослідження при зворотно-поступальному русі, що має свою специфіку, в основному в частині другого характеру деформування

поверхневих нерівностей в умовах пластичного контакту, широке розповсюдження отримали машини: 77МТ–1 [21], конструкції Полякова і Гаркунова та чотирьохшпиндельна машина, розроблена у НДІ залізничного транспорту Т.В.Ларіним і Б. М. Асташкевичем [21]. Дослідження матеріалів на машині 77МТ–1 можна проводити в різних середовищах так як зразок знаходиться у ванні.

Для дослідження тертя у зворотно-поступальних парах (шліцьової та циліндро-поршневої груп) молотком застосовувалась машина ИМШВ–1 [18, 21].

Для умов тертя ковзання і тертя кочення за нормальних температур використовується машина тертя СМЦ – 2, що працює в умовах сухого тертя металу по металлу. Призначення машини – випробування на знос і визначення фрикційних властивостей. Працює за схемами модельних трибосистем: диск – диск, зразок – контртіло, втулка – вал (Б.4). Машина тертя укомплектована пристосуванням для градуювання силових систем. Для проведення випробувань в рідких середовищах передбачено використання спеціальних камер. Технічні характеристики машини тертя СМЦ – 2 приведено в таблиці Б.3.

Проте варто відмітити, що дослідницька машина моделі СМЦ–2 має ряд переваг, що дозволяє проводити дослідження з врахуванням конструктивних особливостей вузла тертя:

- вид тертя;
- вид змащення;
- геометричні та кінематичні особливості;
- використання єдиного методу вимірювання зносу;
- використання простих у виготовленні і підготовці стандартних зразків на установці в усіх серіях дослідження;
- проводити дослідження в широкому діапазоні температур і навантажувально–швидкісних режимах з достатньою точністю результатів, що отримуються;

- визначити межі переходу від нормальних до недопустимих (катастрофічних) видів зношування;
- проста і зручна в експлуатації.

1.6. Висновки до 1-го розділу

Із огляду літературних даних видно, що всі основні експлуатаційні властивості спечених композицій триботехнічного призначення – міцність, твердість, коефіцієнт тертя, зносостійкість, температура в зоні тертя залежать від хімічного складу і мікроструктури, властивостей матеріалу, вибраного за основу. Підвищити вказані характеристики композиційних порошкових виробів можливо, наприклад введенням у порошкову шихту готового металевого порошку або легуючих добавок, твердої змазки. В результаті підвищується міцність металічної основи та механічні характеристики; зменшується (або повністю усувається) схоплювання, абразивне зношування, швидкість накопичення дефектів структури.

Відомо, що триботехнічні властивості спечених композитів основі чутливі до мікроструктури матеріалу. Змінюючи кількість домішок, що вводяться, і технологічні параметри отримання, можна сформувати структуру композиту з необхідними для конкретних умов механічними і триботехнічними властивостями.

Проаналізувавши існуючі конструктивні особливості установок та методик, зроблено висновок про доцільність використання лабораторної машини моделі СМЦ–2 для дослідження триботехнічних характеристик порошкових антифрикційних виробів на основі порошків заліза.

Виходячи із вищевказаного, в даній роботі представлено результати авторських досліджень, що полягають в наступному:

- дослідження впливу технологічних параметрів і складу початкової шихти на структуру, міцність та триботехнічні характеристики спечених композитів на основі заліза із добавками міді і графіту;
- розробка, в якості практичної реалізації отриманих результатів, технології одержання композиційних матеріалів триботехнічного призначення.

РОЗДІЛ 2

Матеріали, методика та техніка експериментальних досліджень

2.1. Матеріали та методика експериментальних досліджень

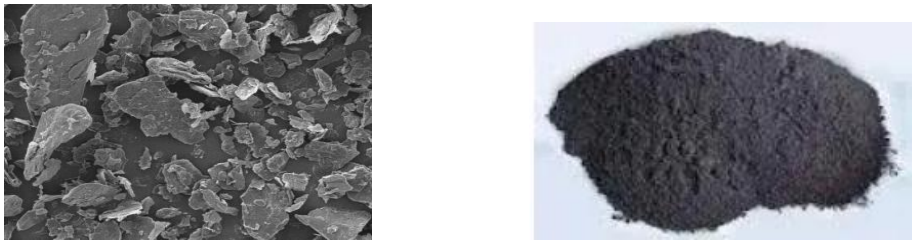
Для виготовлення антифрикційних деталей на основі залізного порошку використовували такі матеріали:

- порошок заліза марки ПЖРВ-3.200.28 виготовлено на ДП «Завод порошкової металургії» (м. Бровари, Україна) методом розпилення сталі водою високого тиску за ДЕСТ 9849-86 та відповідає гранулометричному і хімічному складу, що наведені в табл. Б.1, табл. Б.2.

а б

Рисунок 2.1. Вихідні порошки заліза ПЖРВ-3.200.28 (×100): а - морфологія, б - загальний вигляд

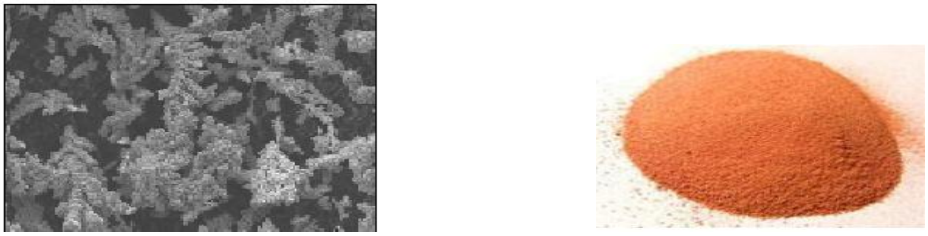
- порошок графітовий ГК-1 за ДЕСТ 17022-81



а б

Рисунок 2.2. Вихідні порошки заліза ГК-1 (×100): а - морфологія, б - загальний вигляд

- порошок міді ПМ-1 за ДЕСТ 4960-2017



а б

Рисунок 2.3. Вихідні порошки міді ПМ-1 (×100): а - морфологія, б - загальний вигляд

Характер розвиненості поверхонь частинок, розподіл структурних складових в об'ємі матеріалу досліджували на модульному комплексі Dimic 1000 (рис. Б.1), що являє собою оптичну 3D–систему контролю і складається з блоків зчитування, обробки та представлення інформації.

Пресування здійснювали за одностороннього пресування (рис. Б.2). Для одержання коректних даних виготовляли по 3 зразки для кожного значення питомого тиску.

Маса порошку вираховувалась за формулою:

$$m=V\times\gamma_н, \quad (2.1)$$

де $V=\frac{\pi\cdot d^2}{4}\times h$ – об'єм пресовки, см^3; d – діаметр отвору матриці прес-форми, мм; $\gamma_н$ – густина матеріалу порошку, г/см^3.

Регулювання пористості зразків здійснювали при постійній масі (m=15г) за рахунок змінного тиску.

Густину пресовки визначали за формулою:

$$\rho=\frac{m}{V}, \quad (2.2)$$

де m – маса пресовки, г; V – об'єм пресовки (визначався шляхом замірів), см^3.

Склад шихти триботехнічних композитів наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.1 - Склад шихти для отримання триботехнічних композицій

Компоненти шихти (мас. доля)			Склад композиційного матеріалу (об. %)
ПЖРВ-3.200.28	ГК-1	ПМ-1	
1,000	–	–	100 ПЖРВ-3.200.28
0,957	0,013	0,03	ПЖРВ – (1,3) ГК – (3) ПМ

Суміш початкових порошків перемішували у барабанному млині з ексцентричною віссю обертання (рис. Б.3) протягом 1 години. Змішувач має невисоку частоту обертання осі (50–70 с$^{-1}$), що забезпечує незначний вплив на

зміну гранулометричного складу компонентів. Зразки розміром Ø40×10 мм пресували на гідравлічному пресі при тиску 200–800 МПа.

Зразки спікали в металевих коробках, заповнених Al_2O_3, в електропечі опору неперервної дії в атмосфері водню. Температура спікання 1140–1160 ^{0}C. Час спікання складав 1 годину з моменту встановлення заданої температури.

2.2. Визначення механічних характеристик виробів з композитів на основі порошку заліза

Механічні характеристики визначалися стандартними методами:

– твердість за Брінеллем визначали на твердомірі ТС-БРВ при навантаженні 50 Н (рис. Б. 4);

– випробування на стиск проводили на 3 зразках циліндричної форми діаметром 40 мм і висотою 10 мм на розривній машині ИР5047–50 (рис. Б. 5). Швидкість навантаження 17 мкм/с. Границя міцності визначалася за кривими деформування в координатах σ–ε. За критерій руйнування прийнято появу перших тріщин на бокових поверхнях зразка.

Границю міцності визначали за формулою:

$$\sigma_{ст}=P/F_0, \qquad (2.3)$$

де P – прикладене навантаження, F_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка.

