#### РЕФЕРАТ

Магістерська робота за темою: «Дослідження впливу модифікаторів на фрикційні характеристики гальмівних колодок з аустенітного сірого чавуна»: 74с., 18 табл., 26 рис., 30 джерел посилання.

## ФРИКЦІЙНИЙ ЧАВУН, ПЛАСТИНЧАСТИЙ ГРАФІТ, МОДИФІКАТОР, ВТОРИННИЙ ЦЕМЕНТИТ, ЛЕДЕБУРИТ, АУСТЕНІТ, МІКРОСТРУКТУРА, ОПТИЧНА МІКРОСКОПІЯ, ІНТЕНСИВНІСТЬ ЗНОШУВАННЯ, ПОВНИЙ ФАКТОРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ.

Об'єктом дослідження у даній магістерській роботі є процес мікролегування аустенітного фрикційного сірого чавуна.

Метою магістерської роботи є підвищення ресурсу роботи гальмівних колодок за рахунок мікролегування аустенітного фрикційного сірого чавуна.

Методи дослідження – оптична мікроскопія, макроаналіз, статистичні методи обробки експериментальних даних, регресійний аналіз.

У першому розділі проаналізовано вплив модифікаторів на мікроструктуру та властивості аустенітних фрикційних сірих чавунів.

У другому розділі наведено методику експерименту.

У третьому розділі досліджено вплив лігатур ЦИСМ та СіітМіш на мікроструктуру аустенітного фрикційного сірого чавуну.

У четвертому розділі оптимізовано хімічних склад аустенітного фрикційного сірого чавуну за мінімальною інтенсивністю зношування.

## **3MICT**

C.
СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ4
ВСТУП5
1 СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ВИБОРУ СИСТЕМИ ЛЕГУВАННЯ
ТА МІКРОЛЕГУВАННЯ ФРИКЦІЙНИХ СІРИХ ЧАВУНІВ6
1.1 Характеристика фрикційного зносу матеріалів
1.2 Сірі фрикційні чавуни8
2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ
З РЕЗУЛЬТАТИ МЕТАЛОГРАФІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ
АНАЛІЗ
3.1 Еталонні мікроструктури для оцінки кількості, розподілу та
розмірів включень графіту і цементиту в чавунах
3.2 Вплив модифікаторів на кількість, розподіл та розміри
включень цементиту40
3.3 Вплив модифікаторів на кількість, розподіл та розміри
включень графіту48
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ
ФРИКЦІЙНИХ СІРИХ ЧАВУНІВ
4.1 Матриця плану експерименту. Аналіз вихідних даних
<ul><li>4.1 Матриця плану експерименту. Аналіз вихідних даних</li></ul>
<ul> <li>4.1 Матриця плану експерименту. Аналіз вихідних даних</li></ul>
<ul> <li>4.1 Матриця плану експерименту. Аналіз вихідних даних</li></ul>
<ul> <li>4.1 Матриця плану експерименту. Аналіз вихідних даних</li></ul>
<ul> <li>4.1 Матриця плану експерименту. Аналіз вихідних даних</li></ul>
<ul> <li>4.1 Матриця плану експерименту. Аналіз вихідних даних</li></ul>

#### СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

- Н мікротвердість, МПа.
- НВ твердість за Бринелем.
- HV твердість за Вікерсом.
- HRC твердість за Роквелом.
- $\delta$  відносне подовження, %.
- $\sigma_m$  межа текучості, МПа.
- $\sigma_{e}$  межа міцності, МПа.
- $\sigma_{0,2}$  умовна межа текучості, МПа.
- $\sigma_{-1}$  границя втоми, МПа.
- $\psi$  відносне звуження, %.
- $\mu$  коефіцієнт Пуасона.

#### ВСТУП

Як відомо, гальмування відбувається в умовах сухого тертя. Отже, фрикційний знос при гальмуванні є специфічним нестаціонарним процесом, що супроводжується значною зміною мікроструктури поверхневих шарів контактуючих деталей. В умовах гальмування, яке супроводжуються значним тепловиділенням у зоні тертя, інтенсивність зношування значною мірою залежить від температури у фрикційному контакті.

Розрізняють наступні режими роботи фрикційних вузлів тертя:

1. Легкі режими тертя: температура на поверхні тертя не перевищує 250°С.

2. Середні та важкі режими тертя: температура на поверхні тертя підвищується відповідно до 200 - 550°С та 580 - 950°С.

3. Надважкі режим тертя: температура на поверхні тертя складає 1000 - 1250°С.

Сірі чавуни є матеріалами, що широко застосовуються для виготовлення фрикційних елементів, які працюють при короткочасному локальному підвищенні температури до 650°С.

Сірі фрикційні чавуни мають наступні особливості, які притаманні саме цим матеріалам: підвищений коефіцієнт тертя, знижена інтенсивність зношування, ефективна протидія утворенню задирів. Таким вимогам задовільно відповідають сірі фосфористі чавуни. Металевою основою сірих фосфористих чавунів є дрібнозернистий перліт. Вторинними фазами у таких чавунах є подвійна та потрійна фосфідна евтектика, а також пластинчастий графіт. Станом на сьогодні проводяться інтенсивні дослідження, спрямовані на оптимізацію хімічного складу фрикційних сірих чавунів за рахунок їхнього модифікування, а також мікролегування.

## 1 СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ЛЕГУВАННЯ ТА МІКРОЛЕГУВАННЯ ФРИКЦІЙНИХ ЧАВУНІВ

#### 1.1 Особливості фрикційного зносу

Як відомо, гальмування відбувається в умовах сухого тертя. Отже, фрикційний знос при гальмуванні є специфічним нестаціонарним процесом, що супроводжується значною зміною мікроструктури поверхневих шарів контактуючих деталей. В умовах гальмування, яке супроводжуються значним тепловиділенням у зоні тертя, інтенсивність зношування значною мірою залежить від температури у фрикційному контакті.

Розрізняють наступні режими роботи фрикційних вузлів тертя:

1. Легкі режими тертя: температура на поверхні тертя не перевищує 250°С.

2. Середні та важкі режими тертя: температура на поверхні тертя підвищується відповідно до 200 - 550°С та 580 - 950°С.

3. Надважкі режим тертя: температура на поверхні тертя складає 1000 - 1250°С.

При збільшенні температури у зоні тертя та контактних напруг інтенсифікуються процеси зміни субструктури та фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів матеріалів. Водночас, змінюється характер процесів зношування.

Залежно від теплової енергії, що виділяється у зоні тертя, в поверхневих шарах контактуючих матеріалів можуть відбуватись наступні процеси: дифузія, рекристалізація, поліморфні перетворення, пластична деформація, процеси розчинення та виділення вторинних фаз. Локальні швидкості нагрівання та охолодження можуть мати дуже високі значення ( $10^2 - 10^4 \text{ °C/c}$  [3]). Це суттєвим чином впливає на динаміку процесів тертя. Під динамікою процесів тертя у даному випадку розуміється не тільки зміна структури та властивостей матеріалів на рівні мікрооб'ємів, але й також зміна власне процесу тертя. Накопичені залишкові напруги, а також структурні зміни у поверхневих шарах фрикційного матеріалу можуть змінити його зносостійкість.

Можливість протікання фазових і структурних перетворень при сухому терті залежить від наступних факторів [3, 4]:

-локальне нагрівання контактуючих поверхонь до температур, що перевищують критичні температури;

-зсув критичних точок за рахунок протікання інтенсивної мікропластичної деформації;

-протікання структурних та фазових перетворень за рахунок мікродифузії.

Пружні і пластичні деформації протікають в умовах всебічного стиснення. Це полегшує зсув між зернами. Знос контактних поверхонь на етапі прироблення нелінійно залежить від питомого навантаження, особливо при невеликій площині контакту. Мікрогеометрія контактуючих поверхонь чинить досить істотний вплив на знос фрикційних матеріалів. Діаметр контактних плям у більшій мірі залежить від геометричних параметрів мікронерівностей. В умовах сухого тертя знос дуже часто відбувається при високих температурах. Саме тому фрикційні сплави повинні мати наступні спеціальні властивості: висока термічна стійкість, задовільна теплопровідність, корозійна стійкість, відсутніть фазових перетворень в усьому діапазоні робочих температур.

Руйнування при фрикційному зносі має втомний характер [4]. Фактично руйнування контактних поверхонь здійснюється внаслідок багаторазового порушення фрикційних зв'язків, особливо в умовах періодичного контакту. В умовах тертя першого роду мають місце не тільки пружні деформації, але також і пластичні деформації у вигляді зсуву та зрізу. При інтенсивному пластичному деформуванні поверхневих шарів відбувається їх локальне нагрівання. Локальне нагрівання, особливо нагрівання вище критичних точок, провокує протікання структурних та фазових перетворень. Локальне нагрівання поряд з інтенсивною пластичною деформацією призводить до окислювання поверхневого шару та продуктів зношування [3, 4]. Наявність у зоні тертя оксидів призводить до зміни умов тертя.

В умовах тертя другого роду (мається на увазі кочення) дотичні точки проходять цикли, що періодично повторюються. Це призводить до виникнення

контактної втоми та зношування. Одним з найбільш характерних видів руйнувань при контактній втомі є піттінг. Піттінг являє собою фрагментарне викрашування матеріалу у контактній зоні. Іншими видами руйнування при контактній втомі є заїдання та схоплювання.

Зносостійкість виливків в умовах сухого тертя, як правило, напряму залежить від твердості. Але іноді ця залежність не спрацьовує: структури мартенситного типу не забезпечують високу зносостійкість при фрикційному зносі внаслідок незадовільної прироблюваності. Тому білі чавуни практично ніколи не використовуються в якості фрикційних матеріалів. При цьому максимальну зносостійкість (серед чавунів) демонструють графітизовані чавуни [5, 6].

#### 1.2 Фрикційні сірі чавуни

Фрикційні сірі чавуни широко застосовуються для виготовлення різних деталей, що входять до складу гальмівних пристроїв.

Сірі фрикційні чавуни мають наступні особливості, які притаманні саме цим матеріалам: підвищений коефіцієнт тертя, знижена інтенсивність зношування, ефективна протидія утворенню задирів. Таким вимогам задовільно відповідають сірі фосфористі чавуни. Металевою основою сірих фосфористих чавунів є дрібнозернистий перліт. Вторинними фазами у таких чавунах є подвійна та потрійна фосфідна евтектика, а також пластинчастий графіт [7, 8]. Первинна структура має вирішальний вплив на фрикційні властивості сірих чавунів.

Якщо вуглецевий еквівалент перевищує 5,2, при низьких швидкостях охолодження утворюється графіт, що має розеткову форма. Така морфологія графіту чинить негативний вплив на механічні та експлуатаційні властивості чавунів [7, 8]. Центральна зона деталей діаметром 35 - 65 мм містить переважно ферит. Високий вміст фериту знижує міцність та зносостійкість чавуну [9]. Для того, щоб отримати задовільні характеристики міцності та зносостійкості заевтектичних фосфористих чавунів при виготовленні з них товстостінних виливків, необхідно дотримуватись наступного співвідношення Si / C = 0,65 та Si / (C + N) > 0,65 [9].

Доевтектичні та евтектичні чавуни мають більш високі механічні властивості. У разі підвищеного вмісту фосфору, структура виливків з товщиною стінок 40 мм складається переважно з перліту – П96 (Ф4) - ФЕЗ - ПДО – та графіту – ПГ6 - ПГр3 - ПГд45 - ПГф2. Така структура забезпечує достатньо високий рівень фрикційних властивостей фосфористих чавунів, якщо в якості контртіла виступають асбофрикційні матеріали [8, 9].

Критична швидкість кристалізації, при якій досягається утворення вибіленої структури чавуна, для бінарної системі Fe - C дорівнює 410 - 440 мкм/с. Для потрійної системи Fe - C - P критична швидкість кристалізації складає 30 - 100 мкм/с [7, 9, 10].

Довжина включень графіту залежить, головним чином, від умов охолодження та розмірів виливка. Утворення перлітної структури у масивних виливках можливе лише при достатньо низькій ступені евтектичності ( $S_e = 0,7 - 0,8$ ). Така закономірність є характерною для нелегованих і модифікованих фосфористих чавунів при виготовленні з них тонкостінних деталей. Якщо ступінь евтектичності досягає 0,8 - 0,9, суттєво підвищується вміст фериту і, як наслідок, інтенсивність зношування [10].

Додавання фосфору сприяє підвищенню фрикційних властивостей фосфористого чавуна, але при цьому знижується тріщиностійкість, термічна стійкість та стабільність коефіцієнта тертя (табл. 1.1) [10]. Поліпшення механічних властивостей фрикційних сірих чавунів є можливим лише у тому випадку, коли вони будуть мати хоча б обмежену пластичність задля запобігання крихкого руйнування.

Якщо ступінь евтектичності фосфористих чавунів збільшується до 0,8 - 1,0, відбувається суттєве зниження пластичності цих чавунів навіть у тому випадку, коли у їхній структурі присутній високодисперсний перліт. Виливки, товщина стінок яких перевищує 30 мм, мають центральну поруватість. Виливки характеризуються неоднорідною структурою. Виливки з товщиною стінок 15 - 21 мм, отримані литтям у кокіль, мають вибілену структуру, якщо  $S_e > 0,75$ .

Таблиця 1.1 - Вплив фосфору на зносостійкість, твердість і термічну стійкість фрикційних сірих чавунів

фopy,	іцієн-	, HB	Характеристик	и зносостійкості в тертя	умовах сухого	ь, ци-
Концентрація фос мас. %	Підвищення коеф та тертя, %	Твердість чавуну	Інтенсивність зношування при приробленні, мкм/г	Інтенсивність зношування при торцевому терті, мг/г	Відносна зносо- стійкість (тертя котіння із ковзан- ням), %	Термічна стійкіст кли
0,07	101	171	15 - 17,6	261	101	141
0,13	111	181	12 - 13,4	183	115	133
0,19	121	188	11,6 - 10,2	167	119	127
0,31	127	193	8,7 - 9,3	148	133	115
0,54	133	217	7,4 - 8,6	131	145	87
0,95	137	224	7,1 - 7,7	117	155	74
1,34	143	232	6,1 - 7,1	107	166	63
1,84	147	240	5,5 - 6,6	84	179	37

Характерна особливість сплавів залізо-вуглець-фосфор полягає у тому, що в них перехід від структури графітизованого чавуну до вибіленої структури відбувається при більш низьких швидкостях охолодження, ніж в системі залізовуглець. Порівняльний аналіз мікроструктур евтектик, що були отримані при однакових швидкостях кристалізації, показує, що дисперсність потрійної евтектики суттєво перевищує дисперсність подвійної евтектики. Це свідчить про більш високу ступінь переохолодження під час кристалізації потрійної евтектики у сплавах залізо-вуглець-фосфор [11].