Деформація визначалася як:

$$\varepsilon=[(h_0-h_к)/h_0]\times 100\%, \qquad (2.4)$$

де h_0 і $h_к$ – відповідно початкова і кінцева висота зразка;

– пористість визначалася за формулою:

$$П=\Delta\rho\times 100\%/\rho_{теор.}, \qquad (2.5)$$

де Δρ для зразків із однорідного матеріалу:

$$\Delta\rho = \rho_{теор.} - \rho_{зраз.},$$

де $\rho_{теор}$ для шихти із різнорідних матеріалів: $\rho_{теор.}= \Sigma C^v_i\times\rho_i$, C^v_i – об’ємна доля і-го компонента композиційного матеріалу, ρ_i – густина і-го компонента.

Реальну густину $\rho_{зраз.}$ визначали методом гідростатичного зважування зразка у воді і на повітрі та розраховували за формулою:

$$\rho_{зраз}=m_{пов}\times\rho_{в}/m_{пов}-m_{в}, \quad (2.6)$$

де $m_{пов}$ – маса зразка на повітрі,

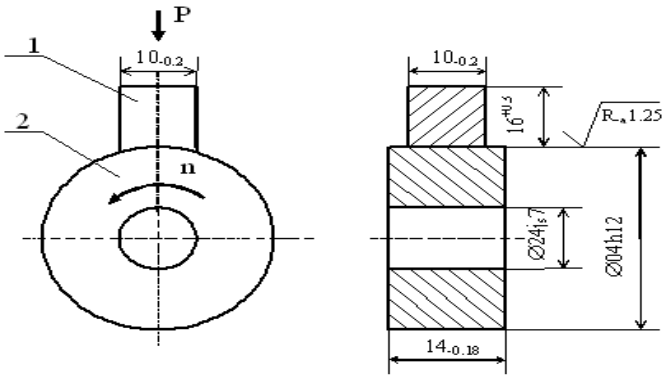
$m_{в}$ – маса зразка у воді,

$\rho_{в}$ – густина води.

2.3. Визначення триботехнічних властивостей виробів з композитів на основі порошку заліза

Для вивчення триботехнічних характеристик спечених виробів, як зазначено у Розділі 1, було вибрано лабораторну дослідницьку машину моделі СМЦ–2 (рис. Б. 6). Машина укомплектована пристроями для тарування її силових систем. Наявність у конструкції машини клино-пасової передачі зі змінними шківами дає можливість проводити дослідження при малих навантаженнях на зразок. Машина працює за двома схемами: із замкнутим кінематичним контуром при фіксованому значенні коефіцієнта проскакування; з відкритим кінематичним контуром, коли один із зразків нерухомий.

Дослідження проводили за другою схемою в режимах граничного тертя і без змащення. Використовували схему контакту вал–вкладиш (рис. 2.4, а). Зразки виготовляли у вигляді паралелепіпеда розміром 10×10×16 мм. Контртіло – із сталі 45 ДСТУ 7809.з твердістю 42–45 HRC після термообробки (рис. 2.4, б).



а б

Рис. 2.4. Схема навантаження „вал–вкладиш” (а) і розміри елементів трибопари (б): 1 – зразок; 2 – контрзразок

Швидкість ковзання до 8 м/с в разі контактного тиску, в парі тертя, до 15 МПа. Навантаження задавали пристроєм, що містить тарувальну пружину.

Вимірювали момент тертя M, величину лінійного зношування та температуру нагрівання зразка.

Момент тертя вимірювали безконтактним індуктивним датчиком за скручуванням торсійного вала, на якому закріплено контртіло. Момент тертя реєстрували самописним потенціометром типу КСП–2.

В лабораторних умовах величину зношування можна визначати одним із методів періодичного визначення зношування шляхом мікрометричного вимірювання, ваговим методом за втратою ваги. Для пористих матеріалів використовувати ваговий метод не доцільно, оскільки проходить насичення матеріалу вуглеводнем, що дає велику похибку, яка деколи перевищує величину зношування.

Величину лінійного зношування визначали за допомогою мікрометра з ціною поділки 0,01 мм.

Температуру вимірювали за допомогою хромо-алюмінієвої термопари, що вводилася в тіло зразка на відстані 2 мм від поверхні тертя.

Коефіцієнт тертя визначали за формулою:

$$f = \frac{2 \times M_{mp}}{d_к \times F}, \tag{2.7}$$

де M_{mp} – момент тертя, Н·мм;

F – навантаження, Н;

$d_к$ – діаметр контртіла, мм.

Зношування визначали як величину лінійного зносу, віднесену до пройденого шляху:

$$I = \frac{h}{v \times t}, \tag{2.8}$$

де I – інтенсивність зношування, мкм/м; h – величина лінійного зносу, мкм;

v– швидкість ковзання, м/с;

t – час ковзання, с.

2.4. Планування експерименту та методика статистичної обробки отриманих результатів

В цілях виявлення оптимального складу композитів на основі порошку заліза та його впливу на триботехнічні характеристики, а також з метою зменшення кількості експериментів проведено математичне планування активного експерименту [22–25].

Для постановки експериментів реалізували напівреплiку повного факторного експерименту 2^{n-1}, де n=4. Рівні факторів та інтервали варіювання встановлювали експериментальним шляхом.

Дисперсію параметра оптимізації визначали за формулою:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - Y_c)}{n-1}, \tag{2.9}$$

де Y_i – отримане значення параметра оптимізації;

Y_c – середнє значення параметра оптимізації;

n – кількість паралельних дослідів.

Коефіцієнти математичної моделі розраховували за формулами:

– вільний член визначали за формулою:

$$B_o = \frac{\sum_{i=1}^{N} Y_i}{N}, \tag{2.10}$$

– коефіцієнти регресії, що характеризують лінійні ефекти, визначали за формулою:

$$B_i = \frac{\sum_{i=1}^{N} X_{ij} \times Y_i}{N}, \tag{2.11}$$

– коефіцієнти регресії, що характеризують ефекти взаємодії, визначали за формулою:

$$B_{il} = \frac{\sum_{i=1}^{N} X_{ij} \times X_{il} \times Y_i}{N}, \quad (2.12)$$

де *i, l* – номер факторів;

j – номер досліду в матриці планування;

Y_j – значення параметра оптимізації в *j*-ому досліді;

X_{ij}, X_{lj} – кодування значень (±1) факторів *i* та *l* в *j*-ому досліді;

N – число дослідів у матриці.

Середнє квадратичне відхилення для коефіцієнтів визначали за формулою:

$$S_{B_i} = +\sqrt{\frac{S_y^2}{N}}. \quad (2.13)$$

Довірчий інтервал коефіцієнта регресії:

$$\Delta_{Bi} = \pm t \times S_{Bi}, \quad (2.14)$$

де t – критерій Ст'юдента.

Критерій Ст'юдента визначається за формулою:

$$t_к = \frac{|b_n|}{|S(b_n)|}, \quad (2.15)$$

де b_i – значення коефіцієнта.

Коефіцієнти рівняння перевіряли на значущість за умовою $t_i > t_{табл.}$ Табличне значення критерію Ст'юдента приймали при рівні статистичної значущості α=5% [23].

Перевірку адекватності опису математичної моделі проводили за F–критерієм Фішера:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}, \quad (2.16)$$

Дисперсію адекватності моделі визначали за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N} (Y_{ej} - Y_{pj})^2}{N - l}. \quad (2.17)$$

Знайдене $F_р$ порівнювали із табличним значенням $F_{табл}$, яке встановлювали для 5–процентного рівня статистичної значущості та числі ступенів вільності $f_{ад}$ =N–l, $f_в$ = N–(n–1) [22].

Таким чином, якщо $F_р<F_т$, то вважали, що математична модель адекватна експериментальним даним і її можна використати для подальших досліджень.

Для отримання узагальнених даних за результатами досліджень для кожного із показників здійснювали не менше 5–ти паралельних випробувань. Отримані результати експериментів піддавали комп'ютерній обробці [24, 26].

Статистична обробка результатів експериментів дозволила визначити з достатнім ступенем надійності досліджувані характеристики матеріалу за допомогою випробувань кінцевого числа зразків. При цьому триботехнічні характеристики не є чітко детерміновані через розбіжність властивостей і складу сировини, варіації параметрів технологічного процесу, а також через похибки методів випробовувань, що обумовлені похибкою контрольно-вимірювальних приладів.

З метою зменшення похибки під час досліджень властивостей та пошуку оптимальних величин проводили п'ять паралельних вимірювань, на базі яких вираховували середнє арифметичне значення:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n}, \qquad (2.18)$$

де y_i – результати окремих дослідів;

$\bar{y}$ – середнє арифметичне значення всіх паралельних дослідів;

n – кількість паралельних дослідів.

Для виключення помилкових значень отриманих величин застосовували критерій Ст'юдента:

$$\frac{y_i - y}{S} \geq t, \qquad (2.19)$$

де y_i – результат окремо взятого досліду;

y – середнє арифметичне всіх результатів;

S – квадратична помилка;

t – табличне значення критерію Ст'юдента.

Квадратичну помилку визначали за формулою:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}(y_i - y)^2}{n}}. \qquad (2.20)$$

Дослід вважали хибним, якщо експериментальне значення критерію було більше за табличне значення: $| t_{експ} | \geq t_{табл.}$

2.4. Висновки до 2-го розділу

Аналізуючи матеріали, оснащення проведення досліджень, механічні та триботехнічні характеристики порошкових виробів із композиційних матеріалів на основі порошку заліза, можна зробити такі висновки:

1. Запропоновано методику визначення механічних властивостей та триботехнічних характеристик.

2. В роботі пропонується комплекс обладнання для отримання виробів з антифрикційного композиту.

3. Розроблені технологічні параметри процесу на стадіях отримання композиту, пресування і спікання.

4. Одним з можливих шляхів використання композиційних виробів є виготовлення антифрикційних пар тертя. З метою оцінювання триботехнічних властивостей для тертя з обмеженим подаванням мастила, вибрана випробувальна триботехнічна машина моделі СМЦ–2, що дозволяє проводити дослідження за різними схемами та умовах реалізації процесу тертя і зношування.

РОЗДІЛ 3

Дослідження триботехнічних властивостей композиційних виробів

3.1. Обладнання і режими отримання спечених антифрикційних виробів із композиційного матеріалу на основі порошку заліза

В даний час найбільш поширений метод одержання виробів шляхом спікання залізо–графітових сумішей, що складаються із залізного порошку і певної кількості графіту.

Технологія виготовлення спечених антифрикційних виробів описується схемою представленою на рис. 3.1. За цією схемою виготовляють матеріали з пористістю 15−35% [27].

Під час використання сумішей, що складаються з металічних порошків, близьких за густиною (наприклад, залізо–мідь), застосовуємо сухе перемішування без тіл розмелу.

Формування виробів із підготовленої шихти здійснюється різноманітними методами: одинарним і подвійним пресуванням з проміжним спіканням, гідростатичним та ізостатичним пресуванням, спіканням під тиском та іншими методами. Значна більшість деталей вузлів тертя пресується із порошків на гідравлічних чи механічних пресах у прес-формах, виготовлених із загартованих сталей або твердих сплавів.

Пресування деталей проводили при однократному пресуванні.

Величина тиску пресування залежить від надійності і пластичності матеріалу, що пресується, наявності змазки, конструкції прес-форм, необхідної кінцевої густини та інших факторів. Так, для пресування виробів із порошку на основі заліза пористістю 15–23 % необхідний тиск 590–690 МПа. В

результаті дослідження встановлено оптимальні параметри пресування 600 МПа.

Для зниження тиску пресування і тиску виштовхування зразка із прес-форми використовували введення у склад шихти 0,1–0,2 % змащувальних речовин, таких як порошкоподібні змазки - стеарат цинку, а також графіт.

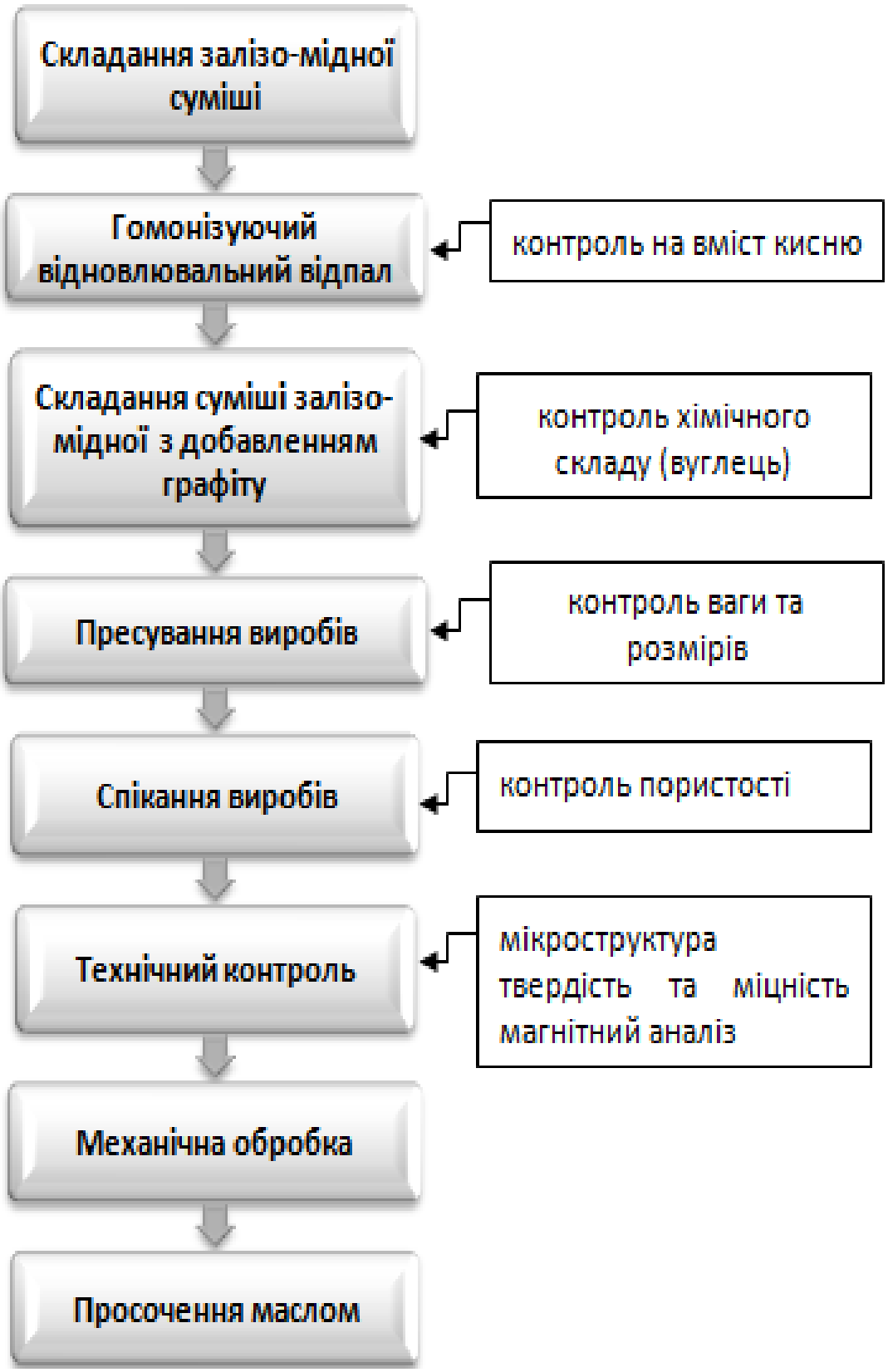


Рис. 3.1. Технологічна схема виготовлення спечених антифрикційних виробів

Однією з головних операцій технології виготовлення виробів методами порошкової металургії є спікання. В його процесі конгломерат із часток речовин, що входять у початкову шихту, перетворюється у композиційний матеріал, який складається з металічної матриці і пор чи із металічної матриці, пор, включень неметалічних, інтерметалічних та інших складових, які залягають в основній металічній матриці і надають матеріалу необхідні властивості. Є велика різноманітність варіантів технологій спікання, серед яких можна виділити такі:

- за характером основного процесу (у твердій фазі і в присутності рідкої фази);
- за характером захисних середовищ (в газовому і відновлювальному середовищі, вакуумі, геометричних коробках з твердою засипкою);
- за характером нагрівання (в електричних печах з радіаційним, індуктивним, електророзрядним нагріванням);
- за типом обладнання (в прохідних чи штовхальних печах).

Для спікання антифрикційних деталей на залізній основі піч нагрівають до температури 1050–1200 ^{0}С. Інтервал температур спікання у більшості випадків вибирають у межах 0,7–0,8 температури плавлення основного металу шихти. У практиці порошкової металургії із більшості захисних середовищ в основному використовують водень, дисоційований аміак, газоподібні вуглеводи (ендо- і екзогази, конвертований природний газ) і вакуум. Значно рідше використовують інертні гази.

Спікання виробів із композиту на основі порошків заліза із вмістом 1,3 % (об.) графіту і міді 3 % (об.) проводили при температурі 1160 ^{0}С у середовищі водню в лабораторній електропечі опору неперервної дії (рис. В.1).

Середовище спікання суттєво впливає на формування мікроструктури матеріалів. Так, спікання в середовищі водню сприяє відновленню оксидів вихідних порошків. Вміст легуючих елементів в основі матеріалу близький до заданого. В інертному середовищі (аргоні) спостерігаються значна пористість матеріалу (за розміром пори більші, ніж частинки початкового матеріалу), недостатнє легування матриці. Це зумовлює низькі механічні властивості.