Вміст фосфору у чавуні може сягати 1,3 - 1,8 % за умови, що температура нагрівання контактних поверхонь не перевищує 250°С (табл. 1.1). Для виготовлення деталей, що призначені для експлуатації при підвищених температурах та ударних навантаженнях, необхідно використовувати чавуни з підвищеною термостійкістю або інші фрикційні матеріали [9, 10, 11].

При виготовленні деталей з фрикційних сірих чавунів використовують не тільки легування фосфором. У ці чавуни також вводять спеціальні лігатури і

модифікатори, до складу яких входять нітрид бору і рідкоземельні метали, бориди тугоплавких металів, дисульфід молібдену. Ці компоненти знижують інтенсивність зношування та підвищують коефіцієнт тертя. Встановлено, що фрикційні сірі чавуни, що містять бориди тугоплавких металів і нітрид бору, характеризуються стабільним коефіцієнтом тертя та задовільною прироблюваністю. Вони не проявляють схильності до схоплення з контртілом, є корозійностійкими, негорючими, володіють необхідним рівнем механічних властивостей та мають невелику інтенсивність зношування в умовах сухого тертя.

Якщо фрикційні матеріали під час роботи нагріваються до температур 250 - 550°С, для їхнього виготовлення більш доцільно використовувати мікролеговані сірі чавуни, вміст фосфору в яких не перевищує 0,15 %. Табл. 1.2 містить дані про вплив деяких легуючих елементів на твердість та інтенсивність зношування виливків, виготовлених із фрикційних сірих чавунів, з товщиною стінок 30 - 40 мм [12, 13].

Протікання процесу первинної кристалізації чавуну і, отже, його зносостійкість, залежить від наступних факторів: температурна розплаву, температура позапічної обробки, температура розливання чавуну у ливарні форми, вміст та склад неметалевих включень і домішок (табл. 1.3) [14]. Ці фактори чинять визначальний вплив на виділення і зростання графітних включень, на структуру металевої основи, на механічні властивості чавуну. У виробничій практиці контроль якості фосфористого чавуну здійснюється з використанням технологічних проб квадратного перетину з розмірами 25×25 мм або діаметром 35 мм і довжиною 120 мм. Проби відливають у піщано-глинистих формах. Експрес контроль проводиться по зламу технологічної проби.

Певний інтерес має технологія виготовлення виливків із зносостійкого доевтектичного фосфористого чавуну шляхом заливання у ливарну форму чавуну, перегрітого вище температури плавлення на 100 - 250°C, з подальшим охолодженням до температури ліквідусу зі швидкістю від 1,7 до 4,1 К/с [15].

Таблиця 1.2 – Вплив мікролегуючих елементів на твердість та інтенсивність зношування фрикційних сірих чавунів при сухому терті

HB	я ІЯ,	Відносна	П	рисадк	а мікр	олегун	очих д	обавон	c
Твердість, 1	Зниження зношуванн %	стабільність коефіцієнта тертя, %	Мо	Cr	Cu	Ni	V	Sb	В
177	3,1	121	-	0,22	-	-	-	-	-
181	5,2	127	-	-	-	0,14	-	-	-
185	7,7	135	0,14	-	-	-	-	-	-
191	10,1	131	-	-	-	-	0,16	-	-
194	12,4	137	-	-	-	-	-	0,22	-
201	15,2	145	-	-	-	-	-	-	0,34
206	17,1	129	-	-	0,54	-	-	-	-
211	20,1	154	-	0,11	-	-	-	-	0,16
220	25,2	154	-	0,21	0,54	-	-	-	-
227	31	157	-	-	-	0,15	-	0,22	-
234	35,5	160	-	-	-	-	0,16	-	0,34
240	43,1	171	-	0,13	0,54	-	-	0,22	-
247	50,4	183	0,45	-	-	0,35	-	-	-
255	57	185	0,51	-	0,26	-	0,16	-	-
263	60,4	191	0,51	-	-	0,17	-	0,22	-

Проблему, що пов'язана з утворенням аномальної феритно-графітної структури виливків, до теперішнього часу повністю вирішити не вдалось.

Таблиця 1.3 – Вплив елементів-модифікаторів на мікроструктуру та твердість фрикційних сірих чавунів

№ Концентрація елементів, мас. %	p y	т Ді ст
----------------------------------	-----	---------------

	С	Si	Mn	Р	РЗМ	В	S	N		
1	3,52	2,41	0,11	0,07	-	-	0,01	-	П50; Ф50	180 - 192
2	3,51	2,41	0,11	0,07	0,02	-	-	-	П70; Ф30	186 - 200
3	3,51	2,42	0,11	0,07	0,06	-	-	-	П80; Ф20	220 - 234
4	3,50	2,44	0,11	0,06	0,17	-	-	-	П100	240 - 254
5	3,27	2,11	0,15	0,15	0,04	-	0,01	-	П75; Ф20; Л5	216 - 226
6	3,27	2,11	0,15	0,15	-	-	-	-	П85; Ф15; Л5	224 - 235
7	3,26	2,12	0,15	0,15	0,07	-	-	-	П90; Л10	233 - 249
8	3,24	2,14	0,14	0,15	0,14	-	-	-	П70; Л30	254 - 270
9	3,32	2,46	0,23	0,11	-	-	0,01	0,004	П80; Л20	216 - 225
10	3,31	2,51	0,22	0,12	-	0,03	0,02	0,003	П85; Ф15	226 - 234
<u> </u>	$\Pi$ римітка: $\Pi$ – перліт: $\Phi$ – ферит: $\Pi$ – лелебурит: $P3M$ – рілкоземельн									

*Примітка:* П – перліт; Ф – ферит; Л – ледебурит; РЗМ – рідкоземельні метали.

Значна кількість тонкостінних чавунних деталей з графітизованою структурою, отриманих литтям у кокіль, містить ферит та міждендритний графіт. Та-

ка структура суттєво знижує експлуатаційні властивості деталей; особливо це стосується зносостійкості [15].

Наявність міждендритного графіту у структурі чавуна суттєвим чином впливає на температуру його нагрівання при зміцнювальній термічній обробці. На відміну від інших сірих чавунів, температура аустенізації чавуну, що містить міждендритний графіт, має перевищувати критичну точку A<sub>c1</sub> на 100 - 150°C [15].

Додавання у доевтектичні чавуни модифікаторів у вигляді рідкоземельних металів у кількості, що не перевищує 0,03 - 0,16 %, призводить до зниження точок первинних та евтектичних перетворень, а також до збільшення ступеня переохолодження при формуванні евтектики. При цьому подрібнюється структура чавуну і підвищується його твердість та зносостійкість [16]. Для чавунів з хімічним складом, близьким до евтектичного складу, ступінь переохолодження при формуванні евтектики є незначною.

Залежно від характеру впливу на мікроструктуру чавуну, можна виділити наступні групи модифікаторів на основі рідкоземельних металів [16]:

1. Модифікатори, що здатні суттєво прискорити процес графітизації (процес виділення графіту), але при цьому ніяк не впливають на форму та розподіл графіту.

2. Модифікатори, що здатні суттєво прискорити процес виділення графітної фази із одночасним її подрібненням (особливо це стосується графітної евтектики.

Позитивний ефект від введення рідкоземельних металів у розплавлений фрикційний чавун спостерігається у тому випадку, якщо сумарний залишковий вміст рідкоземельних металів не перевищує 0,19 %. Більш висока концентрація рідкоземельних металів призводить до уповільнення процесу виділення графіту та до збільшення вмісту карбідів. Модифікатори на основі рідкоземельних металів суттєво прискорюють процес графітизації вторинних карбідів, а також ледебуритної евтектики. При цьому водночас уповільнюється графітизація карбідів, що знаходяться у складі перліту [16]. Це є основною причиною того, що у чавунах, модифікованих рідкоземельними металами, можна відносно просто отримати металеву матрицю зі структурою перліту (сплави № 1 та № 4 у табл. 1.3). Металева матриця чавунів, не модифікованих рідкоземельними металами, містить, поряд з перлітом, значну кількість фериту. Ферит чинить вкрай негативний вплив на зносостійкість фрикційних сірих чавунів.

Коефіцієнт тертя, пластичність і міцність фрикційного сірого чавуну зі ступенем евтектичності 0,8 - 1,0 можна істотно підвищити шляхом його легування молібденом. Концентрація молібдену може складати 0,12 - 0,9 %. Для того, щоб нейтралізувати карбідоутворювальний ефект молібдену, до складу чавуна вводять сурьму та нікель, які є сильними графітизаторами [17].

Для того, щоб підвищити в'язкість чавуна, його можна легувати молібденом і міддю або молібденом і нікелем. Одночасне легування чавуна молібденом та нікелем дозволяє отримувати у металевій матриці структуру бейніту. Бейніт має високу міцність та в'язкість, а також стабільний коефіцієнт тертя [17].

Введення до складу фрикційного сірого чавуна бора дозволяє підвищити стабільність коефіцієнта за рахунок утворення карбоборидів. При цьому також утворюється більш дисперсна та тверда евтектика (порівняно із фосфідною евтектикою). Виливки з чавуну, що містить до 0,35 % бора, мають меншу поруватість, ніж виливки з фосфористих чавунів. При концентрації бора понад 0,35 % спостерігається зниження пластичності та тріщиностійкості чавуна [18].

Дані, представлені у табл. 1.2 - 1.4, свідчать про те, що комплексне мікролегування є ефективним методом підвищення міцності, твердості та зносостійкості фрикційних сірих чавунів [18]. Титан та нітрид титану для мікролегування фосфористих чавунів не використовують, оскільки титан та нітрид титану знижують коефіцієнт тертя.

У разі використання сурми для мікролегування фрикційних фосфористих чавунів, остання сприяє збільшенню кількості фосфідної евтектики [19]. Кількість цементиту також зростає. У сукупності це призводить до збільшення мікротвердості фосфідної евтектики.

Таблиця 1.4 - Вплив мікролегування на твердість і міцність фрикційних чавунів

Твердість, <sub>ов</sub>, Вміст мікролегуючих елементів, мас. %

HB	МПа	Mo	Cr	Cu	Ni	Sb	V	В
172	196	-	-	-	-	-	-	-
186	210	-	0,12	-	-	-	-	-
187	219	-	-	-	0,33	-	-	-
189	220	0,12	-	-	-	-	-	-
191	231	-	-	-	-	-	0,16	-
193	231	-	-	-	-	0,22	-	-
197	231	-	-	-	-	-	-	0,32
201	239	-	-	0,54	-	-	-	-
220	250	-	0,22	0,54	-	-	-	-
223	262	-	-	-	0,14	0,23	-	-
227	271	-	-	-	-	-	0,16	0,33
235	282	-	0,11	0,54	-	0,22	-	-
237	293	0,46	-	-	0,34	-	-	-
245	294	0,51	-	0,26	-	-	0,16	-
249	297	0,51	-	-	0,16	0,22	-	-

Існує припущення, що евтектика, присутня в сплавах системи Fe-C-Si-P-Sb, є не складною фосфідно-сурм'янистою евтектикою, а потрійною евтектикою ФЕ4. Це припущення підтверджується результатами диференціального термічного аналізу та мікроаналізом фосфідної евтектики [20]. Збільшення площі, яку займає фосфідна евтектика, сприяє підвищенню стабільності коефіцієнта тертя та зниженню інтенсивності зношування. Вплив хрому є аналогічним за винятком того, що хром посилює ліквацію фосфідної евтектики; при цьому фосфідна евтектика розташовується по границях зерен у вигляді замкнутої сітки [20]. У разі комплексного мікролегування чавуна сурмою (0,15 - 0,35 %) і хромом (0,05 - 0,25 %) розподіл фосфідної евтектики стає більш рівномірним; водночас спостерігається підвищення стабільності коефіцієнта тертя. Якщо чавун містить 0,23 % бору і 0,1 % сурми, його твердість становить близько 227 HB, а термічна стійкість – 230 циклів [21]. Легування фрикційних сірих чавунів молібденом дозволяє отримати бейнітну структуру металевої матриці. Твердість чавуна, легованого молібденом, підвищується до 260 - 330 НВ. Сучасні фрикційні сірі чавуни зі структурою бейніту легують нікелем, молібденом та вольфрамом [20]. У разі комплексного мікролегування досягається підвищення щільності товстостінних чавунних виливків. Зменшення усадкової поруватості фосфористих чавунів можна досягти за рахунок:

-легування чавуна бором, барієм та вісмутом;

-зниження температури, при якій здійснюється модифікування, а також температури заливання чавуна у ливарну форму;

-збільшення часу витримки чавуна у ковші після модифікування або мікролегування;

-зменшення концентрації марганцю, хрому, алюмінію, фосфору та сірки;

-просушування ливарних форм перед заливанням в них чавуна.

Додаткове додавання у розплавлений чавун кальцію, цирконію, вуглецю та кремнію збільшує усадкову поруватість та знижує фрикційні характеристики чавуна. Регулювання коефіцієнта тертя та його стабільності, а також інших фрикційних властивостей чавунів здійснюється за рахунок зміни співвідношення між концентраціями хрому, марганцю, фосфору та кремнію. Додавання молібдену (0,2 - 0,65 %) сприяє підвищенню теплостійкості та фрикційних властивостей чавуна. Чавуни, що містять 0,04 - 0,05 % бору, 0,2 - 0,65 % молібдену та 0,2 - 0,4 % фосфору, характеризуються рівномірним розподілом графіту та дисперсною структурою металевої основи навіть у товстостінних виливках. Вони мають високий рівень механічних властивостей та забезпечують стабільний коефіцієнт тертя (до 600°С) [19, 21]. Такі чавуни використовуються для виготовлення великих за розмірами фрикційних накладок, циліндрів та товстостінних барабанів. Чавуни, що містять лише фосфор та ванадій або фосфор та бор, зазвичай, використовують для виготовлення тонкостінних фрикційних елементів, які працюють при температурах, що не перевищують 500°С.

Останнім часом в якості фрикційних елементів широко застосовуються чавуни з пластинчастим графітом, леговані алюмінієм. Вони відрізняться висо-

ким рівнем фізичних та експлуатаційних властивостей: високою жароміцністю, зносостійкістю, корозійною стійкістю, високою теплопровідністю, стабільним коефіцієнтом тертя. Введення алюмінію до складу чавуна сприяє зменшенню температур фазових перетворень [22]. Це слід враховувати, в першу чергу, в тих випадках, коли деталі піддаються циклічним навантаженням. При термоциклюванні в області температур фазових перетворень може відбуватись нерівномірне циклічне розширення і стиснення внаслідок великої різниці між питомими об'ємами утворюваних фаз. Нерівномірне теплове розширення та стиснення сприяє тіщиноутворенню. Спочатку це провокує зростання деталі, а потім – її руйнування.

Алюмінієві чавуни завжди містять певну кількість різних сполук (наприклад, сульфідів і фосфідів), утворення яких пов'язане з наявністю постійних домішок [23]. Високий ступінь гетерогенності структури алюмінієвих чавунів створює певні труднощі при знаходженні зв'язку між структурою та властивостями чавунів.

З одного боку, алюміній у фрикційних сірих чавунах впливає на процес виділення графіту, з іншого боку – на формування структури металевої матриці. При концентрації менше 5 % алюміній слід розглядати як елементграфітизатор. Однак при концентрації алюмінію понад 5 % його графітизуюча здатність суттєвим чином знижується. При концентрації алюмінію 9 - 14 % графіт не утворюється [23]. Чавуни, що містять 9 - 14 % алюмінію, є крихкими матеріалами з високою твердістю. Вони характеризуються низькою оброблюваністю при використанні будь-яких методів механічної обробки. Збільшення вмісту алюмінію до 25 % знову призводить до інтенсивного виділення графітних включень. Чавун, що містить 18 - 25 % алюмінію, характеризується задовільними ливарними властивостями. Певний відсоток алюмінію присутній у зв'язаній формі у вигляді нітридів [23]. Такі чавуни використовуються для виробництва гальмівних колодок скребкових конвеєрів, зубчастих коліс планетарних редукторів тощо.

Властивості чавунів, легованих алюмінієм, визначаються специфічною морфологією графітних включень. Графітні включення в алюмінієвих чавунах

мають форму коротких пластин з заокругленими краями [24]. Шорсткість поверхні виливків з чавунів, легованих алюмінієм, менше шорсткості виливків, отриманих із звичайного сірого чавуну. Чавун, легований алюмінієм, має підвищену корозійну стійкість, що обумовлено утворенням на поверхні литих деталей тонкого шару оксиду алюмінію. Якщо вміст алюмінію в чавуні перевищує 26 %, чавун знову стає дуже твердим та крихким.

Вибір структури металевої основи фрикційних сірих чавунів суттєвим чином залежить від умов тертя [8, 11, 14, 18, 20]. Якщо температура у зоні тертя не перевищує 250°С, максимальну зносостійкість забезпечує мартенситна та мартенситно-бейнітна структура металевої матриці. Мартенситну структуру металевої матриці можна отримати без будь-якої додаткової термічної обробки, якщо вміст нікелю у чавуні складатиме 3,0 - 4,0 %.

Якщо температура у зоні тертя складає 250 - 450°С, максимальну зносостійкість забезпечує бейніт на структура металевої матриці. Бейніт виявляє значно меншу чутливість до концентраторів напруг, ніж мартенсит (у даному випадку концентраторами напруг є графітні включення), забезпечуючи підвищений рівень тріщиностійкості чавуну при термоциклюванні [14, 18, 20, 21].

Отримання бейнітної структури металевої основи (нижнього або верхнього бейніту) безпосередньо на етапі отримання виливків дуже складно. Щоб отримати бейнітну структуру металевої основи, виливки найчастіше піддають ізотермічному гартуванню [20]. Оскільки ізотермічне гартування потребує додаткових витрат енергії, у виробничих умовах його практично не використовують. За таких умов більш доцільним методом підвищення тріщиностійкості фрикційних сірих чавунів є формування у їхній металевій матриці структури зернистого перліту [19].

Якщо температура у зоні тертя періодично підвищується до 450 - 600°С, найбільшу зносостійкість фрикційних сірих чавунів забезпечує металева матриця зі структурою марганцевого аустеніту [20 - 22]. Концентрація марганцю в аустенітних сірих чавунах знаходиться у межах 10 - 12 %. Такий вміст марганцю забезпечує утворення стабільного аустеніту, який при протіканні інтенсивної пластичної деформації у поверхневих шарах зміцнюється, але не розпада-

ється з утворенням мартенситу деформації. Ефективне пручання марганцевого аустеніту втомному руйнуванню зумовлено поєднанням двох його властивостей: здатності до інтенсивного зміцнення в умовах пластичного деформування та здатності до релаксації внутрішніх напруг, що виникають внаслідок пластичного деформування. Підвищена температура у зоні тертя також сприяє частковій релаксації внутрішніх напруг.

За результатами проведеного літературного огляду можна зробити такі висновки:

1. Для забезпечення максимальної тріщиностійкості та теплостійкості фрикційних сірих чавунів в умовах сухого тертя, у разі періодичного підвищення температури у зоні тертя до 250 - 500°С, концентрація фосфору в чавунах не повинна перевищувати 0,15 - 0,2 мас. %.

2. В якості ефективного замінника фосфору у фрикційних сірих чавунах можна використовувати бор. Оптимальний вміст бору у фрикційних сірих чавунах знаходиться в межах 0,3 - 0,35 мас. %.

3. Для отримання виливків невеликого розміру або невеликого перетину доцільно використовувати чавуни, модифіковані рідкоземельними металами. Це дозволяє запобігти утворенню вторинних та евтектичних карбідів, а також фериту у надмірній кількості.

4. За наявності підвищених температур у зоні тертя оптимальними структурами металевої матриці фрикційних сірих чавунів є марганцевий аустеніт або зернистий перліт.

#### 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження були спрямовані на встановлення залежності структури та зносостійкості аустенітних сірих чавунів від типу модифікаторів та вмісту легуючих елементів. Вміст основних легуючих елементів варіювався наступним чином: 3,2 - 3,8 % вуглецю; 9 - 12 % марганцю; 2,5 - 3,5 % алюмінію; 1,7 - 1,9 % кремнію. Вміст кремнію у всіх зразках складав 1,7 - 1,9 %.

Алюміній використовувався в якості замінника фосфору. Фосфор стабілізує цементит. Критична швидкість кристалізації, при якій досягається утворення вибіленої структури чавуна, для бінарної системі Fe - C дорівнює 410 - 440 мкм/с. Для потрійної системи Fe - C - P критична швидкість кристалізації складає 30 - 100 мкм/с [7, 9, 10]. Алюміній, на відміну від фосфору, стабілізує графітну фазу, але за умови, що вміст алюмінію не перевищує 5 % [23].

Модифікування чавунів проводилось з використанням двох типів лігатур: силіко - кальцієвої лігатури *СіітМіш-1* та лігатури *ЦИСМ*, що містить рідкоземельні метали (Si-Ca-Ba-Ce). Модифікування чавунного розплаву виконувалось безпосередньо перед його розливанням у ливарні форми. В якості ливарних форм були використані кокілі із теплоізоляційним покриттям по ТУ 226.32.884 - 86. Лігатури використовувались у вигляді брикетів, які попередньо зважувались на вагах *ВЛМ-001* з точністю ±0,0005г.

Було виготовлено три групи зразків: 1) циліндричні зразки (діаметр 40 мм, довжина 100 мм); 2) перша група призматичних зразків (поперечний перетин: 30 × 30 мм, довжина: 120 мм); 3) друга група призматичних зразків (20 × 15 × 10 мм).

Для металографічного аналізу, для вимірювання твердості і мікротвердості було використано циліндричні зразки. Призматичні зразки квадратного перетину (30 × 30 мм) використовувались для вимірювання коерцитивної сили (контроль наявності аустенітної структури металевої матриці). Призматичні зразки другої групи (20 × 15 × 10 мм) піддавались триботехнічним випробуванням. Твердість вимірювалась за стандартними методиками на твердомірах *ТШ* та *ТК*. Вихідний циліндричний зразок (діаметр 40 мм, довжина 100 мм) розрізався на токарському верстаті таким чином, щоб отримати чотири окремих зразка.

Вимірювання твердості по Бринелю проводилось вдавлюванням у поверхню зразка сталевої кульки, діаметр якої дорівнював 10 мм (рис. 2.1). Зусилля: 30000 H, тривалість навантаження: 10 с.

Під час випробування до зразка прикладалось два навантаження: попереднє та остаточне. Прикладання попереднього навантаження здійснювалось вручну: предметний столик твердоміра піднімався уверх таким чином, щоб кулька увійшла у контакт з поверхнею зразка та вдавилась в неї. Підйом предметного столика твердоміра здійснювався поворотом маховика за годинниковою стрілкою до упору (до появи протидії з боку зразка). Прикладання остаточного навантаження (30000 Н) здійснювалось в автоматичному режимі натисканням кнопки, що розташована на корпусі твердоміра. Після витримки під навантаженням протягом 10с, навантажувальний пристрій твердоміра автоматично відключався. Після цього здійснювалось опускання предметного столика твердоміра поворотом маховика проти годинникової стрілки. На поверхні зразка утворювався відбиток. Для вимірювання діаметру відбитка використовувалась спеціальна лупа. Діаметр відбитка вимірювався у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Остаточний діаметр відбитка розраховувався як середнє арифметичне цих двох вимірювань. Для розрахунку твердості по Бринелю (НВ) використовувалась наступна формула:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$
 (2.1)

де P – навантаження на зразок, H; P = 30000 H;

- D діаметр кульки, що вдавлювалась у зразок, мм; D = 10 мм;
- d середній діаметр відбитка, що утворився під час навантаження, мм.

Відбитки наносились таким чином, щоб відстань від центру відбитка до краю зразка складала не менше ніж два діаметри відбитка. Середня твердість визначалась за результатами чотирьох вимірювань. Кожний наступний відбиток наносився на відстані не менше ніж два діаметри попереднього відбитка.



Рисунок 2.1 - Схема вимірювання твердості по Бринелю

Твердість по Роквелу визначалась при вдавлюванні у поверхню циліндричного зразка алмазного конуса з кутом при вершині 120° (рис. 2.2). На першому етапі вимірювань здійснювалось прикладання попереднього навантаження ( $P_0 = 100$  H), на другому етапі – остаточного навантаження (P = 1500 H). Прикладання попереднього навантаження здійснювалось вручну, прикладання остаточного навантаження – автоматично.

Твердість по Роквелу визначалась за формулою:

$$HRC = \frac{k - (h - h_0)}{c}, \qquad (2.2)$$

де h<sub>0</sub> – глибина вдавлювання (мм) індентора у зразок при прикладанні попереднього навантаження (P<sub>0</sub> = 100H);

h – глибина вдавлювання (мм) індентора у зразок при прикладанні остаточного навантаження (P = 1500 H);

k, с – константи; для конуса k = 0,2 мм; с = 0,002 мм.

Різниця h - h<sub>0</sub> глибин вдавлювання індентора у зразок при прикладанні навантажень P<sub>0</sub> та P вимірювалась автоматично. Твердість по Poквелу (HRC) визначалась за чорною шкалою твердоміру "C".



Рисунок 2.2 - Схема вимірювання твердості по Роквелу: Р<sub>0</sub> – прикладання попереднього навантаження (Р<sub>0</sub> = 100 H); h<sub>0</sub> – глибина вдавлювання індентра у зразок при прикладанні попереднього навантаження; Р – прикладання остаточного навантаження (Р = 1500 H); h – глибина вдавлювання індентра у зразок при прикладанні остаточного навантаження

Мікроструктура чавунів досліджувалась на оптичному мікроскопі *МІМ-8М.* Мікрошліфи виготовлялись зі зразків, що використовувались для вимірювання твердості. Торцеву поверхню зразків, на якій не були відбитків, що залишились після вимірювання твердості, шліфували наждачним папером (ГОСТ 10054-82, ГОСТ 6456-82), поступово зменшуючи зернистість паперу: P2000, P1500, P1000...A320. Після шліфування мікрошліфів на наждачному папері A320 мікрошліфи полірувались на крузі з волоку. В якості абразиву була використана суспензія, до складу якої входила дистильована вода та паста ГОІ.

Для промивання мікрошліфів використовувався етиловий спирт. Після промивання в етиловому спирті мікрошліфи протирались фільтрувальним папером. Хімічне травлення мікрошліфів виконувалось у царській водці.

Шліфування та полірування мікрошліфів виконувалось на верстаті СШП-12. Для вимірювання мікротвердості використовувався мікротвердомер ПМТ-3. Схема вимірювань представлена на рис. 2.3. В якості індентора для вимірювання мікротвердості використовувалась алмазна піраміда з кутом при вершині 136°. Навантаження, що прикладалось до піраміди, становило від 20 до 50г. При навантаженні 20-30 г вимірювалась мікротвердість вторинного цементиту та інтерметалідів, при навантаженні 40-50 г – мікротвердість аустенітної основи.



Рисунок 2.3 - Схема вимірювання мікротвердості:

1 – алмазна піраміда; 2 – зразок; 3 – предметний столик

Для вимірювання мікротвердості використовувались поліровані та протравлені мікрошліфи. Порядок вимірювання мікротвердості:

1. Встановлення зразка на предметний столик.