Незважаючи на широкі можливості модифікування пористих матеріалів введенням у склад шихти, що спікається, антифрикційних присадок [27], досить перспективним напрямком вважається просочення пористого каркаса змащувальними середовищами [27, 28]. Просочення сприяє більш значному підвищенню ефективності самозмазування, ніж введення різноманітних присадок у склад матриці. Найбільш розповсюдженими речовинами для просочення є мінеральні масла [29]. Тому вироби просочували індустріальним маслом ИЛ–40А (ИЛ–50А) Standard VG32. За розробленими технологічними режимами з порошкового композиту отримані вироби антифрикційного призначення із значно нижчою собівартістю і вищим коефіцієнтом використання матеріалу порівняно із традиційними матеріалами [32].

3.2. Властивості виробів із композицій на основі порошку заліза

Основною задачею, що потребує вирішення під час розробки матеріалів триботехнічного призначення, є оптимальне встановлення фізико-механічних властивостей, знаходження технологічних параметрів, що управляють цими властивостями. Для композиційних порошкових матеріалів такими параметрами є: тиск пресування, температура спікання, середовище спікання та інші. Також важливим є технологія отримання порошку, введення в його склад додаткових структурних складових та їх вплив на властивості основи порошкового композиту.

Для дослідження було виготовлено зразки із ПЖРВ-3.200.28 та ПЖРВ – (1,3) ГК – (3) ПМ. Пресуємість оцінювали за величиною залишкової пористості зразків до і після спікання. Спікання - за вмістом залишкового вуглецю, твердості та усадці. Із табл. В.1 випливає, що по мірі зростання кисню в порошковому композиті до 1,3% помітно зростає пористість. Після спікання відзначається незадовільна мікроструктура, що пов’язано із втратами (вигоранням) вуглецю.

Для досягнення необхідної густини та помірної усадки спечених виробів, вміст кисню в матеріалі повинен бути нижчим 1%. Це одна із умов досягнення

технологічних та фізико-механічних властивостей порошкових виробів на основі заліза. Тому для зниження вмісту кисню залізний порошок відновлювали не окремо, а в суміші із мідним (див. рис. В. 2). Відновлена суміш порошків має кращі показники пресуємості, а саме відносну густину пресовки та питоме зусилля виштовхування пресовки із форми (рис. В.3).

Великий вплив на пресування має введення у шихту твердої змазки. Введення у порошкову суміш графіту ефективно впливає на ущільнення та знижує зусилля виштовхування зразка із прес-форми (рис. В.4).

Як видно із графіків для виробів спресованих із композиту досягається підвищення пресуємості і значне зниження зусилля виштовхування пресовок.
В режимі приготування порошкової суміші дуже важливим фактором є інтенсивність і час перемішування. У роботі [30] показано, що змішування залізо-мідної шихти, з компонентами з малою густиною, наприклад графітом, сіркою тощо проводиться регламентовано як за часом операції, так і за швидкістю переміщення порошкових компонентів в робочому просторі змішувача.

Експериментальним шляхом встановлено, що у змішувачі барабанному типу з ексцентричною віссю обертання оптимальним часом перемішування порошкових компонентів є 45–60 хвилин для n=30 об / хв. В результаті чого досягається найбільш однорідна за хімічним складом порошкова суміш із стабільними технологічними властивостями такими як маса насипки та зусилля виштовхування зразків після пресування. Необхідно відмітити, що зусилля виштовхування підчас проведення експериментів досягало за абсолютним значенням мінімальної величини. Спечені зразки у захисному водневому середовищі мають достатньо високі фізико-механічні властивості (табл. В.2).

3.3. Дослідження триботехнічних властивостей композиційних виробів

3.3.1. Вплив пористості на триботехнічні властивості виробів

Величина і характер розподілу пористості антифрикційних порошкових виробів залежить від пластичності порошку, розмірів та форми його частинок.

Основним фактором є умови та режими пресування. Важливим є, щоб величина пористості мала задані межі, розподілялася рівномірно по всьому об'єму виробу, який формується. При цьому повинно одночасно забезпечуватися між часткові металічні контакти і зберігалися необхідні порові канали та для розподілу рідкого мастила в робочій зоні.

Загально відомим є, що пористість пресовок залежить від величини питомого тиску пресування. Рівномірність розподілу пористості за висотою та окремим частинам виробу залежить від його конфігурації (форми), конструкції прес-форми і пресу. Вони забезпечують рівномірність пропресовки всіх частин заготовки Наявність в композиті ефективної змазки знижує тертя порошкового виробу із стінками прес-форми в робочій зоні та між часткове тертя у виробі, що пресується.

Із композиту ПЖРВ – (1,3) ГК – (3) ПМ для дослідження пресували зразки пористості 14–23%. Зразки спікали за температури 1160^0С з витримкою 1 година в атмосфері водню. Було встановлено вплив пористості зразків на їх триботехнічні властивості та твердість після спікання (табл. В.3).

З таблиці В.2 видно, що існують закономірні залежності зносостійкості та коефіцієнта тертя від величини пористості для композиційного порошкового виробу. Оптимальним значенням пористості в досліджуваних зразках є 17%, коли значення зносу - найменше. Коефіцієнт тертя зростає із збільшенням пористості виробу, що є характерним для спечених деталей. Твердість навпаки зменшується.

3.3.2. Вплив режимів спікання виробів на їх зношування

На триботехнічні характеристики впливають також і режими спікання виробів, зокрема час витримування. Для знаходження оптимального режиму спікання, з ціллю досягнення мінімального зношування, використовувався метод математичного планування експерименту. Параметр оптимізації – зношування зразка після спікання, а варіювалися: час витримування під час

спікання X_1 (хв.), температура спікання X_2 (^{0}C), швидкість підняття температури X_3 (^{0}C/хв).

Таблиця 3.3 - Рівні та інтервали варіювання факторів

Найменування	Фактори		
	X_1	X_2	X_3
Основний рівень	60	1160	40
Верхній рівень	90	1200	60
Нижній рівень	30	1120	20
Інтервал варіації	30	40	20

В якості математичної моделі процесу взято поліном виду:

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^{3} B_i \times X_i + \sum_{i=1,\, j=1}^{3} B_{ij} \times X_i \times X_j .$$

Оцінку коефіцієнтів моделі знаходили за експериментальними даними, одержаними в результаті напівреплiки 2^{n-1}, де n=3. Матриця дробового факторного планування і результати дослідів наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 - Матриця планування

№ досліду	X_0	X_1	X_2	X_3	X_{12}	X_{13}	X_{23}	Y
1	1	1	1	1	1	1	1	13,6
2	1	-1	1	-1	-1	-1	1	3,8
3	1	1	-1	-1	-1	1	-1	4,1
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	10,2
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	24,3
6	1	-1	1	1	-1	1	-1	9,2
7	1	1	-1	1	-1	-1	1	12,2
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	6,4

Таблиця 3.5- Коефіцієнти математичної моделі та регресії

B_0	B_1	B_2	B_3	B_{12}	B_{13}	B_{23}
10,59	3,19	2,25	0,83	3,15	–3,75	-1,48

Для визначення дисперсії параметра оптимізації проводили три досліди під час знаходження факторів на основних рівнях.

Дисперсія параметра оптимізації Y: $S_y^2 = 1{,}05$.

Середнє квадратичне відхилення коефіцієнтів регресії визначали за формулою (2.13) $S_{B_i} = 0{,}37$.

Довірчий інтервал коефіцієнта регресії визначали за формулою (2.14), критерій Ст'юдента – за формулою (2.15) $\Delta_{Bi}=\pm 1{,}6$.

Коефіцієнти регресії B_3 та B_{23} за абсолютною величиною менші за довірчий інтервал, тому їх виключили із рівняння як статистично не значимі.

В результаті реалізації всіх дослідів матриці планування і обробки дослідних даних складено рівняння регресії:

$$Y=10{,}59+3{,}19X_1 + 2{,}25X_2 +3{,}15X_{12}–3{,}75X_{13}.$$

Розрахунок дисперсії адекватності моделі $S_{ад}^2$ проводили за формулою (2.17).

Дисперсія адекватності моделі $S_{ad}^2 = 0{,}2733$.

Перевірку математичної моделі проводили за F–критерієм Фішера згідно з формулою (2.16). Розрахункове значення F–критерію: $F_p = 0{,}26$.

Табличне значення F–критерію Фішера при 5-відсотковому рівні значущості та числі степенів волі f=4 становить 9,12.

Таким чином $F_р<F_т$. Відповідно з достовірністю $(1–\alpha)=95\%$ рівняння регресії адекватні експериментальним даним.

Аналізуючи отримане рівняння можна передбачити зношування, що отримується для різних значеннях факторів варіювання (рис. В.5).

Основний вплив на збільшення зносу зразків разом мають такі фактори: температура спікання, час витримки, в меншій мірі швидкість підняття температури.

Встановлено, що оптимальним часом спікання виробів є 60 хвилин. В результаті досліджень виявлено, що для малого часу спікання зношування різко збільшується внаслідок недостатньої міцності зразка. Для часу спікання, що перевищує оптимально встановлений отримується спечений виріб з дефектною структурою пористості, коли порушуються порові канали підводу змазки в зону

тертя. Під час цього відбувається розрив мастильної плівки, схоплювання локальних ділянок пари тертя, що призводить до зростання величини зносу.