Підготовлений зразок встановлювався на предметний столик таким чином, щоб поверхня шліфа розташовувалась перпендикулярно напрямку переміщення піраміди. У разі порушення цієї умови відбувається спотворення форми відбитка, що суттєвим чином знижує точність вимірювань. Для правильного встановлення шліфа відносно індентора зразок впресовувався ручним пресом у тонкий шар пластиліну на установній пластині. Закріплення зразка здійснювалось таким чином, щоб не допустити його прогинання при прикладанні навантаження. Закріплення установної пластини на предметному здійснювалось за допомогою двох штифтів, що входять в отвори, розташовані на робочій поверхні столика.

Після закріплення пластини із зразком здійснювалось переміщення верхньої плити столика за допомогою мікрометричних гвинтів до тих пір, поки досліджувана ділянка мікрошліфа не попадала в об'єктив мікроскопа. При цьому столик притискався до лівого упору.

Перед прикладанням навантаження на індентор виконувалось ретельне фокусування мікроскопу. З метою підвищення контрастності зображення використовувались світлофільтри та діафрагмування.

Відбиток наносився таким чином, щоб відстань від його центру до краю зразка була не менше ніж подвоєна довжина діагоналі. Приблизно такою ж була найменша відстань між геометричними центрами сусідніх відбитків. У разі отримання двох відбитків різних розмірів, між їхніми центрами витримувалась відстань не менше ніж дві діагоналі більшого відбитка.

Під час закріплення алмазної піраміди в патроні навантажувального пристрою забезпечувалось співпадіння риски, нанесеної на оправці піраміди, і риски, нанесеної на патроні. Таким чином було забезпечено правильне положення алмазної піраміди відносно досліджуваної поверхні зразка та її надійну фіксацію в патроні.

Встановлення мікротвердоміру здійснювалось на підкладку з губчастої гуми.

Перед проведенням вимірювань виконувалась перевірка справності навантажувального пристрою. Для цього на полірований плоский зразок, виготовлений з алюмінію, 2 - 3 рази опускався шток з індентором без прикладання навантаження. При перевірці слідкували за тим, щоб рух штока був плавним, без ривків і помітного тертя. За відсутності навантаження на індентор на поверхні зразків не утворювались ніякі відбитки. Відбитки, як це і має бути при справному навантажувальному пристрої, з'являлись при навантаженні на індентор 0,5 - 1,0 г.

#### 2. Вдавлювання алмазної піраміди в поверхню зразка.

Після того, як був встановлений вантаж на шток механізму навантаження, а також після фокусування мікроскопа, здійснювалось повертання столику, на якому був закріплений зразок, до упору проти годинникової стрілки. При такому повертанні відбувалось підведення обраного для нанесення відбитка міста, розташованого на досліджуваній області мікрошліфа, під піраміду.

Навантаження прикладалось при повільному і плавному повороті рукоятки аретира проти годинникової стрілки. Невелика швидкість опускання алмазної піраміди забезпечувала відсутність динамічного впливу мас штока, індентора і вантажу на розміри відбитка. Тривалість опускання індентора складала 8 -15 секунд. Тривалість витримки зразка під навантаженням становила 5 секунд.

Після зняття навантаження шток разом з індентором повертались у вихідне положення. Задля цього рукоятку аретира плавно, без поштовхів, повертали до упору за годинниковою стрілкою. Після повертання предметного столику до упору по годинниковій стрілці здійснювалось вимірювання діагоналі відбитка.

3. Вимірювання діагоналей відбитка виконувалось з використанням двох схем. Для вимірювання діагоналей відбитка в аустенітній матриці використовувалась класична схема. Згідно цієї схеми, напрям переміщення перехрестя збігається з діагоналлю – перехрестя переміщується вздовж діагоналі (рис. 2.4). Положення, в якому закріплювався окуляр-мікрометр, обиралось таким чином, щоб перехрестя рухалось точно вздовж діагоналі, не відхиляючись від неї. Далі, здійснюючи переміщення перехрестя в одному напрямку (наприклад, справа наліво), послідовно наводили перехрестя окуляр-мікрометру спочатку на правий кінець діагоналі, а потім – на лівий її кінець. Різниця відліків (початкового  $Z_1$  і кінцевого  $Z_2$ ), що були зняті у цих позиціях по шкалі барабана окулярмікрометра, помножена на ціну поділу шкали g, давала довжину горизонтальної діагоналі d<sub>1</sub>:

$$d_1 = (Z_1 - Z_2)g.$$

Щоб виконати вимірювання другої діагоналі відбитка, попередньо здійснювався поворот окуляр-мікрометра на 90°, після чого окуляр-мікрометр закріплювався у новому положенні. Перехрестя окуляр-мікрометра рухалось точно вздовж вертикальної діагоналі відбитка. Спочатку перехрестя наводилось на один кінець діагоналі, а потім – на іншій її кінець, після чого по відлікам, знятим на вимірювальній шкалі барабана окуляр-мікрометра, визначалась довжина вертикальної діагоналі d<sub>2</sub>.



Рисунок 2.4 - Схема вимірювання діагоналей відбитка при русі перехрестя вздовж діагоналі: 1, 2 – початкове та кінцеве положення перехрестя: стрілка вказує напрямок, в якому переміщується перехрестя під час обертання рукоятки окуляр - мікрометра

Діагоналі відбитків, що залишились у включеннях вторинного цементиту та інтерметалідів, вимірювались за схемою, наведеною на рис. 2.5.

4. *Розрахунок мікротвердості, МПа,* здійснювався за наступною формулою:

$$H = 1,854P/d^2.$$

де P – навантаження, прикладене до алмазної піраміди, H; P = 20 - 50 г (0,2 - 0,5 H);

d – середня довжина діагоналей відбитка, мм:  $d = (d_1 + d_2) / 2$ .



Рисунок 2.5 - Схема вимірювання діагоналей відбитка у включеннях вторинного цементиту та інтерметалідів: стрілка вказує напрямок, в якому переміщується перехрестя під час обертання рукоятки окуляр - мікрометра

### З РЕЗУЛЬТАТИ МЕТАЛОГРАФІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

## **3.1** Еталонні мікроструктури для оцінки кількості, розподілу та розмірів включень графіту і цементиту в чавунах

Оскільки чавуни, що підлягали металографічному дослідженню, мали аустенітну структуру металевої матриці, їхню мікроструктуру визначали за двома іншими структурними складовими, а саме за графітом та цементитом. Структура фосфідної евтектики дослідженню не підлягала, оскільки вміст фосфору у чавунах не перевищував 0,15 мас. %.

При визначенні параметрів графітної фази оцінці підлягали форма, розподіл, розміри, кількість включень графіту. При визначенні параметрів цементитної фази оцінці підлягали кількість та розміри включень цементиту, наявність ледебуриту.

Металографічний аналіз починали з дослідження тих ділянок мікрошліфів, що були протравлені царською водкою. На цих ділянках здійснювалось виявлення вторинного та евтектичного цементиту. При наявності евтектичного цементиту в структурі чавунів зразки бракували. Кількість вторинного цементиту у зразках не повинна перевищувати 6 %. Якщо кількість вторинного цементиту перевищувала 6 %, зразки також бракували.

Якщо на травленій ділянці мікрошліфів не було виявлено ледебуриту, а вміст вторинного цементиту не перевищував 6 %, проводили аналіз форми та розподілу включень графітної фази. Аналіз графітної фази проводився на нетравлених ділянках мікрошліфів.

Для оцінки вмісту вторинного та евтектичного цементиту використовували шкалу 10А ГОСТ 3443-87. Вміст вторинного та евтектичного цементиту визначався як середній відсоток площі, яку займали включення цементитної фази на мікрошліфах не менше ніж у трьох полях зору (табл. 3.1).

Якщо вміст включень цементиту не перевищував 1,0 %, ці включення оцінювали як «сліди».

Розмір ізольованих включень вторинного та евтектичного цементиту оцінювали згідно шкали 10Б ГОСТ 3443-87 як середню площу, яку займають три найбільших включення (табл. 3.2).

Для оцінки форми включень графіту використовували шкалу 1А ГОСТ 3443-87.

Таблиця 3.1 – Бали, за якими визначалась кількість вторинного та евтектичного цементиту (ГОСТ 3443-87)

Бал	Площа, яку займають вторинний або евтектич- ний цементит, %
Бал Ц 2	До 2 (допустимий бал)
Бал Ц 4	Від 3 до 6 (допустимий бал)
Бал Ц 10	Від 10 до 15 (недопустимий бал)
Бал Ц 25	Від 15 до 40 (недопустимий бал)
Бала Ц 40	Більше 40 (недопустимий бал)

Таблиця 3.2 – Бали, за якими визначався розмір включень вторинного та евтектичного цементиту (ГОСТ 3443-87)

	Площа, яку займають три найбільших вклю-
Бал	чення вторинного або евтектичного цемен-
	титу, мкм <sup>2</sup>
Бал Цп 2000	2000
Бал Цп 6000	2000 - 10000
Бал Цп 13000	10000 - 16000
Бал Цп 20000	16000 - 25000
Бал Цп 25000	Більше 25000

Для оцінки довжини включень графіту використовували шкалу 1Б ГОСТ 3443-87 (табл. 3.3). Довжину графітних включень визначали як середню довжину трьох найбільших включень. Максимальну довжину включень графітної фази визначали у трьох різних полях зору.

Для оцінки розподілу включень графіту використовували шкалу 1В ГОСТ 3443-87 (табл. 3.4). Якщо площа, яку займають графітні включення, становила менше 1,0 % від загальної площі мікрошліфа у полі зору, ці включення оцінювали як «сліди».

Для оцінки вмісту графіту використовували шкалу 1Г ГОСТ 3443-87. Вміст графіту визначався через середній відсоток площі, яку займали на мікрошліфах графітні включення у трьох різних полях зору.

Таблиця 3.3 – Бали, за якими визначалась довжина включень пластинчастого графіту (ГОСТ 3443-87)

Познанения балу	Довжина включень пластинчатого гра-
	фіту, мкм
Бал ПГд15	До 15
Бал ПГД25	15 - 30
Бал ПГд45	30 - 60
Бал ПГд90	60 - 120
Бал ПГд180	120 - 250
Бал ПГд350	250 - 500
Бал ПГд750	500 - 1000
Бал ПГд1000	Більше 1000

Таблиця 3.4 – Бали, за якими визначався розподіл включень графітної фази (ГОСТ 3443-87\_

Позначення балу	Відсоток площі, зайнятої графітними
	включеннями, %
Бал ПГ2	До 3
Бал ПГ4	3 - 5
Бал ПГ6	5 - 8
Бал ПГ10	8 - 12
Бал ПГ12	Більше 12

Еталонні мікроструктури, за якими проводилось дослідження графітної та цементитної фази (ГОСТ 3443-87), наведено на рис. 3.1 - 3.9.





ПГф1 Пластинчаста прямолінійна

ПГф2 Пластинчаста завихрена





ПГф3 Голчаста

ПГф4 Гнездоподібна

Рисунок 3.1 - Еталонна шкала 1А ГОСТ 3443-87: Форма включень графіту, ×100







# Рисунок 3.2 - Еталонна шкала 1Б ГОСТ 3443-87 – Довжина включень графіту, ×100 (шкали ПГд15 - ПГд90)







Рисунок 3.3 - Еталонна шкала 1Б ГОСТ 3443-87 – Довжина включень графіту (шкали ПГд180 - ПГд1000), ×100





ПГр1 Рівномірний розподіл

ПГр2 Нерівномірний розподіл









Колонії пластинчастого графіту Колонії міждендритного графіту

Рисунок 3.4 - Еталонна шкала 1В ГОСТ 3443-87: Розподіл включень графіту (шкали ПГр1 - ПГр4), ×100





ПГр5 Гілковий розподіл

ПГр6 Сітчастий розподіл





ПГр7 Розеточний розподіл

ПГр8 Міждендритний крапковий розподіл

Рисунок 3.5 - Еталонна шкала 1В ГОСТ 3443-87: Розподіл включень графіту (шкали ПГр5 - ПГр8), ×100


Міждендритний пластинчастий розподіл

Рисунок 3.6 - Еталонна шкала 1В ГОСТ 3443-87: Розподіл включень графіту (шкала ПГр9), ×100



 $\Pi \Gamma 2$ 

ΠГ4

Рисунок 3.7 - Еталонна шкала 1Г ГОСТ 3443-87: Кількість включень графіту, % (шкали ПГ2, ПГ4), ×100











ПГ12

Рисунок 3.8 - Еталонна шкала 1Г ГОСТ 3443-87: Кількість включень графіту, % (шкали ПГ6 - ПГ12), ×100









Ц10

Ц25

Рисунок 3.9 - Еталонна шкала 10А ГОСТ 3443 - 87: Кількість вторинного та евтектичного цементиту, об. % (шкали Ц2 - Ц25), ×100

3.2 Вплив модифікаторів на кількість, розподіл та розміри включень цементиту

Дослідження впливу модифікаторів на кількість, розподіл та розміри включень цементитної фази проводили на зразках наступного хімічного складу: 3,4 - 3,5 % вуглецю; 10 - 11 % марганцю; 2,5 - 2,7 % алюмінію; 1,7 - 1,9 % кремнію.

Структура чавуна, що не проходив модифікування: аустеніт + вторинний цементит + ледебурит (рис. 3.10). Такий чавун взагалі не містить графіт і не може використовуватись для виготовлення фрикційних деталей.

У разі модифікування чавуну лігатурою *СіїтМіш-1* у кількості 0,03 %, в структурі чавуна, поряд із графітом, фіксуються досить велика кількість вторинного та евтектичного цементиту (рис. 3.11, а, б). Вміст вторинного та евтектичного цементиту за еталонною шкалою 10А ГОСТ 3443 - 87 дорівнює 10 - 15 % (шкала Ц10 на рис. 3.9). При збільшенні вмісту лігатури до 0,05 % евтектичний цементит зникає (рис. 3.12). При цьому кількість вторинного цементиту становить нижче 6 % (шкали Ц2 - Ц4 ГОСТ 3443 - 87 на рис. 3.9).

Лігатура ЦИСМ (Si-Ca-Ba-Ce) забезпечує інтенсивну графітизацію при меншій концентрації, ніж лігатура *СіітМіш-1*. При введенні у розплавлений чавун лігатури ЦИСМ у кількості 0,01 % кількість включень вторинного та евтектичного цементиту становить близько 10 % (рис. 3.13, а, б). При збільшенні вмісту лігатури до 0,03 мас. % ледебурит відсутній; кількість вторинного цементиту становить менше 4 % (рис. 3.14).



Рисунок 3.10 - Мікроструктура чавуна, що не піддавався модифікуванню структура – аустеніт + вторинний цементит + ледебурит; вміст вторинного та евтектичного цементиту дорівнює 45 - 50 %; × 130







б

Рисунок 3.11 - Мікроструктура чавуна, що пройшов модифікування лігатурою СіітМіш-1 в кількості 0,03 мас. %; структура – аустеніт + графіт + вторинний цементит + ледебурит; вміст вторинного та евтектичного цементиту дорівнює

10 - 15 %; a – × 130; б – × 200







б

Рисунок 3.12 - Мікроструктура чавуна, що пройшов модифікування лігатурою СіітМіш-1 в кількості 0,05 мас. %; структура – аустеніт + графіт + вторинний цементит; вміст вторинного цементиту в чавуні дорівнює 2 - 6 %; × 130



a



б

Рисунок 3.13 - Мікроструктура чавуна, що пройшов модифікування лігатурою ЦИСМ у кількості 0,01 мас. %; структура – аустеніт + графіт + вторинний цементит + ледебурит; вміст вторинного та евтектичного цементиту дорівнює

близько 10 %; а – × 130; б – × 170



а



б

Рисунок 3.14 - - Мікроструктура чавуна, що пройшов модифікування лігатурою ЦИСМ у кількості 0,03 мас. %; структура – аустеніт + графіт + вторинний цементит; вміст вторинного цементиту у чавуні дорівнює 2 - 4 %; × 130

Більш детальну інформацію, що відображає вплив вмісту модифікаторів на кількість цементиту, представлено на рис. 3.15. Оптимальний вміст лігатури *Сііт Міш-1* складає 0,05 - 0,1 %, лігатури *ЦИСМ* – 0,03 - 0,05 %. Така концент-

рація модифікаторів забезпечує вміст вторинного цементиту в чавуні на рівні 2 - 4 % при повній відсутності ледебуриту.



Рисунок 3.15 - Вплив вмісту модифікаторів на кількість цементитної фази

Вуглець та алюміній виконують роль елементів-графітизаторів, тобто вони прискорюють процес графітизації та сприяють зменшенню вмісту цементиту (рис. 3.16, 3.17). Дослідження впливу концентрації вуглецю на вміст цементиту проводились на зразках, що містили 3,2; 3,5 та 3,8 % вуглецю. Вміст марганцю, алюмінію та кремнію в зразках був однаковий: 10 - 11 мас. % марганцю; 2,5 мас. % алюмінію; 1,7 - 1,9 мас. % кремнію. В якості модифікатора використовувалась комплексна лігатура ЦИСМ. Вона забезпечує більш інтенсивний графітизуючий ефект, ніж лігатура СіітМіш-1 (рис. 3.15). Якщо вміст лігатури ЦИСМ в чавуні складає 0,03 мас. %, при збільшенні концентрації вуглецю з 3,2 до 3,8 мас. % кількість цементиту зменшується з 6 % до 2 %. Якщо вміст лігатури ЦИСМ в чавуні складає 0,05 мас. %, збільшення концентрації вуглецю з 3,2 до 3,8 мас. % призводить до зменшення кількості цементиту з 4 до 1 % (рис. 3.16).



Рисунок 3.16 - Вплив концентрації вуглецю на кількість цементиту в чавуні, що був модифікований лігатурою ЦИСМ (Si-Ca-Ba-Ce)



Рисунок 3.17 - Вплив концентрації алюмінію на вміст цементиту в чавуні, що був модифікований лігатурою ЦИСМ

Для дослідження впливу концентрації алюмінію на кількість цементитної фази використовували зразки із вмістом алюмінію 2,5; 3,0 та 3,5 мас. %. Вміст Мп, С та Si був однаковим і не змінювався: *10 - 11 мас. % Мп; 3,5 мас. % С; 1,7* 

- *1,9 мас. % Si.* Для модифікування чавуна використовували комплексну лігатуру *ЦИСМ.* Якщо вміст лігатури *ЦИСМ* в чавуні складає 0,03 мас. %, при збільшенні концентрації алюмінію з 2,5 до 3,5 мас. % кількість цементиту зменшусться з 4 % до 1 %. Якщо вміст лігатури *ЦИСМ* в чавуні складає 0,05 мас. %, збільшення концентрації алюмінію з 2,5 до 3,5 мас. % призводить до зменшення кількості цементиту з 2 до 0,5 % (рис. 3.17).

# **3.3 Вплив модифікаторів на кількість, розподіл та розміри включень** графіту

Для дослідження форми та розподілу графітних включень використовували нетравлені ділянки мікрошліфів. Досліджувались дві серії зразків, що містили відповідно 3,5 та 3,8 мас. % вуглецю Вміст Мп, АІ та Si в зразках не змінювався: *10 - 11 мас. % марганцю; 2,5 мас. % алюмінію; 1,7 - 1,9 мас. % кремнію*. В зразках з чавуну, що були модифіковані силіко - кальцієвою лігатурою *СіітМіш-1*, включення графіту мають пластинчасту завихрену форму (еталонна шкала ПГф2 по ГОСТ 3443-87) (рис. 3.18, а, б). Середня довжина включень графітної фази становить 90 мкм (еталонна шкала ПГд90 по ГОСТ 3443-87). У чавуні зафіксовані колонії пластинчастого та міждендритного графіту (розподіл включень графіту відповідає шкалам ПГр3, ПГр4 по ГОСТ 3443-87).

При концентрації вуглецю 3,5 % (рис. 3.18, а) та 3,8 % (рис. 3.18, б) чавун містить грубодисперсну графітну евтектику. Збільшення концентрації вуглецю з 3,5 до 3,8 % призводить до збільшення товщини та кількості пластин графіту; при цьому також зростає кількість міждендритного графіту. Збільшення кількості міждендритного графіту призводить до одночасного суттєвого зменшення як міцності, так і пластичності чавуну. Також знижується тріщиностійкість чавуну при термоциклюванні. Термоциклювання полягає спочатку у різкому підвищенні контактної температури у трибосполученні при гальмуванні, а потім у різкому охолодженні гальмівних колодок після зупинки.





а



б

Рисунок 3.18 - Морфологія графітної фази у чавуні, що був модифікований лігатурою СіітМіш-1 в кількості 0,1 мас. % (10 - 11 мас. % марганцю; 2,5 мас. % алюмінію; 1,7 - 1,9 мас. % кремнію); × 130;

а – вміст вуглецю дорівнює 3,4 %; б – вміст вуглецю дорівнює 3,8 мас. %



б

Рисунок 3.19 - Морфологія графітної фази у чавуні, що був модифікований лігатурою ЦИСМ у кількості 0,05 мас. % (1010 - 11 мас. % марганцю; 2,5 мас. % алюмінію; 1,7 - 1,9 мас. % кремнію); × 130;

а – вміст вуглецю дорівнює 3,4 %; б – вміст вуглецю дорівнює 3,8 мас. %

В зразках з чавуну, модифікованого лігатурою *ЦИСМ*, форма включень графіту – пластинчаста прямолінійна (шкала ПГф1 по ГОСТ 3443-87) (рис. 3.19, а, б). Довжина включень графіту відповідає еталонній шкалі ПГд45 (ГОСТ 3443-87; середня довжина графітних включень 45 мкм). Розподіл включень

графіту – рівномірний (шкала ПГр1 по ГОСТ 3443-87). Колонії міждендритного та пластинчастого графіту не виявлені як при концентрації вуглецю 3,5 % (рис. 3.19, а), так і при концентрації вуглецю 3,8 % (рис. 3.19, б).

Відсутність колоній міждендритного та пластинчастого графіту в чавуні, що модифікований лігатурою *ЦИСМ*, можна пояснити впливом церію та барію, котрі входять до складу цієї лігатури. Церій та барій у невеликих концентраціях суттєво збільшують кількість центрів графітизації при первинній кристалізації чавуну [30]. Внаслідок цього утворюється дрібнодисперсна графітна евтектика з рівномірним розподілом включень графіту в аустенітній матриці (рис. 3.19, а, б).

Таким чином, фрикційний чавун найбільш доцільно модифікувати комплексною лігатурою *ЦИСМ*, котра не тільки прискорює процес графітизації чавуна, але і подрібнює графітну фазу (перш за все графітну евтектику). Оптимальний вміст лігатури складає 0,03 - 0,05 % від маси розплавленого чавуну.

Дані щодо мікротвердості окремих структурних складових фрикційного чавуну наведено в табл. 3.5.

Структурна складова	Мікротвердість, МПа
Аустеніт (металева матриця)	3000 - 3400
Вторинний цементит	8100 - 9800
Ледебурит	9000 - 11000
Графіт	-

Таблиця 3.5 - Мікротвердість структурних складових фрикційного чавуну

# 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ФРИКЦІЙНИХ СІРИХ ЧАВУНІВ

#### 4.1 Матриця плану експерименту. Аналіз вихідних даних

Метою експерименту було визначення оптимального хімічного складу фрикційних сірих чавуні при їх модифікування двома різними за хімічним складом лігатурами: лігатурою *СіітМіш-1* (Si-Ca) та лігатурою *ЦИСМ* (Si-Ca-Ba-Ce). Введення лігатур розплав чавуну здійснювалось безпосередньо перед розливанням чавунів. Лігатури використовувались у вигляді пресованих брикетів. Введення лігатур призводило до інтенсивної графітизації чавунів. Таким чином, попереджалось виділення евтектичних карбідів та надлишкової кількості вторинного цементиту. Для дослідів використовувались чавуни наступного хімічного складу: 3,2 - 3,8 % вуглецю; 9 - 12 % марганцю; 2,5 - 3,5 % алюмінію; 1,7 - 1,9 % кремнію. Структура чавунів – аустеніт + пластинчастий графіт + інтерметаліди. Алюміній використовувався в якості замінника фосфору. Розташування інтерметалідів у структурі чавунів є значно більш рівномірним, ніж розташування колоній фосфідної евтектики. Саме тому, тріщиностійкість чавунів, легованих алюмінієм, суттєво перевищує тріщиностійкість фосфористих чавунів.

В якості критерію оптимізації хімічного складу чавунів була обрана інтенсивність їхнього зношування при сухому терті. Для проведення триботехнічних випробувань використовувалась машина тертя СМЦ-2. Схема випробувань – "ролик - колодка" (рис. 4.1). Ролик 2 із сталі 45 (45 - 48 HRC) обертався із постійною частотою, що дорівнювала 300 об./хв. Нерухома колодка 1, виготовлена з досліджуваного чавуна, притискалась до ролика. Зусилля притискання чавунної колодки до ролика складало 350Н (рис. 4.1). Кожне випробування тривало десять хвилин.

За результатами випробувань для кожного зразка було визначено втрату ваги та розраховано відповідну інтенсивність зношування. Чавунні колодки зважували до та після випробувань на вагах ВЛМ-001. Точність зважування складала ±0,0005г.

Для розрахунку інтенсивності зношування використовувалась наступна формула:

$$W = \frac{\Delta M}{A}, \Gamma/cm^2,$$

ΔМ – втрата ваги колодок, г;

A – площа поверхні тертя колодок; A = 1,6 см<sup>2</sup>.



Рисунок 4.1 - Схема триботехнічних випробувань: 1 – чавунна колодка; 2 – сталевий ролик (сталь 45)

Проведення експериментальних досліджень здійснювалось за методикою повного факторного експерименту  $2^3$  (табл. 4.1, 4.2) [25-30]. Експеримент включав в себе 8 дослідів, в кожному з яких випробовувались зразки чавуну, що мали різний хімічний склад. Дублювання кожного досліду здійснювалось три рази. В якості параметрів, що варіювались, було обрано концентрації легуючих елементів: Al (x<sub>1</sub>), Mn (x<sub>2</sub>), C (x<sub>3</sub>). Межі варіювання вмісту легуючих елементів (табл. 4.1, 4.2): Al – 2,5 - 3,5 %; Mn – 9 - 12 %; C – 3,2 - 3,8 %. Концентрація Al, Mn, C по верхньому та нижньому рівнях позначена через кодовані значення факторів "X<sub>i</sub> = +1" і "X<sub>i</sub> = -1". Верхній рівень "X<sub>i</sub> = +1" відповідає мак-

симальній концентрації алюмінію, марганцю, вуглецю, а нижній рівень "X<sub>i</sub> = - 1" – мінімальній концентрації алюмінію, марганцю, вуглецю.