На основі проведеного аналізу вибрано оптимальний режим спікання: температура – 1160 ^{0}С, час спікання – 1 год, швидкість нагрівання – 40 ^{0}С/хв.

3.4. Висновки до 3-го розділу

1. Механічні властивості виробів на базі порошку заліза підвищуються введенням міді та графіту, регулюються тиском пресування. Експериментально перевірено на композиті ПЖРВ – (1,3) ГК – (3) ПМ, що по мірі зростання в ньому кисню (до 1,3%) пористість зразка зростає майже 1,5 рази.

2. Для досягнення оптимальних технологічних та фізико-механічних властивостей порошкових виробів на основі заліза запропоновано відновлення залізного порошку в суміші із мідним. В результаті показники пресуємості у 10-15% вищі ніж для ПЖРВ.

3. Додавання 1,3 (об. %) ГК у залізно-мідну порошкову суміш крім підвищення пресуємості також знижує зусилля виштовхування пресовок, що підчас проведення експериментів досягало за абсолютним значенням мінімальної величини 80–120Н/см^2.

4. Експериментальним шляхом встановлено, що у змішувачі барабанному типу з ексцентричною віссю обертання оптимальним часом перемішування порошкових компонентів є 45–60 хвилин (n=30 об / хв.) для досягнення найбільш однорідної за хімічним складом порошкової суміші із стабільними технологічними властивостями.

5. Дослідним шляхом встановлено закономірні залежності зносостійкості та коефіцієнта тертя від величини пористості для композиційного порошкового виробу. Оптимальним значенням пористості в досліджуваних зразках є 17% (I = 4,06 мкм / год; f=0,10). Коефіцієнт тертя зростає із збільшенням пористості виробу, що є характерним для спечених деталей, твердість навпаки зменшується.

6. Методом математичного планування експерименту виявили, що для виробів з композиту ПЖРВ – (1,3) ГК – (3) ПМ основний вплив на збільшення зносу мають такі фактори як температура спікання, час витримки, в меншій мірі швидкість підняття температури.

7. На основі проведеного аналізу вибрано оптимальні параметрами отримання виробів з антифрикційними властивостями із ПЖРВ – (1,3) ГК – (3) ПМ є тиск пресування 600 МПа, температура спікання 1160 ^{0}С, час спікання – 1 год, швидкість нагрівання – 40 ^{0}С/хв.

РОЗДІЛ 4

Вибір та конструювання технологічного оснащення

4.1. Вибір обладнання для формування виробу

В ході дослідження було підібрано обладнання для виготовлення методом пресування деталі типу втулка для серійного виробництва. Зокрема прес-автомат КА-8128 із зусиллям 6,3МН.

Прес вибирали, виходячи з необхідного зусилля пресування, що визначається тиском пресування і площею пресування. Виходячи з цього прес повинен забезпечувати такі необхідні основні параметри як: достатній тиск в потрібному напрямку; можливість регулювання ходу, швидкості пресування та виштовхування; можливість регулювання наповнення прес-форми порошком тощо. Беручи до уваги найбільший розмір деталі, що виготовляється та вище вказані параметри обираємо механічний прес-автомат марки КА. Преси цього типу виконані за схемою виштовхування деталі з матриці нижнім пуансоном. Правильний вибір та налагодження преса має важливе значення, так як забезпечує проведення всього технологічного циклу пресування.

Необхідне зусилля пресування визначають за формулою:

$$P_{пр} = p_{пр} \cdot S_{пр}, \quad (4.1)$$

де $p_{пр}$- потрібний тиск пресування, МН;

$S_{пр}$- площа пресування, $см^2$.

Номінальне зусилля пресу приймається не менше $1,25 \cdot P_{пр}$.

Продуктивність преса визначають за формулою:

$$p_п = 60 \cdot m \cdot К, \quad (4.2)$$

де m - маса однієї деталі, кг;

К - кількість ходів за хвилину.

Передбачається пресування заготовок з максимальною площею пресування 10,55 $см^2$. При цьому тиск пресування беремо в межах 600 МПа ($60КН/см^2$). Щоб вибрати прес, визначаємо його зусилля за формулою:

$$P_{пр} = p_{пр} \cdot S_{пр} \cdot 1{,}25 \qquad (4.3)$$

$$Рпр = 60 \cdot 10{,}55 \cdot 1{,}25 = 791 \text{ кН}$$

Одним з основних є також параметр максимальної висоти камери засипки:

l_n - пружна післядія (в діаметральній площині – 0,17% від діаметру, за вертикаллю – 0,5% від висоті пресовки).

$$H_{пр} = H_с \cdot k_{ус} - l_п = 40{,}0 - 0{,}2 = 39{,}8 \text{ мм}$$

Визначення висоти завантажувальної камери:

$$H_к = H_{пр} \cdot k_{об} = 39{,}8 \cdot 3{,}09 = 112{,}98 \text{ мм}$$

де $k_{об}$ – коефіцієнт обтиснення, визначаємо з рівняння.

$$k_{об} = \gamma_{пр} / \gamma_н = 7{,}595 / 2{,}46 = 3{,}09$$

де $\gamma_{пр}$.і $\gamma_н$ – густина матеріалу в спресованому і насипному стані.

Приймаємо прес-автомат КА8128 (рис. Г.2). Кінематична схема пресу КА8128 наведена на рис. Г.1. Опис типової конструкції преса наведено у додатку Г. Вибраний прес-автомат виконує такі операції: насипання порошку з бункера в касету живильника, заповнення матриці порошком, пресування виробу, виштовхування виробу з матриці, зштовхування готового виробу в лоток. В початковому положенні головка для пресування знаходиться вгорі преса, а виштовхувач знаходиться в проміжному положенні, касета знаходиться над матрицею, центральний стрижень - в нижньому положенні врівень з пуансоном. Під час включення пресу виштовхувач опускається разом з центральним стержнем, а матриця заповнюється порошком. В кінці ходу виштовхувач опускається на упор та регулює глибину камери засипки. Одночасно командо-апарат подає повітря в нижню порожнину циліндра центрального стрижня. Центральний стрижень переміщається в вгору і виштовхує надлишок композиту порошків назад в касету. Касета відводиться назад. Верхній пуансон доходить до рівня матриці. Починається пресування. Під час зворотного ходу пресова головка блоку матриці, виштовхувач і центральний стрижень рухаються вгору. Це відбувається поки блок матриці не дійде до верхніх упорів. Далі виріб виштовхується та виходить з матриці. В результаті чого заготовка, розширюється. Відбувається звільняння

центрального стрижня, і він йде вниз, після чого касета ходом вперед зіштовхує виріб. Далі весь цикл повторюється.

4.2. Розрахунок прес-форми

Для отримання втулки (рис. 4.1) з заданими розмірами розрахована прес-форма. Обрано найбільш поширений варіант формування – холодне пресування металевих порошків в сталевий прес-формі. Конструкція прес-форми повинна забезпечити отримання необхідних властивостей деталей, в першу чергу, рівномірну щільність по всьому перетину вироби. Для отримання рівномірно розподіленим по всьому об'єму щільності деталі можна застосувати принцип одностороннього пресування в сталевий прес-формі. Одностороннє пресування застосовується для деталей простої форми, у яких відношення [31]: H/D>1; H/S>3;

де H - висота деталі, D - діаметр деталі, S - товщина стінки.

Основою для проектування прес-форми є схема пресування, яка в свою чергу визначається складністю конфігурації пресованої заготовки. Деталь втулка належить до II групи. Це – деталі, з незмінним перерізом по висоті, обмежені двома паралельними площинами, з одним або декількома отворами в напрямку пресування. Відношення висоти (h) до мінімальної товщини стінки (δmin) таких деталей $h / \delta min \leq 8$.

Прес-форма, яка використовувалася для виготовлення зразків, наведена на рис. 4.2. Чистота робочих поверхонь прес-форми відповідала класу шорсткості не нижче 10 (ДСТУ 7809 -2015).

Пресування заготовок здійснювали у кілька етапів (рис. Г.3). Перед кожним циклом пресування внутрішня поверхня прес-форми протиралась чистою ганчіркою. Потім в порожнину матриці попередньо зібраної прес-форми засипали приготоване навішуванні шихти. На наступному етапі виконувалось пресування шихти шляхом передачі тиску через верхній рухливий пуансон. Після пресування зразок видалявся з матриці, як показано на рис. Г.3, в.

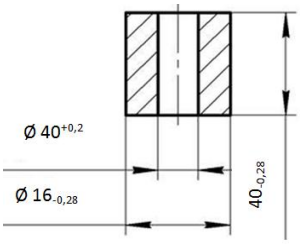


Рис. 4.1. Ескіз та загальний вигляд втулки

Рис. 4.2. Прес-форма циліндрична: 1 – матриця; 2 – верхній пуансон; 3 – нижній пуансон; 4 – втулка для випресування циліндричних зразків.