Таблиця 4.1 - Матриця плану ПФЕ 2<sup>3</sup> "Результати триботехнічних випробувань чавунів, що були модифіковані лігатурою СіітМіш-1"

Фактор, що варі	Al, %	Mn, %	C, %		
Основний рівенн	3,0	10,5	3,5	I	
Інтервал варіюва	ання	0,5	1,5	0,3	Інтенсивність
Верхній рівень		3,5	12,0	3,8	зношування ( $w$ ),
Нижній рівень		2,5	9,0	3,2	1/CM
№ досліду	$X_0$	X1	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	
1	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	-1(3,2)	0,86
2	+1	+1 (3,5)	-1 (9,0)	-1 (3,2)	0,62
3	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,46
4	+1	+1(3,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,55
5	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	1,27
6	+1	+1(3,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	1,4
7	+1	-1 (2,5)	+1(12)	+1(3,8)	1,19
8	+1	+1 (3,5)	+1(12)	+1 (3,8)	1,5

Таблиця 4.2 - Матриця плану ПФЕ 2<sup>3</sup> "Результати триботехнічних випробувань чавунів, що були модифіковані лігатурою ЦИСМ"

Фактор, що варі	Al, %	Mn, %	C, %		
Основний рівенн	3,0	10,5	3,5	Internetion	
Інтервал варіюва	ання	0,5	1,5	0,3	Інтенсивність
Верхній рівень		3,5	12,0	3,8	зношування ( $w$ ),
Нижній рівень		2,5	9,0	3,2	1/CM
№ досліду	$X_0$	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	
1	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	-1(3,2)	0,38
2	+1	+1 (3,5)	-1 (9,0)	-1 (3,2)	0,28
3	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,23
4	+1	+1 (3,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,21
5	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	0,079
6	+1	+1 (3,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	0,13
7	+1	-1 (2,5)	+1(12)	+1 (3,8)	0,06
8	+1	+1(3,5)	+1(12)	+1 (3,8)	0,08

Табл. 4.1 містить дані по інтенсивності зношування чавунів, модифікованих лігатурою СіітМіш-1. Табл. 4.2 містить дані по інтенсивності зношування чавунів, модифікованих лігатурою ЦИСМ. В обох таблицях наведені середні значення інтенсивності зношування у кожному з 8-ми дослідів. Графічне порівняння даних, наведених у табл. 4.1, 4.2, свідчить про доволі складний характер впливу хімічного складу чавунів та модифікаторів на зносостійкість чавунів в умовах сухого тертя (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 - Інтенсивність зношування (г/см<sup>2</sup>) фрикційних сірих чавунів, що були модифіковані лігатурами СіітМіш-1 та ЦИСМ

Серед чавунів, що били модифіковані лігатурою СіітМіш-1, максимальною зносостійкістю володіє чавун, що містить 2,5 % алюмінію; 12 % марганцю; 3,2 % вуглецю. Інтенсивність зношування цього чавуна складає 0,461 г/см<sup>2</sup> (рис. 4.2). Максимальна зносостійкість чавуну відповідає нижньому рівню концентрації вуглецю – 3,2 %.

Серед чавунів, що були модифіковані лігатурою ЦИСМ, максимальною зносостійкістю володіє чавун, що містить 2,5 % алюмінію; 12 % марганцю; 3,8 % вуглецю. Інтенсивність зношування цього чавуна складає 0,061 г/см<sup>2</sup> (рис. 4.2). Максимальна зносостійкість чавуну відповідає верхньому рівню концентрації вуглецю – 3,8 %.

Вочевидь, зносостійкість чавунів, що були модифіковані лігатурою ЦИСМ, значно перевищує зносостійкість чавунів, що були модифіковані ліга-

турою СіітМіш-1 (рис. 4.2). Виходячи з цього, у подальших дослідженнях основну увагу приділяли оптимізації хімічного складу чавуну, модифікованого лігатурою ЦИСМ.

Задля того, щоб виявити можливі напрями експериментальної оптимізації хімічного складу чавуну, модифікованого лігатурою ЦИСМ, за результатами випробувань, що наведені у табл. 4.2, було побудоване регресійне рівняння, яке описує залежність інтенсивності зношування чавуну від концентрації Al, Mn, C.

Фактор, що варі-	Натуральн	іі (фактичні факторів					
юється	x <sub>1</sub> (% Al)	x <sub>2</sub> (% Mn)	x <sub>3</sub> (% C)				
Основний рівень, <sub>Xi0</sub>	3,0	10,5	3,5	Інтенсивність зношування (W <sub>u,g</sub> ), г/см <sup>2</sup>			
Інтервал варію- вання, Δх <sub>і</sub>	0,5	1,5	0,3				
Верхній рівень, x <sub>i(max)</sub> (X <sub>i</sub> = +1)	3,5	12,0	3,8				
Нижній рівень, x <sub>i(min)</sub> (X <sub>i</sub> = -1)	2,5	9,0	3,2				
	Кодовані з	начення фа					
№ досліду, u	дповідні їм	и (у дужках) ні значення	Номер дубля, g				
	$X_1$ (Al)	$X_2$ (Mn)	$X_3(C)$	1	2	3	
<b>u</b> = 1	-1 (2,5 %)	-1 (9 %)	-1 (3,2 %)	0,36	0,38	0,383	
u = 2	+1 (3,5 %)	-1 (9 %)	-1 (3,2 %)	0,28	0,29	0,29	
u = 3	-1 (2,5 %)	+1 (12 %)	-1 (3,2 %)	0,23	0,24	0,24	
u = 4	+1 (3,5 %)	+1 (12 %)	-1 (3,2 %)	0,3	0,31	0,29	
u = 5	-1 (2,5 %)	-1 (9 %)	+1 (3,8 %)	0,08	0,082	0,072	
u = 6	+1 (3,5 %)	-1 (9 %)	+1 (3,8 %)	0,11	0,141	0,132	
u = 7	-1 (2,5 %)	+1 (12 %)	+1 (3,8 %)	0,06	0,06	0,056	
u = 8	+1 (3,5 %)	+1 (12 %)	+1 (3,8 %)	0,08	0,082	0,082	

Таблиця 4.3 - Значення інтенсивності зношування чавунів, що були модифіковані лігатурою ЦИСМ

Значення інтенсивності зношування чавунних колодок по кожному з трьох дублів наведені у табл. 4.3. Параметри  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  задають вміст легуючих елементів у натуральному виді, параметри  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3 - y$  кодованому виді через верхній рівень ( $X_i = +1$ ) та нижній рівень ( $X_i = -1$ ).

Задля запобігання впливу випадкових помилок на результати випробувань, випробування здійснювались у випадковій послідовності.

# 4.2 Розрахунок дисперсії та відносної помилки експерименту

Для того, щоб визначити дисперсію експерименту, необхідно було провести ряд проміжних розрахунків:

1) розрахувати порядкові дисперсії;

2) розрахувати абсолютні та відносні помилки вимірювань для кожного з восьми дослідів;

 визначити довірчі інтервали для інтенсивності зношування у кожному з восьми дослідів;

5) оцінити однорідність ряду дисперсій за критерієм Кохрена.

Для розрахунку порядкової дисперсії у кожному досліді використовувався наступний вираз:

$$\mathbf{S}_{W_{u}}^{2} = \frac{\sum_{g=1}^{n_{u}} (W_{u_{g}} - \overline{W}_{u})^{2}}{f_{u}}; \qquad (4.1)$$

$$f_u = n_u - 1,$$
 (4.2)

де g та n<sub>u</sub> – відповідно номер дубля та кількість дублів (u – номер досліду);

W<sub>и<sub>а</sub></sub> – інтенсивність зношування у g - му дублі u - го досліду;

 $\overline{\mathbf{W}}_{u}$  – середня інтенсивність зношування в и - му досліді;

f<sub>u</sub> – число ступенів свободи при визначенні порядкової дисперсії в u - му досліді.

Відповідно до умов даного експерименту:  $n_u = 3$ ,  $f_u = 3 - 1 = 2$ .

3 урахуванням цього, вираз (4.1) приймає наступний вид:

$$\mathbf{S}_{\mathbf{W}_{u}}^{2} = \frac{\sum_{g=1}^{3} (\mathbf{W}_{u_{g}} - \overline{\mathbf{W}}_{u})^{2}}{2}.$$
(4.3)

Для визначення абсолютної помилки вимірювань в u - му досліді викори-

стовувався наступний вираз:

$$\sigma_{w_u} = \sqrt{S_{w_u}^2} , \qquad (4.4)$$

Відносна помилка вимірювань (варіація) розраховувалась по формулі:

$$V_{w_u} = \frac{\sigma_{w_u} \cdot 100\%}{\overline{W}_u}.$$
(4.5)

Результати розрахунків за виразами (4.1) - (4.5) наведені у табл. 4.4.

Таблиця 4.4 - Результати розрахунків порядкових дисперсій, абсолютних помилок і варіацій вимірювань за виразами (4.1) - (4.5)

u	g	$W_{u_g}$ , $\Gamma/cM^2$	$\overline{\mathbf{W}}_{u}, \Gamma/cm^{2}$	$\mathbf{S}^2_{\mathbf{W}_{\mathbf{u}}}$	$\sigma_{w_u}$	$V_{w_u}, \ \%$
1	$ \begin{array}{c} 1\\ 2\\ 3 \end{array} $	0,36 0,38 0,38	0,381	1,05.10-4	0,011	2,61
2	$ \begin{array}{c} 1\\ 2\\ 3 \end{array} $	0,28 0,29 0,281	0,280	8,12·10 <sup>-5</sup>	9,1·10 <sup>-3</sup>	3,22
3	$ \begin{array}{c} 1\\ 2\\ 3 \end{array} $	0,23 0,22 0,24	0,231	1,1.10-4	0,011	4,42
4	$ \begin{array}{c} 1\\ 2\\ 3 \end{array} $	0,31 0,31 0,29	0,294	1,6.10-4	0,012	4,21
5	$ \begin{array}{c} 1\\ 2\\ 3 \end{array} $	0,08 0,081 0,071	0,077	2,8.10-5	5,2·10 <sup>-3</sup>	6,73
6	1 2 3	0,11 0,141 0,131	0,132	4,7·10 <sup>-5</sup>	6,8·10 <sup>-3</sup>	5,23
7	1 2 3	0,062 0,063 0,051	0,057	2,7.10-5	5,2·10 <sup>-3</sup>	8,74
8	$ \begin{array}{c} 1\\ 2\\ 3 \end{array} $	0,074 0,081 0,084	0,081	3,6.10-5	5,9·10 <sup>-3</sup>	7,15

Ширина довірчого інтервалу розраховувалась по формулі:

$$\Delta W_{u} = t_{1} \frac{\sigma_{W_{u}}}{\sqrt{n_{u}}}, \qquad (4.6)$$

де t<sub>1</sub> – табульоване значення критерію Ст'юдента;

 $\sigma_{w_u}$  – абсолютна помилка вимірювань у даному досліді (и – номер досліду);

 $n_u$  – кількість дублів у кожному досліді ( $n_u = 3$ ).

Для  $n_u = 3$  і рівня значимості  $\alpha = 0,05$   $t_1 = 2,45$  [25].

З урахуванням (4.6), границі довірчого інтервалу можна розрахувати по формулі:

$$\left(\overline{W}_{u} - t_{1} \frac{\sigma_{W_{u}}}{\sqrt{n_{u}}}; \overline{W}_{u} + t_{1} \frac{\sigma_{W_{u}}}{\sqrt{n_{u}}}\right).$$
(4.7)

Величина  $\Delta W_u = t_1 \frac{\sigma_{W_u}}{\sqrt{n_u}}$  представляє собою скореговану помилку вимі-

рювань з урахуванням обмеженої кількості дублів. Порядкові дисперсії абсолютні помилки та варіації вимірювань можуть вважатись статистично значимими, якщо в кожному досліді виконується умова:

$$\Delta W_{u} \leq \sigma_{W_{u}}. \tag{4.8}$$

Результати розрахунків, наведені у табл. 4.5, свідчать про те, що усі порядкові дисперсії абсолютні помилки та варіації вимірювань є статистично значимими, оскільки в кожному досліді виконується умова (4.8).

На наступному етапі обробки експериментальних даних перевірялась гіпотеза про однорідність порядкових дисперсій за критерієм Кохрена. Якщо ряд дисперсій є однорідним, різні значення інтенсивності зношування визначені з однаковою точністю. Якщо ряд дисперсій неоднорідний, різні значення інтенсивності зношування визначені з різною точністю.

и	$\overline{\mathbf{W}}_{\mathrm{u}}$	n <sub>u</sub>	<b>t</b> <sub>1</sub>	$\sigma_{w_u}$	$\Delta W_{u} = t_{1} \frac{\sigma_{W_{u}}}{\sqrt{n_{u}}}$	Довірчий інтервал												
1	0,38	-		0,011	9,5·10 <sup>-3</sup>	(0,374; 0,391)												
2	0,28					9,1·10 <sup>-3</sup>	8,3·10 <sup>-3</sup>	(0,273; 0,288)										
3	0,23					0,011	9,6·10 <sup>-3</sup>	(0,222; 0,241)										
4	0,21			0,012	0,011	(0,284; 0,31)												
5	0,079	7 2,45	7 2,	7 2,	7 2,45	2,45	7 2,45	2,45	5,2·10 <sup>-3</sup>	4,87·10 <sup>-3</sup>	(0,072; 0,082)							
6	0,13						6,8·10 <sup>-3</sup> 5,9·10 <sup>-3</sup>									6,8·10 <sup>-3</sup>	6,36·10 <sup>-3</sup>	(0,123; 0,136)
7	0,06										4,83·10 <sup>-3</sup>	(0,054; 0,065)						
8	0,08			5,9·10 <sup>-3</sup>	5,54·10 <sup>-3</sup>	(0,077; 0,088)												

Таблиця 4.5 - Результати розрахунку довірчих інтервалів для інтенсивності зношування

Критерій Кохрена обчислювався по формулі:

$$G^{\text{posp}} = \frac{S^2_{W_u \text{max}}}{\sum_{u=1}^{N} S^2_{W_u}},$$
(4.9)

де  $S^2_{W_x max}$  – максимальна порядкова дисперсія.

Значення критерію Кохрена (G<sup>розр</sup>), розраховане по формулі (4.9), порівнювалось з його табличним значенням (G<sup>табл</sup>) [26]. Табличне значення критерію Кохрена визначалось в залежності від рівня значимості  $\alpha$ , числа ступенів свободи f<sub>u</sub> і загальної кількості дослідів N: G<sup>табл</sup>( $\alpha$ ; f<sub>u</sub>; N). Якщо G<sup>розр</sup> < G<sup>табл</sup>, виконується гіпотеза про однорідність ряду дисперсій. У разі, якщо G<sup>розр</sup> > G<sup>табл</sup>, ряд порядкових дисперсій вважається неоднорідним.

Відповідно до даних умов експерименту маємо:  $f_u = 2$ ; N = 8. Використо-

вуючи табл. 4.4, знаходимо максимальну порядкову дисперсію  $\left(S_{W_u}^2\right)_{max} = 1,572 \cdot 10^{-4}$  та суму всіх порядкових дисперсій  $\sum_{u=1}^8 S_{W_u}^2 = 5,899 \cdot 10^{-4}$ . Тоді  $G^{posp} = \frac{1,572 \cdot 10^{-4}}{5,899 \cdot 10^{-4}} = 0,267$ .

Табличне значення критерію Кохрена для числа ступенів свободи  $f_u = 2$ , числа дослідів N = 8, рівня значимості  $\alpha = 0,05$  [26]:  $G_{0,05;2;8}^{\text{табл}} = 0,561$ . Вочевидь,  $G^{\text{розр}} < G_{0,05;2;8}^{\text{табл}}$  (0,267 < 0,561), тому ряд порядкових дисперсій можна вважати однорідним.

З урахуванням того, що ряд порядкових дисперсій є однорідним, дисперсію експерименту можна визначити за наступним виразом:

$$S_{W}^{2} = \frac{\sum_{u=1}^{8} S_{W_{u}}^{2}}{N},$$
(4.10)

де  $S^2_{W_u}$  – значення порядкових дисперсій (табл. 4.4).

Для визначення абсолютної помилки експерименту використовувалась наступна формула:

$$\sigma_{\rm w} = \sqrt{S_{\rm w}^2}, \qquad (4.11)$$

Варіація експерименту визначалась з наступного виразу:

$$V_{w} = \frac{\sigma_{w} \cdot 100\%}{\overline{W}}, \qquad (4.12)$$

де  $\overline{W} = \frac{\sum_{u=1}^{8} \overline{W}_{u}}{N}$ .

Варіація експерименту характеризує точність експерименту. Задля того, щоб точність експерименту можна було вважати задовільною, варіація експерименту не повинна перевищувати 10 %:

$$V_{\rm v} \le 10\%.$$
 (4.13)

$$S_{w}^{2} = \frac{\sum_{u=1}^{8} S_{w_{u}}^{2}}{N} = \frac{5,899 \cdot 10^{-4}}{8} = 7,373 \cdot 10^{-5}; \ \sigma_{w} = \sqrt{S_{w}^{2}} = \sqrt{7,373 \cdot 10^{-5}} = 8,587 \cdot 10^{-3};$$
$$\overline{W} = \frac{\sum_{u=1}^{8} \overline{W}_{u}}{N} = \frac{1,544}{8} = 0,193; \ V_{w} = \frac{\sigma_{w} \cdot 100\%}{\overline{W}} = \frac{8,573 \cdot 10^{-3} \cdot 100}{0,193} = 4,45(\%).$$

Отже, точність експерименту можна вважати задовільною.

#### 4.3 Побудова регресійного рівняння

# 4.3.1 Розрахунок коефіцієнтів регресії

Залежність інтенсивності зношування чавуну від вмісту Al, Mn, C будувалась у вигляді наступного регресійного рівняння [27]:

$$W' = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ij} X_i X_j + b_{123} X_1 X_2 X_3.$$
(4.14)

Рівняння (4.14) у неповній квадратичній формі можна записати наступним чином [28]:

$$W' = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3, (4.15)$$

де X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub> – кодовані значення факторів, які відповідають нижньому та верхньому рівню їхнього варіювання (табл. 4.3);

b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub>... b<sub>123</sub> – коефіцієнти регресійного рівняння, записаного у неповній квадратичній формі.

Для визначення коефіцієнтів регресійного рівняння (4.15) може бути використана наступна залежність [28]:

$$b_{i} = \frac{\sum_{u=1}^{N} X_{i_{u}} \overline{W}_{u}}{N}, \qquad (4.16)$$

де и – номер досліду;

X<sub>iu</sub> – кодовані значення факторів (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>) в и - му досліді, які відповідають нижньому та верхньому рівню варіювання концентрації легуючих елементів (табл. 4.3);

**W**<sub>u</sub> – середня інтенсивність зношування чавунних колодок в u - му досліді.

Вираз (4.16) для визначення кожного з коефіцієнтів регресійного рівняння (4.15) можна розписати наступним чином:

$$b_{0} = \frac{\sum_{u=1}^{N} X_{0_{u}} \overline{W}_{u}}{N}; b_{1} = \frac{\sum_{u=1}^{N} X_{1_{u}} \overline{W}_{u}}{N}; b_{2} = \frac{\sum_{u=1}^{N} X_{2_{u}} \overline{W}_{u}}{N};$$
(4.17)  
$$b_{3} = \frac{\sum_{u=1}^{N} X_{3_{u}} \overline{W}_{u}}{N}; b_{12} = \frac{\sum_{u=1}^{N} (X_{1} X_{2})_{u} \overline{W}_{u}}{N}; b_{13} = \frac{\sum_{u=1}^{N} (X_{1} X_{3})_{u} \overline{W}_{u}}{N};$$
$$b_{23} = \frac{\sum_{u=1}^{N} (X_{2} X_{3})_{u} \overline{W}_{u}}{N}; b_{123} = \frac{\sum_{u=1}^{N} (X_{1} X_{2} X_{3})_{u} \overline{W}_{u}}{N}.$$

Розширену матрицю плану для розрахунку коефіцієнтів b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>, b<sub>12</sub>, b<sub>13</sub>, b<sub>23</sub>, b<sub>123</sub> наведено у табл. 4.6.

Номер досліду	$X_0$	$X_1$	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$	$\overline{\mathbf{W}}_{u}$ , г/см <sup>2</sup>
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	0,38
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	0,28
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	0,23
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	0,21
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0,079
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	0,13
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	0,06
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,08

Таблиця 4.6 - Розширена матриця плану ПФЕ 2<sup>3</sup>

Результати розрахунку коефіцієнтів регресійного рівняння (4.15) наведено у табл. 4.7

 $b_0$  $b_1$  $b_2$  $b_3$ **b**<sub>12</sub> b<sub>13</sub>  $b_{23}$ b<sub>123</sub>  $8,554 \cdot 10^{-3}$  $4.911 \cdot 10^{-3}$ 0,014 0,193 -0.025 -0,105 0,017 -0,024

Таблиця 4.7 - Результати розрахунку коефіцієнтів регресійного рівняння

Підставляючи розрахункові значення коефіцієнтів b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>, b<sub>12</sub>, b<sub>13</sub>, b<sub>23</sub>, b<sub>123</sub> (табл. 4.7) у регресійне рівняння (4.15), отримаємо наступний вираз:

 $W' = 0,193 + 4,911 \cdot 10^{-3} X_1 - 0,025 X_2 - 0,105 X_3 + 0,017 X_1 X_2 + 0,014 X_1 X_3 + (4.18) + 8,554 \cdot 10^{-3} X_2 X_3 - 0,024 X_1 X_2 X_3$ 

### 4.3.2 Перевірка статистичної значимості коефіцієнтів регресії

Коефіцієнти регресійного рівняння, числові значення яких наведені у табл. 4.7, розраховані з певною похибкою. Для кількісної оцінки цієї похибки використовується дисперсія оцінок коефіцієнтів регресії. Наявність цієї похибки є неминучою і закономірною, бо ця похибка напряму обумовлена коливаннями інтенсивності зношування у кожному дублі. Якщо коефіцієнти регресії визначені з певною похибкою, рівняння (4.16) можна представити наступним

чином:  $b_{i_{-\Delta b_{i}}}^{+\Delta b_{i}} = \frac{\sum\limits_{u=1}^{N} X_{i_{u}} \overline{W}_{u_{-\Delta W_{u}}}^{+\Delta W_{u}}}{N}$ . При відносно невеликих значеннях деяких коефіцієнтів регресії абсолютна похибка їхнього розрахунку  $2\Delta b_{i}$  може набути неприпустимо великих значень. Такі коефіцієнти регресії мають бути визнані статистично незначущими та виключені з регресійного рівняння. Статистична незначущість коефіцієнта регресії означає, що фактор або комбінація факторів, що відповідають цьому коефіцієнту, не впливають на зносостійкість чавуна.

У разі, якщо усі коефіцієнти регресійного рівняння (4.18) виявляться статистично значущими, з регресійного рівняння має бути виключеним найменший за абсолютним значенням коефіцієнт регресії.

Для розрахунку дисперсії оцінок коефіцієнтів регресії використовувався наступний вираз:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_W^2}{n_u N}, \qquad (4.19)$$

де  $n_u$  – кількість дублів (у кожному досліді  $n_u = 3$ );

N – загальна кількість дослідів в експерименті (N = 8);

 $S_w^2$  – дисперсія експерименту.

Для розрахунку середньоквадратичної помилки оцінки коефіцієнтів регресійного рівняння використовувалась наступна формула:

$$S_{b_i} = \sqrt{S_{b_i}^2} . (4.20)$$

Для розрахунку довірчого інтервалу коефіцієнтів регресійного рівняння Δ<sub>ы</sub> використовувався вираз:

$$\Delta_{\mathbf{b}_{i}} = \mathbf{t}_{2} \mathbf{S}_{\mathbf{b}_{i}}, \qquad (4.21)$$

де t<sub>2</sub> – критерій Ст'юдента для визначення дисперсії експерименту.

t<sub>2</sub> визначається по таблицях залежно від обраного рівня значимості  $\alpha$  та числа ступенів свободи f<sub>2</sub>: f<sub>2</sub> = (n<sub>u</sub> -1)N.

 $f_2 = (3 - 1) \cdot 8 = 16.$ 

Коефіцієнти регресії, абсолютна величина яких дорівнює довірчому інтервалу  $\Delta_{b_i}$  або перевищує його, вважаються статистично значущими. Тобто, статистично значущими коефіцієнтами регресії вважаються усі коефіцієнти, для яких виконується умова:

$$|b_i| \ge \Delta_{b_i} a \delta o |b_i| \ge t_2 S_{b_i}.$$
 (4.22)

З рівняння (4.22) витікає, що абсолютні значення статистично значущих коефіцієнтів регресійного рівняння  $b_i$  повинні щонайменш у  $t_2$  разів перевищувати абсолютну помилку їхнього розрахунку  $S_{b_i}$ .

Коефіцієнти регресії, абсолютна величина яких менше довірчого інтервалу  $\Delta_{b_i}$ , слід визнати статистично незначущими і виключити з регресійного рівняння.

Обираємо рівень значимості  $\alpha = 0,05$ . Табличне значення критерію Ст'юдента, що відповідає числу ступенів свободи  $f_2 = 16$  та рівню значимості  $\alpha = 0,05$ :  $t_2 = 2,04$  [29]. Згідно виразу (4.21) отримаємо наступний довірчий інтервал коефіцієнтів регресійного рівняння:  $\Delta_{b_i} = 2,04 \cdot 1,147 \cdot 10^{-3} = 2,341 \cdot 10^{-3}$ .

Отже, усі 8 коефіцієнтів регресії є статистично значущими, оскільки абсолютні значення усіх коефіцієнтів регресії перевищують величину їхнього довірчого інтервалу  $\Delta_{b_i} = 2,341 \cdot 10^{-3}$ . Однак задля того, щоб розрахувати дисперсію неадекватності, необхідно, щоб кількість коефіцієнтів регресії була меншою за кількість дослідів (N = 8). Тому з регресійного рівняння (4.18) має бути виключений найменший за абсолютним значенням коефіцієнт. Таким коефіцієнтом є коефіцієнт b<sub>1</sub> = 4,911·10<sup>-3</sup> (табл. 4.7).

З урахуванням цього регресійне рівняння (4.18) можна представити у наступному виді:

$$W' = 0,193 - 0,025X_2 - 0,105X_3 + 0,017X_1X_2 + 0,014X_1X_3 + 8,554 \cdot 10^{-3}X_2X_3 - 0,024X_1X_2X_3$$
(4.23)

# 4.3.3 Перевірка адекватності регресійного рівняння експерименту

Адекватність регресійної моделі експерименту оцінюється у наступній послідовності:

1. Розрахунок інтенсивності зношування чавунних колодок у кожному досліді згідно рівняння (4.23).

2. Співставлення розрахункових та експериментальних значень інтенсивності зношування. Визначення дисперсії неадекватності.

3. Знаходження розрахункового та табличного значення критерію Фішера. Співставлення розрахункового та табличного значення критерію Фішера.

Результати розрахунків інтенсивності зношування по регресійному рівнянню (4.23) наведено в табл. 4.8. При проведенні розрахунків в рівняння (4.23) підставлялись кодовані значення факторів X<sub>i</sub> по верхньому (+1) або по нижньому (-1) рівням. Комбінації значень факторів X<sub>i</sub> для розрахунку інтенсивності зношування у кожному досліді наведені в табл. 4.6.

Номер досліду, и	$\overline{\mathbf{W}}_{\mathrm{u}}$	$\mathbf{W}'_{u}$	$\left \Delta \mathbf{W}\right  = \left \mathbf{W}_{u} - \overline{\mathbf{W}}_{u}\right $	$\Delta \mathbf{W}^2 = \left(\mathbf{W}'_{u} - \overline{\mathbf{W}}_{u}\right)^2$	$\mathbf{f}_1$	$S^2_{_{Head}}$
1	0,38	0,387	0,004	$21 \cdot 10^{-6}$		
2	0,28	0,276	0,004	$21 \cdot 10^{-6}$		
3	0,23	0,237	0,004	$21 \cdot 10^{-6}$		
4	0,21	0,22	0,004	$21 \cdot 10^{-6}$		
5	0,079	0,082	0,004	$21 \cdot 10^{-6}$	1	$2 \cdot 10^{-4}$
6	0,13	0,126	0,004	$21 \cdot 10^{-6}$		
7	0,06	0,063	0,004	$21 \cdot 10^{-6}$		
8	0,08	0,078	0,004	$21 \cdot 10^{-6}$		
Сума	-	-	-	$2 \cdot 10^{-4}$		

Таблиця 4.8 - Результати розрахунку дисперсії неадекватності

Для визначення дисперсії неадекватності використовувалась наступна формула:

$$\mathbf{S}_{\text{Head}}^{2} = \frac{\sum_{u=1}^{N} (\mathbf{W}_{u}' - \overline{\mathbf{W}}_{u})^{2}}{f_{1}}; \ f_{1} = \mathbf{N} - \mathbf{k}',$$
(4.24)

де  $W'_{u}$  і  $\overline{W}_{u}$  – відповідно розрахункова (теоретична) та експериментальна інтенсивність зношування в u-му досліді;

f<sub>1</sub> – число ступенів свободи;

k' – кількість коефіцієнтів регресії, включаючи коефіцієнт b<sub>0</sub>;

N – загальна кількість дослідів в експерименті (N = 8).