Необхідна висота засипки порошку [31]:

$$H_{зас} = \frac{\gamma_в}{\gamma_п} \cdot h_в, \qquad (4.4)$$

де $\gamma_в$ - щільність пресування, г/см^3, $\gamma_в$ = 7,596 г/см^3 (розраховується за правилом адитивності),

$\gamma_п$ - насипна вага порошку, г/см^3, $\gamma_п$ = 2,46 г/см^3,

$h_в$ - висота спресованого виробу.

$$H_{зас} = \frac{7,596}{2,46} \cdot 40 = 123,51мм$$

Конструкція прес-форми для пресування втулки наведена на рис. Г.4. Робота прес-форми полягає в наступному. Після того, як верхній пуансон 2 під тиском преса стане врівень з матрицею, необхідно зняти тиск, перевернути прес-форму, зняти підставку 7 і вкладиш 6 і запресувати нижній пуансон врівень з матрицею. Після випресовки з матриці деталь, завдяки явищу пружного післядії, яке пов'язане з мимовільним збільшенням розмірів пресування при знятті з неї тиску в результаті дії внутрішніх напружень, що виникають в процесі ущільнення порошку, дещо збільшується в розмірах і легко знімається зі стрижня.

Висота матриці розраховується за формулою [31]:

$$L_{мат} = H_{зас} + l = 124+20 = 144 \text{ мм},$$

де $H_{зас}$ - висота необхідного шару засипки,

l - довжина неробочої частини матриці, яка включає в себе довжину вхідної частини під верхній і ніжній пуансони, l = 150...200 мм.

Знаючи довжину матриці визначаємо необхідну висоту пресування:

$$L_{пр}=3\ L_{мат}+100=3\cdot144+150=582 \text{ мм.}$$

Охоплючий розмір:

$$D_{мат} = D_в \pm \frac{A}{2} - \frac{D_в \cdot \alpha}{100} + \frac{D_в \cdot \beta}{100},$$

де А - допуск на діаметр,

α – пружня післядія,

β - величина усадки (в даному випадку не враховується).

$$D_{мат} = 40 + 0{,}05 = 40{,}05 мм$$

Діаметр стрижня: $D_{ст} = D_B \pm \frac{A}{2}$,

$$D_{ст} = 16 - 0{,}05 = 15{,}95 мм$$

Зовнішній діаметр матриці і розміри обойми приймаємо виходячи з таких міркувань (рис. 4.3):

$D_{Мзов} \geq 1{,}5\ d$; $D_{Мзов} = 60$ мм.

$D_{Озов} \geq 2{,}0\ d$; $D_{Озов} = 90$ мм

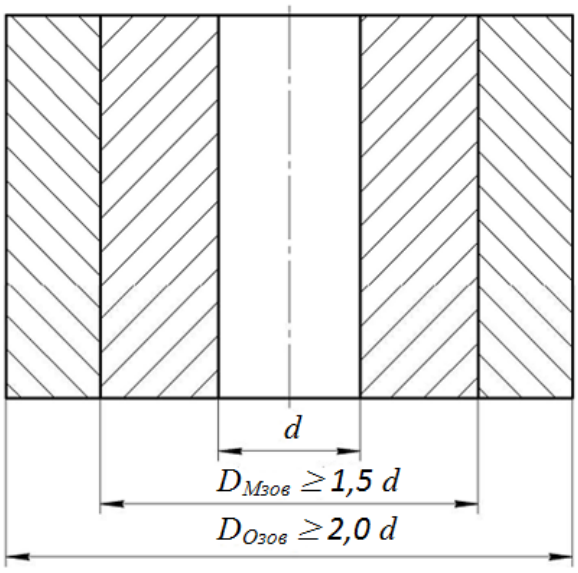


Рис. 4.3. Ескіз матриці

Для поліпшення процесу ущільнення і зменшення зовнішнього тертя, що виникає між частинками порошку і стінками прес-форми, для змащування стінки прес-форми використовували мастило - оливу машинну.

Для виготовлення втулки був використаний порошковий композит: залізо, мідь, графіт котрий у певних дозуваннях засипався у прес-форму.

Величина навішування [31]:

$$Q_1 = \gamma_K \cdot V\left(1 - \frac{П}{100}\right) \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (4.5)$$

де $\gamma_к$ - щільність різнорідних порошкових компонентів, г/см^3;

V - об'єм спеченого вироби, см^3;

П - фактична пористість спеченого матеріалу, %;

$К_1$ - коефіцієнт, що враховує втрати порошку при пресуванні і залежить від точності виготовлення деталей прес-форм, $К_1$ = 1,005 ... 1,01;

$К_2$ - коефіцієнт, що враховує втрату маси брикетом при спіканні в результаті відновлення оксидів і видалення домішок, $К_2$ = 1,01 ... 1,03.

$\gamma_к$ визначається за формулою адитивності:

$$\gamma_K = \frac{100}{\frac{a_1}{\gamma_2} + \frac{a_2}{\gamma_1} + \ldots + \frac{a_n}{\gamma_n}}, \quad (4.6)$$

де γ_1, γ_2 ... $\gamma_п$ - щільності окремих компонентів суміші, г/см^3;

a_1, a_2 ... $a_п$ - зміст окремих компонентів суміші, %.

$$\gamma_к = \frac{100}{\frac{95,7}{7,8} + \frac{3}{8,8} + \cdots + \frac{1,3}{2,2}} = 7,56 \text{ г/см}^3$$

Визначаємо об’єм деталі:

$$V = \frac{\pi D_{ПР}^2}{4} \cdot h, \; V = \frac{\pi(4^2 - 1,6^2)}{4} \cdot 4 = 42,2 \text{см}^3 \text{ см}^3$$

4.3. Розрахунок деталей прес-форм на міцність

4.3.1. Тиск пресування [31]

Повний тиск пресування складається з витрат тиску на ущільнення порошку і втрат тиску на зовнішнє тертя частинок об стінки матриці.

Витрати тиску на ущільнення порошку:

$$P_{пр} = P \cdot \frac{3,14}{4}(D^2 - d^2), \quad (4.7)$$

де Р - питоме зусилля за результатами проведених досліджень.

$$P_{\text{пр}} = 600 \cdot \frac{3{,}14}{4}(40^2 - 16^2) =) = \text{ 6330 МПа}$$

Втрати на тертя складають 30% від зусилля пресування $P_{тр}$=1899 МПа

Визначаємо тиск пресування: $P_{об}=P_{пр}+P_{тр}$= 8229 МПа

4.3.2. Бічний тиск [31]

Величина бічного тиску залежить від матеріалу пресованої шихти і заданої щільності вироби. Значення бокового тиску можна знайти, помноживши значення питомої зусилля на коефіцієнт бокового тиску. Коефіцієнт бокового тиску знаходження за формулою:

$$\zeta = C \cdot \gamma^m, \tag{4.8}$$

де C = 0,00153; m = 2,85; γ – насипна густина (7,595 г/см^3);

$\xi = 0{,}00153 \cdot 7{,}595^{2{,}85} = 0{,}29$; $P_б = P_{пр} \cdot \xi = 6330 \cdot 0{,}29 = 1836$ кг

4.3.3. Розрахунок матриці [31]

Матриця являє собою циліндр, який навантажений внутрішньому тиском на частині його довжини. Вважаємо, що тиск розподіляється рівномірно, а матеріал матриці однаково працює як на розтяг, так і на стиск. Для обчислення напружень застосуємо формули Ляме. Дійсне напруження і деформацій поперечних шарів матриці під час пресування порошкових матеріалів будуть дещо менше розрахункових, так як тиск додається тільки на частину довжини матриці. Відповідно до формул Ляме найбільша напруга на внутрішній поверхні $\sigma_r = -p_б$

$$\sigma_r = P_б \cdot \frac{a^2 + 1}{a^2 - 1}, \tag{4.9}$$

де $P_б$ – бічний тиск на стінку матриці.

$$a = \frac{r_з}{r_в}, \tag{4.10}$$

де $r_з$ – зовнішній радіус матриці;

$r_в$ – внутрішній радіус матриці.

Після підстановки значень σ_τ та σ_r в формулу знаходимо $\sigma_{екв}$

$$\sigma_{екв} = P_б \cdot (\frac{a^2 + 1}{a^2 - 1} + 1), \quad (4.11)$$

Умови міцності визначаються залежністю: $\sigma_{екв} \leq [\sigma_р]$,

де $[\sigma_р]$ - допустиме напруження на розрив для матеріалу матриці; для сталі 1500…2000 кг/см^2.

$$a = \sqrt{\frac{[\sigma_p]}{[\sigma_p] - 2 \cdot P_б}}, \quad (4.12)$$

$$a = \sqrt{\frac{1500}{1500 - 2 \cdot 1{,}836}} = 1{,}001; \quad \sigma_{екв} = 1{,}836 \cdot \left(\frac{1{,}001^2 + 1}{1{,}001^2 - 1} + 1 \right) = 1840 \text{ кг/см}^2$$

Отже умова міцності виконується.