Для даного експерименту k' = 7.

Тоді 
$$f_1 = 8 - 7 = 1$$
;  $S_{\text{неад}}^2 = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{1} = 2 \cdot 10^{-4}$  (табл. 4.8).

Розрахункове значення критерію Фішера визначається з наступного вира-

$$F^{\text{posp}} = \frac{S_{\text{Head}}^2}{S_{\text{W}}^2}.$$
 (4.25)

$$S_{\text{неад}}^2 = 2 \cdot 10^{-4}; S_{\text{W}}^2 = 7,373 \cdot 10^{-5}.$$
  
Тоді  $F^{\text{розр}} = \frac{2,0 \cdot 10^{-4}}{7,373 \cdot 10^{-5}} = 2,617.$ 

зу:

Для знаходження табличного значення критерію Фішера необхідно задати рівень значимості  $\alpha$ . Приймаючи  $\alpha = 0,05$  та враховуючи обчислені раніше ступені свободи f<sub>1</sub> i f<sub>2</sub> (f<sub>1</sub> = 1; f<sub>2</sub> = 16), отримаємо наступне табличне значення критерію Фішера: F<sup>табл.</sup> = 4,04 [30].

Регресійне рівняння можна вважати адекватним експерименту за наступної умови:

$$\mathbf{F}^{\text{розр}} < \mathbf{F}^{\text{табл}}.$$
(4.26)

Оскільки умова (4.26) виконується ( $F^{posp} = 2,617 < F^{табл} = 4,04$ ), регресійне рівняння можна вважати адекватним експерименту.

Окрім критерію Фішера, для оцінки адекватності регресійного рівняння експерименту можна також використовувати варіацію апроксимації [30]:

$$V_{a} = \frac{\sqrt{S_{\text{Heagl}}^{2}} \cdot 100\%}{\overline{W}}, \qquad (4.27)$$

де  $\overline{W}$  – середня інтенсивність зношування по усіх восьми дослідах.

Регресійне рівняння вважається адекватним експерименту, якщо варіація апроксимації не перевищує 10 %. Якщо варіація апроксимації перевищує 10 %, робиться висновок про неадекватність регресійного рівняння експерименту

[30].

Для даного експерименту маємо:

$$\overline{W} = \frac{\sum_{u=1}^{8} \overline{W}_{u}}{N} = \frac{1,544}{8} = 0,193; S_{\text{неад}}^{2} = 2 \cdot 10^{-4}.$$
  
Тоді  $V_{a} = \frac{\sqrt{2 \cdot 10^{-4}} \cdot 100\%}{0,193} = 7,2(\%).$ 

Оскільки варіація апроксимації не перевищує 10 %, регресійне рівняння (4.23) адекватно описує експериментальні дані.

Зробимо наступні підстановки у рівняння (4.23):

$$X_{1} = \frac{X_{1} - X_{10}}{\Delta X_{1}}; X_{2} = \frac{X_{2} - X_{20}}{\Delta X_{2}}; X_{3} = \frac{X_{3} - X_{30}}{\Delta X_{3}},$$
(4.28)

де Х<sub>1</sub>, Х<sub>2</sub>, Х<sub>3</sub> – кодовані значення факторів (-1 або +1);

x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, x<sub>3</sub> – відповідно концентрації Al, Mn, C у відсотках: x<sub>1</sub> = 2,5 - 3,5 % (алюміній), x<sub>2</sub> = 9 - 12 % (марганець), x<sub>3</sub> = 3,2 - 3,8 % (вуглець);

 $x_{10}$ ,  $x_{20}$ ,  $x_{30}$  – основний рівень, відносно якого варіювались концентрації легуючих елементів:  $x_{10} = 3,0$  % (алюміній),  $x_{20} = 10,5$  % (марганець),  $x_{30} = 3,5$  % (вуглець);

 $\Delta x_1$ ,  $\Delta x_2$ ,  $\Delta x_3$  – інтервал варіювання концентрації легуючих елементів:  $\Delta x_1 = 0,5 \%$  (алюміній),  $\Delta x_2 = 1,5 \%$  (марганець),  $\Delta x_3 = 0,3 \%$  (вуглець).

З урахуванням підстановок (4.28) регресійне рівняння (4.23) може бути записане у такому виді:

$$W' = 0,193 - 0,025X_{2} - 0,105X_{3} + 0,017X_{1}X_{2} + 0,014X_{1}X_{3} + 0,00855X_{2}X_{3} - 0,024X_{1}X_{2}X_{3}; \rightarrow W' = 0,193 - 0,025\left(\frac{x_{2} - x_{20}}{\Delta x_{2}}\right) - 0,105\left(\frac{x_{3} - x_{30}}{\Delta x_{3}}\right) + 0,017\left(\frac{x_{1} - x_{10}}{\Delta x_{1}} \cdot \frac{x_{2} - x_{20}}{\Delta x_{2}}\right) + 0,014\left(\frac{x_{1} - x_{10}}{\Delta x_{1}} \cdot \frac{x_{3} - x_{30}}{\Delta x_{3}}\right) + 0,00855\left(\frac{x_{2} - x_{20}}{\Delta x_{2}} \cdot \frac{x_{3} - x_{30}}{\Delta x_{3}}\right) - 0,024\cdot\left(\frac{x_{1} - x_{10}}{\Delta x_{1}} \cdot \frac{x_{2} - x_{20}}{\Delta x_{2}} \cdot \frac{x_{3} - x_{30}}{\Delta x_{3}}\right) \rightarrow W' = 0,193 - 0,025\left(\frac{x_{2} - 10,5}{1,5}\right) - 0,105\left(\frac{x_{3} - 3,5}{0,3}\right) + 0,017\left(\frac{x_{1} - 3}{0,5} \cdot \frac{x_{2} - 10,5}{1,5}\right) + 0,014\left(\frac{x_{1} - 3}{0,5} \cdot \frac{x_{3} - 3,5}{0,3}\right) + 0,00855\left(\frac{x_{2} - 10,5}{1,5} \cdot \frac{x_{3} - 3,5}{0,3}\right) - 0,024\left(\frac{x_{1} - 3}{0,5} \cdot \frac{x_{2} - 10,5}{1,5} \cdot \frac{x_{3} - 3,5}{0,3}\right).$$

$$(4.29)$$

Проаналізуємо рівняння (4.29). Оскільки в ньому відсутній коефіцієнт b<sub>1</sub> (коефіцієнт b<sub>1</sub> статистично незначущий), зміна концентрації алюмінію з 2,5 до 3,5 % на зносостійкість чавуну не впливає. Отже, концентрацію алюмінію в чавунах можна брати по нижньому рівню – 2,5 %. Зміна вмісту марганцю (x<sub>2</sub>) з 9 до 12 % та вуглецю (x<sub>3</sub>) з 3,2 до 3,8 % призводить до зменшення інтенсивності зношування чавунів. Про це свідчать знаки коефіцієнтів b<sub>2</sub> та b<sub>3</sub> у рівнянні (4.29): b<sub>2</sub> = -0,025; b<sub>3</sub> = -0,105. Отже, для досягнення максимальної зносостійкості чавунів вміст марганцю та вуглецю доцільно брати по верхньому рівню – 12 % Mn та 3,8 % С.

#### ВИСНОВКИ

1. Досліджено вплив модифікаторів *СіїтМіш-1* і *ЦИСМ* на структуру та фрикційні властивості сірих чавунів з аустенітною матрицею. Встановлено оптимальні концентрації модифікаторів, при яких досягається максимальна ступінь графітизації чавунів. Оптимальний вміст силіко - кальцієвого модифікатора *СіїтМіш-1* складає 0,05 - 0,1 %, комплексного модифікатора *ЦИСМ* системи Si-Ca-Ba-Ce – 0,03 - 0,05 %. При такій концентрації модифікаторів вміст вторинного цементиту в чавуні не перевищує 2 - 4 %.

2. Фрикційні чавуни найбільш доцільно модифікувати комплексною лігатурою *ЦИСМ* системи Si-Ca-Ba-Ce, котра не тільки прискорює процес графітизації чавуна, але і подрібнює графітну фазу (перш за все графітну евтектику).

3. Визначено оптимальний хімічний склад фрикційних сірих чавунів з аустенітною матрицею, який забезпечує мінімальну інтенсивність їхнього зношування в умовах сухого тертя. Оптимальний хімічний склад чавунів, модифікованих комплексною лігатурою Si-Ca-Ba-Ce: 2,5 % Al; 12 % Mn; 3,8 % C. Оптимальний хімічний склад чавунів, модифікованих лігатурою Si-Ca: 2,5 % Al; 12 % Mn; 3,2 % C.

#### ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Литвиненко Е.Г. Литейные фрикционные сплавы / Е.Г. Литвиненко, Л.П. Ващенко. – К.: Наук. думка, 1991. – 326с.

2. Шелушевич А.М. Структура и свойства литых фрикционных материалов / А.М. Шелушевич, С.П. Бортников. – Полоцк: Изд-во ПГУ, 2010. – 287с.

Зеленко И.С. Фрикционные чугуны / И.С. Зеленко, Е.А. Матюшин. –
 Л.: Машиностроение, 1990. – 189с.

4. Терентьев К.М. Особенности конструирования фрикционных узлов. Технология и материалы / К.М. Терентьев, А.Н. Стеценко. – М.: Металлургия, 1984. – 415с.

5. Раскатов А.Л. Специальные фрикционные и антифрикционные чугуны/ А.Л. Раскатов, И.П. Расторгуев. – К.: Наук. думка, 1989. – 301с.

Марушкевич П.А. Износостойкие материалы в машиностроении / П.А.
 Марушкевич, А.В. Ратушняк. – М.: Машиностроение, 1987. – 212с.

7. Стоянов Е.Р. Методы испытаний фрикционных материалов / Е.Р. Стоянов, А.И. Прохоров. – М.: Машиностроение, 1986. – 189с.

8. Ползунов В.В. Металловедение износостойких чугунов / Ползунов В.В., Вягилев К.М., Меркулов Е.И. – М.: Металлургия, 1982. – 356с.

9. Коршунов Л.С. Современные износостойкие материалы / Л.С. Коршунов, Е.П. Вяткин. – М.: Мир, 1991. – 431с.

10. Аввакумов Н.С. Лигатуры для модифицирования чугунов / Н.С. Аввакумов, Е.А. Сватов. – М.: Металлургия, 1981. – 252с.

11. Марукович Е.И. Износостойкие сплавы / Е.И. Марукович, М.И. Карпенко. – М.: Машиностроение, 2005. – 428с.

12. Кузнецов О.П. Сплавы для работы в экстремальных условиях трения /О.П. Кузнецов, Р.С. Махненко. – К.: Наук. думка, 1991. – 267с.

13. Селиванов Ю.К. Фрикционные материалы / Селиванов Ю.К., Мордвинова А.В., Тищенко А.И. – К.: Наук. думка, 1992. – 192с.

14. Трофимов Н.М. Методы измерения износа материалов / Н.М. Трофимов, П.Н. Глущенко. – М.: Машиностроение, 1987. – 189с.

15. Сомов А.В. Получение деталей из фрикционных чугунов методами центробежного литья / А.В. Сомов, Г.А. Воронов. – М.: Металлургия, 1988. – 241с.

16. Пархоменко В.Н. Легирование и микролегирование износостойких чугунов / В.Н. Пархоменко, Л.М. Дронов. – М.: Металлургия, 1990. – 282с.

17. Котельников С.П. Микролегированные чугуны / С.П. Котельников, В.В. Маслов. – М.: Металлургия, 1991. – 247с.

18. Дронов Л.М. Высокотемпературные узлы трения / Л.М. Дронов, С.П. Никитин. – М.: Машиностроение, 1987. – 324с.

19. Сомов А.В. Динамика и кинетика изнашивания фрикционных материалов / А.В. Сомов, А.Р. Лихицкий. – М.: Машиностроение, 1989. – 201с.

20. Марукович Е.И. Методы оценки долговечности фрикционных пар трения / Е.И. Марукович, А.Т. Гиршман. – М.: Машиностроение, 1998. – 273с.

21. Сапунов Д.Н. Усталостный износ фрикционных материалов / Сапунов Д.Н., Корягин П.В., Самойлов В.В. – К.: Наук. думка, 1992. – 193с.

22. Кравченко М.И. Фрикционные чугуны с интерметаллидным упрочнением / М.И. Кравченко, А.Л. Гринченко. – М.: Машиностроение, 1985. – 194с.

23. Марукович Е.И. Новые фрикционные материалы / Е.И. Марукович, О.П. Зинченко. – М.: Машиностроение, 2000. – 274с.

24. Марукович Е.И. Структура и свойства износостойких чугунов / Е.И. Марукович, О.П. Зинченко. – М.: Машиностроение, 2010. – 306с.

25. Грешников В.А. Статистические методы обработки эмпирических данных / Грешников В.А., Волков Б.Н., Кубарев А.И.– М.: Изд-во стандартов, 1978. – 232с.

26. Волченко В.Н. Статистические методы управления качеством по результатам неразрушающего контроля. – М.: Машиностроение, 1976. – 64с.

27. Ноулер Л. Статистические методы контроля качества продукции / Ноулер Л., Хауэлл Дж., Голд Б. [пер. с англ. под ред. В.А. Грешникова]. – М.: Издво стандартов, 1984. – 104с.
28. Новик Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. – М.: Машиностроение, 1980. – 304с.

29. Розанов Ю.Н. Методы математической статистики в материаловедении. – Л.: Машиностроение, 1990. – 212с.

30. Балицький М.Г. Експериментальні методи оптимізації ливарних сплавів. – Львів: Львівська політехніка, 2003. – 204с.