Виготовляється матриця із матеріалу сталь інструментальна NC11LV стандарт - PN/H 85023 (Польща), що є аналогом сталі **Х12МФ** ДЕСТ 5950-2000. Характеристики матеріалів, що використовуються для виготовлення прес-форм наведено у табл. Г.1.

4.3.4. Розрахунок пуансонів [31]

Під час роботи пуансони стискаються, а також мають вигин по довжині. Оскільки пуансони виготовляються із загартованої сталі NC11LV то допустиме напруження для стискання становить $[\sigma_{ст}]$=1760 МПа.

Перевіряємо пуансони на стиснення за формулою:

$$\sigma_{ст} = \frac{p}{S_p} \leq [\sigma_{ст}], \quad (4.13)$$

де $\sigma_{ст}$ – напруження стиснення, що виникає у пуансоні;

S_p – площа найменшого перерізу пуансону;

p – тиск пресування;

$[\sigma_{ст}]$ – допустиме напруження на стиск для загартованої сталі.

$$\sigma_{ст} = \frac{8229}{10{,}55} = 780 \leq [\sigma_{ст}] = 1760 МПа$$

4.4. Висновки до 4-го розділу

За результатами проведених досліджень на основі необхідного зусилля пресування, вибрано для виготовлення методом пресування деталі типу втулка,

прес-автомат КА-8128 із зусиллям 6,3МН. Обладнання вибрано на основі розрахунків тиску пресування і площі пресування.

Обрано формування виробу – холодне пресування композиту порошків в сталевій прес-формі за принципом одностороннього пресування. В результаті досягається рівномірно розподілена по всьому об'єму щільність заготовки.

Розроблено конструкцію прес-форми для пресування втулки. Розраховані її конструктивні елементи.

Проведені розрахунки деталей прес-форми на міцність. Зокрема, визначено тиск пресування та бічний тиск. Необхідні умови міцності матриці, а саме допустиме напруження на розрив (184 МПа $\leq [\sigma_р]$ =200 МПа) та допустиме напруження на стиск для пуансонів (780 МПа $\leq [\sigma_{ст}]$=1760 МПа), виконуються.

РОЗДІЛ 5

Оцінка очікуваної економічної ефективності

5.1. Розрахунок витрат на проведення дослідження

Розрахунок усіх витрат, пов'язаних з виконанням дослідних робіт, проводимо на основі встановлення собівартості.

До планової собівартості входять такі статті витрат [32]:

- заробітна плата науково-дослідницького персоналу;
- єдиний соціальний внесок;
- вартість спеціального обладнання;
- вартість матеріалів;
- витрати на службові відрядження;
- інші прямі невраховані витрати по темі;
- накладні витрати.

Витрати на оплату праці розраховують на основі даних про трудомісткість виконання певних видів робіт та посадових окладів їх виконавців (табл. 4.2).

Таблиця 5.1 – Трудомісткість виконання дослідження

Етапи виконання дослідження	Керівник - дослідник	Лаборант - дослідник	Студент - дослідник
Огляд літератури за темою дослідження	12	-	8
Вибір матеріалів та техніка експериментальних досліджень	8	-	6
Розробка методики дослідження	4		6
Виготовлення зразків для дослідження		15	8
Дослідження властивостей	-	4	5
Дослідження триботехнічних властивостей композиційних виробів	-	6	5
Вибір, підготовка та конструювання технологічного оснащення	-	4	6
Обробка на аналіз результатів дослідження	3	-	4
Оформлення результатів роботи	2	-	8
Всього	29	29	56

Таблиця 5.2 – Розрахунок витрат на оплату праці

Виконавці	Планова трудомісткість, люд-днів	Заробітна плата, грн	
		середньоденна зарплата	за виконавцями
Керівник - дослідник	29	861,4 5	24982
Лаборант - дослідник	29	497,4	14425
Студент - дослідник	56	364,6	20418
Разом			59825

Єдиний соціальний внесок становить 22%. Тобто 59825·0,22 =13161 грн.

Витрати на матеріали необхідні для проведення досліджень розраховуємо на основі ціни і кількості використаного матеріалу (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Розрахунки витрат на матеріали

Назва матеріалу	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, гр	Сума, грн
Порошок заліза	кг	6,5	60	390
Порошок міді	кг	0,5	808	404
Порошок графіту	кг	0,3	80	24
Олива ИЛ–40А	кг	0,5	79	39,5
Порошок Al_2O_3	кг	10	80	800
Пруток сталі 45	шт.	1	100	100
Разом				1758

Транспортно-заготівельні витрати становлять 10 % від вартості витрат на матеріали: 1758·0,1=175,8 грн.

Загальна сума витрат на матеріали: 1758+175,8=1933,8 грн.

Витрат на спеціальне обладнання не передбачалось. Всі дослідження проводились на наявному обладнанні в лабораторіях кафедри ПМ та М ЛНТУ.

Витрати на службові відрядження не передбачені, оскільки роботи проводилися на базі лабораторій ФТМІ.

Інші прямі невраховані витрати становлять 10% від суми прямих витрат на дослідницткі роботи.

Тобто: (59825+ 13161+ 1933,8) · 0,1 = 7492 грн.

Накладні витрати по темі дослідження складають 20% від суми всіх прямих витрат: (59825+ 13161+ 1933,8+ 7492) · 0,2=16482,4 грн.

5.2. Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості дослідження

Розрахунок за всіма статтями витрат наведено у табл. 5.4

Таблиця 5.4 – Планова калькуляція кошторисної вартості

Статі витрат	Сума, грн	Обґрунтування
1. Витрати на оплату праці	59825	за розрахунками табл. 5.2
2. Єдиний соціальний внесок	13161	22,0 % від загальних витрат на оплату праці
3. Вартість матеріали для проведення досліджень	1933,8	за розрахунками
4. Вартість енергоносії для проведення досліджень	-	включено до статті накладні витрати
5. Вартість спецобладнання для наукових досліджень	-	не передбачені
6. Вартість послуг сторонніх організацій	-	включено до статті накладні витрати
7. Витрати на службові відрядження	-	не передбачені
8. Інші невраховані прямі витрати	7492	10 % від суми прямих витрат по темі
9. Накладні витрати	16482,4	20 % від суми прямих витрат
10. Всього витрат	$\Sigma_к$ = 98896,16	сума попередніх статей

5.3. Економічна ефективність

Очікуваний річний економічний ефект визначали за бальною системою оцінювання економічної ефективності [32]. Для користувалися такими показниками (табл. Д.1):

- важливість дослідження ($К_1$);
- можливість використання результатів дослідження ($К_2$);
- теоретичне значення та рівень новизни ($К_3$);
- складність дослідження ($К_4$).

Загальна оцінка: $К_1 \cdot К_2 \cdot К_3 \cdot К_4 = 3 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 6 = 540$.

Умовний ефект дослідження розраховується за формулою:

$$Е^у = 500 \cdot (К_1 \cdot К_2 \cdot К_3 \cdot К_4) - Е_н \cdot \Sigma_к , \quad (5.1)$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

$Е_Н$ – нормативний коефіцієнт економічної ефективності, $Е_н = 0,1 – 0,3$;

$\Sigma_к$ – калькуляція кошторисної вартості.

$Е^у = 500 \cdot 540 – 0,2 \cdot 98896,16 = 250220,8$ грн.

Економічна ефективність визначалася за формулою:

$$E_e = \frac{E^y}{\sum к}. \quad (5.2)$$

$$E_e = \frac{250220,8}{98896,16} = 2,5$$

Оскільки $E_e > 1$ то проведене дослідження за темою роботи є економічно обґрунтованим.

5.4. Висновки до 5-го розділу

В роботі проведено визначення економічного ефекту для експериментальних робіт. Оскільки саме до таких робіт відносяться, дослідження у галузі технології металів та виготовлення виробів із встановленими властивостями. Маючи теоретичний характер вони можуть бути використані для вдосконалення матеріального виробництва.

Оцінка економічної ефективності результатів дослідницької роботи виконувалася для виявлення доцільності її впровадження. Так розраховано планова калькуляцію кошторисної вартості проведення досліджень за темою роботи, що становить 98896,16 грн. Значних витрат вдалося уникнути оскільки дослідження проводились на наявному обладнанні в лабораторіях ЛНТУ.

Встановлено умовний економічний ефект дослідження 250220,8 грн. Підтверджено доцільність проведення робіт з підвищення триботехнічних характеристик виробів машинобудівного виробництва розрахунком економічної ефективності, що становить 2,5.

ВИСНОВКИ

В роботі реалізований підхід до вирішення проблеми формування механічних властивостей та триботехнічних характеристик порошкового композиту залізо–мідь–графіт, який полягає в аналізі складу та оптимізації технології отримання виробів з нього, що є актуальною науково-технічною задачею.

З проведеного аналізу літературних джерел за темою магістерської кваліфікаційної роботи випливає, що оптимальний вибір складу і кількості компонентів порошкових композитів, а також технологічних параметрів отримання виробів впливає на підвищення механічних та триботехнічних характеристик.

В роботі розроблено технологічні параметри процесу для отримання виробів з антифрикційного композиту та його апаратна реалізація. Запропоновано методику визначення механічних властивостей та триботехнічних характеристик. Зокрема для визначення тертя, вибрана випробувальна триботехнічна машина моделі СМЦ–2. Це дає змогу виконувати дослідження за різними схемами та умовах реалізації процесу тертя і зношування з обмеженим подаванням оливи.

В результаті досліджень встановлено, що механічні властивості виробів порошкового композиту підвищуються із-за вмісту міді та графіту, а також регулюються тиском пресування. Експериментально перевірено на композиті ПЖРВ – (1,3) ГК – (3) ПМ, що по мірі зростання в ньому кисню (до 1,3%) пористість зразка зростає майже 1,5 рази. В роботі запропоновано проводити відновлення залізного порошку в суміші із мідним. Оскільки при цьому досягаються оптимальні технологічні та фізико-механічні властивості спечених виробів із ПЖРВ – (1,3) ГК – (3) ПМ. Так, наприклад введені міді підвищує пресуємість на 10-15% у порівнянні ПЖРВ, а введення графіту знижує зусилля виштовхування пресовок до 80–120Н/см^2.

Дослідним шляхом встановлено закономірні залежності зносостійкості та коефіцієнта тертя від величини пористості для композиційного порошкового виробу. Оптимальним значенням пористості в досліджуваних зразках є 17% (*I* = 4,06 мкм / год; *f*=0,10). Коефіцієнт тертя зростає із збільшенням пористості виробу, що є характерним для спечених деталей, твердість навпаки зменшується.

Методом математичного планування експерименту виявили, що для виробів з композиту ПЖРВ – (1,3) ГК – (3) ПМ основний вплив на збільшення зносу мають такі фактори як температура спікання, час витримки, в меншій мірі швидкість підняття температури.

Вибрано оптимальні параметрами отримання втулки вихлопних клапанів автомобілів з антифрикційними властивостями із ПЖРВ – (1,3) ГК – (3) ПМ: тиск пресування 600 МПа, температура спікання 1160 ^{0}С, час спікання – 1 год, швидкість нагрівання – 40 ^{0}С/хв. Обрано схему формування виробу, обладнання. Розроблено конструкцію прес-форми для пресування втулки. Проведені її конструктивні та міцнісні розрахунки.

Проведено оцінку економічної ефективності (E_e=2,5), що вказує на доцільності проведеного дослідження. Встановлено умовний економічний ефект дослідження 250220,8 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Триботехнічні матеріали. URL: http://www.tsatu.edu.ua/tstt/wp-content/uploads/sites/6 (дата звернення: 25.05.2023).
2. Закалов О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування в машинах: навчальний посібник. Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 322 с.
3. Косторнов А.Г. Триботехнічні характеристики композиційного матеріалу на основі заліза при температурі 500 °С. *Порошкова металургія*. 2014. №07/08. С.43-50.
4. Роїк Т.А., Гавриш О.А., Віцюк Ю.Ю., Хмілярчук О.І. Нові композиційні матеріали на основі міді для важконавантажених вузлів тертя. *Порошкова металургія*. 2017. №09/10. С.40-48
5. Вішневська-Вейнерт Х. Тертя і знос пористих підшипників ковзання при високій температурі. Вплив твердого мастила з наночасток MoS2. *Порошкова металургія*. 2013. № 07/08. С.77-84.
6. Попович В.В. Технологія конструкційних матеріалів **і** матеріалознавство**:** підручник**.** Львів : Світ, 2006. – 624 с.
7. Власенко А.М. Матеріалознавство та технологія металів: підручник. Літера ЛТД, 2019. – 224 с.
8. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування / Фролов Є.А. та ін.: монографія. Полтава, 2019. 204 с.
9. Kostornov A. Tribotechnical material science: monograph. Lugansk, Ukraine: Nouly, 2012. p. 701.
10. New composite materials for friction parts of printing machines / Roik.T. et al.:monograph. Kyiv, Ukraine: Politekhnica, 2014. p. 427.
11. Баглюк Г.А., Куровський В.Я., Костенко О.Д., Максимова Г.А., Молчановська Г.М. Структура, механічні та триботехнічні властивості металоскляних композитів на основі модифікованих залізовуглецевих сплавів. *Порошкова металургія*. 2017. №11/12. С.58-67.
12. Савчук П.П., Косторнов А.Г., Кашицький В.П., Садова О.Л. Особливості зношування модифікованих епоксидних композитів при навантаженні тертя. *Порошкова металургія*. 2014. №03/04. С.103-109.
13. Косторнов А.Г., Фущич О.І., Горбань В.Ф., Чевичелова Т.М., Костенко О.Д. Вплив параметрів сухого тертя на формування вторинних структур у зоні трибосинтезу композиційного антифрикційного матеріалу на основі заліза. *Порошкова металургія*. 2012. №07/08. С.48-58.
14. Кіндрачук М. В., Лабунець В. Ф., Пашечко М. І., Корбут Є. В. Трибологія: підруч. Київ : Вид-во Нац. авіа. ін-ту «НАУ – друк», 2009. – 392 с.

15. Термінологічний словник-довідник з трибології (український, російський, англійський): навчальний посібник / Богуслаєв В. О. та ін. / за заг. ред. Л. Й. Івщенка. Запоріжжя: ПАТ Мотор Січ, 2018. 218 с.
16. Дмитриченко М.Ф., Мнацаканов Р.Г., Мікосянчик О.О. Триботехніка та основи надійності машин: навчальний посібник. Київ : Інформавтодор, 2006. 216 с.
17. Гальчук Т.Н., Рудь В.Д. Використання відходів машинобудівного виробництва для виготовлення деталей триботехнічного призначення: монографія. Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2013. 214 с.
18. Зозуля В.Д., Шведков Е.Л., Ровинский Д.Я., Браун Э.Д. Словник-довідник по тертю, зносу і змащенню деталей машин. К.: Наукова думка, 1990. 264с.
19. Довідник по тертю, зносу і змащенню деталей машин / за ред. І. М. Федорченко]. – К.: Наукова думка, 1990. 258 с.
20. Аксьонов О., Стельмах О., Шимчук С., Коба В., & Мансур, Д. І. Methodology of properties protyspratsovuvalnyh lubricants by tryboharakterystyk formed in their secondary structures. *Proceedings of National Aviation University*. 2006. *28*(2), P. 62–64. URL: https://doi.org/10.18372/2306-1472.28.1340
21. Гальчук Т.Н. Методики і установки для визначення триботехнічних властивостей порошкових матеріалів (огляд). *Наукові нотатки (серія технологія машинобудування)*. Луцьк: ЛІІ, 1994. С. 64–70.
22. Дубовой В.М., Квєтний Р.Н., Михальов О.І., Усова А.В. Моделювання та оптимізація системи: підручник. Вінниця: ПП «ТД Едельвейс», 2017. 804с.
23. Пальчевський Б.О. Дослідження технологічних систем (моделювання, проектування, оптимізація): навч. посібник. Львів: Світ, 2001. 232 с.
24. Лазарєв Ю. Ф. Моделювання на ЕОМ: навчальний посібник. К.: Політехніка, 2007. 290 с.
25. Барабащук В.И., Креденцер Б.П., Мірошниченко В.І. Планування експерименту в техніці. К.: Техніка, 2014. 200с.
26. Завіша В.В., Гальчук Т.Н. Застосування засобів ЕОМ при обробці даних активного експерименту. *Науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво»*. 2012, № 1. С. 52–57.
27. Гальчук Т.Н., Рудь В.Д. Технологія отримання порошкових виробів конструкційного призначення в машинобудуванні. *Вісник Севастопольського національного технічного університету*. 2012, № 128. С. 32−36.
28. Попівненко Л.В., Руденко Н.А. Поліпшення експлуатаційних властивостей спечених самозмащувальних підшипників ковзання за рахунок застосування при виготовленні пороутворюючих речовин та антифрикційних присадок.

Ресурсохоронні технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. *Збірник наукових праць*. 2010. С. 70-76

29. Гальчук Т.Н., Божко Т.Є. Аналіз факторів, що впливають на зношування композиційних матеріалів. *Наукові нотатки*. 2017, №58. С.65-68.
30. Goncharyuk A. O., Khomenko O. V., Nayda Y. I. Features of electrolytic copper powder milling in different type mills. *Electrical contacts and electrodes*. 2014, №58. С.55-64.
    URI: http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/103986 (дата звернення: 15.09.2023).
31. Бондаренко В. П., Аронін І . Я. Проектування прес-форм. К. : Наукова думка, 1983. 184 с.
32. Карпов В. А., Корольова Т. С. Павлова Т. В. Методи оцінки ефективності науково-дослідних робіт. *Вісник соціальноекономічних досліджень*. Одеса : ОДЕУ. 2004, Вип. 16. С. 83-89.

ДОДАТКИ