

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії

Кафедра Машинознавства та обладнання промислових підприємств

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до магістерської роботи

освітньо-кваліфікаційного рівня *магістр*

спеціальності *131 прикладна механіка*
спеціалізації - *технології машинобудування*

на тему «**Дослідження впливу мікролегування на зносостійкість гальмівних колодок з фрикційного сірого чавуна**»

Виконав: студент групи ТМ-17дм

Бескровний В.О.
(прізвище, та ініціали)

_____ (підпис)

Керівник Шевченко О.В.
(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Завідувач кафедри Архипов О. Г.
(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент Сергієнко О.В.
(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота за темою: «Дослідження впливу мікролегування на зносостійкість гальмівних колодок з фрикційного сірого чавуна»: 86с., 18 табл., 26 рис., 24 джерела.

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

Об'єкт дослідження – процес мікролегування фрикційного сірого чавуна.

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

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

У першому розділі проаналізовано вплив різних модифікаторів на структуру та властивості фрикційних сірих чавунів.

У другому розділі наведено методіку експериментальних досліджень.

У третьому розділі досліджено вплив лігатур ЦИСМ (Si-Ca-Ba-Ce) та Сіі-тМіш на структуру фрикційного сірого чавуну.

У четвертому розділі оптимізовано хімічний склад фрикційного чавуну за критерієм мінімального зношування.

Виконано аналіз шкідливих та небезпечних факторів, що впливають на персонал лабораторії. Розроблено заходи щодо забезпечення комфортних умов праці персоналу лабораторії.

ЗМІСТ

С.

СКРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....	
ВСТУП.....	5
1 СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ВИБОРУ СИСТЕМИ ЛЕГУВАННЯ ТА МІКРОЛЕГУВАННЯ СІРИХ ФРИКЦІЙНИХ ЧАВУНІВ.....	6
1.1 Характеристика фрикційного зносу матеріалів.....	6
1.2 Сірі фрикційні чавуни.....	8
2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	22
3 РЕЗУЛЬТАТИ МЕТАЛОГРАФІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ	31
3.1 Еталонні мікроструктури для оцінки кількості, розподілу та розмірів включень графіту і цементиту в чавунах.....	31
3.2 Вплив модифікаторів на кількість, розподіл та розміри включень цементиту.....	41
3.3 Вплив модифікаторів на кількість, розподіл та розміри включень графіту.....	49
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ФРИКЦІЙНИХ СІРИХ ЧАВУНІВ.....	53
4.1 Матриця плану експерименту. Аналіз вихідних даних.....	53
4.2 Розрахунок дисперсії та відносної помилки експерименту.....	58
4.3 Побудова регресійного рівняння.....	65
4.3.1 Розрахунок коефіцієнтів регресії.....	66
4.3.2 Перевірка статистичної значимості коефіцієнтів регресії.....	69
4.3.3 Перевірка адекватності регресійного рівняння експерименту.....	71
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАУКОВО- ДОСЛІДНИХ РОБІТ.....	78
ВИСНОВКИ.....	85
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	86

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

H – мікротвердість, МПа.

HB – твердість за Бринелем.

HV – твердість за Вікерсом.

HRC – твердість за Роквелом.

δ – відносне подовження, %.

σ_m – межа текучості, МПа.

σ_e – межа міцності, МПа.

$\sigma_{0,2}$ – умовна межа текучості, МПа.

σ_{-1} – границя втоми, МПа.

ψ – відносне звуження, %.

μ – коефіцієнт Пуасона.

ВСТУП

Гальмування та фрикційний знос в умовах сухого тертя являють собою специфічні нестационарні процеси, які супроводжуються суттєвими структурними змінами в поверхневих шарах деталей, що контактують між собою. Для інтенсивних процесів гальмування, що супроводжуються значним тепловиділенням і високими температурами на фрикційному контакті, істотний вплив на інтенсивність зношування надає температура.

Для фрикційних вузлів тертя характерні наступні режими роботи:

1. Легкі, коли на поверхні тертя температура не перевищує 250°C.
2. Середні і важкі, при яких температура відповідно підвищується до 250 - 600°C та 600 - 1000°C.
3. Надважкі, коли температура досягає 1000 - 1300°C і більше.

Для виготовлення фрикційних елементів, що працюють в умовах короткочасного локального підвищення температури до 700°C, широко використовуються сірі чавуни.

Основними особливостями сірих фрикційних чавунів є: високий коефіцієнт тертя, висока зносостійкість і здатність протистояти утворенню задирів у широкому інтервалі температур. Цим вимогам задовільно відповідають сірі фосфористі чавуни з металевою основою із дрібнозернистого перліту з рівномірно розподіленими включеннями подвійної та потрійної фосфідної евтектики і пластинчастого графіту. Водночас проводяться інтенсивні дослідження по оптимізації хімічного складу сірих фрикційних чавунів шляхом їх мікролегування та модифікування.

1 СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ВИБОРУ СИСТЕМИ ЛЕГУВАННЯ ТА МІКРОЛЕГУВАННЯ СІРИХ ФРИКЦІЙНИХ ЧАВУНІВ

1.1 Характеристика фрикційного зносу матеріалів

Гальмування та фрикційний знос в умовах сухого тертя являють собою специфічні нестационарні процеси, які супроводжуються суттєвими структурними змінами в поверхневих шарах деталей, що контактують між собою. Для інтенсивних процесів гальмування, що супроводжуються значним тепловиділенням і високими температурами на фрикційному контакті, істотний вплив на інтенсивність зношування надає температура.

Для фрикційних вузлів тертя характерні наступні режими роботи [1, 2]:

1. Легкі, коли на поверхні тертя температура не перевищує 250°C.
2. Середні і важкі, при яких температура відповідно підвищується до 250 - 600°C та 600 - 1000°C.
3. Надважкі, коли температура досягає 1000 - 1300°C і більше.

Із збільшенням контактних напруг і температур посилюються зміни субструктури матеріалів та їх фізико-хімічних властивостей. Водночас спостерігається зміна характеру процесів адсорбції, десорбції, зношування.

Залежно від енергії, що виділяється при сухому терті, в активних шарах фрикційного матеріалу можуть здійснюватись дифузійні процеси, процеси рекристалізації, поліморфні перетворення, пластична деформація, процеси розчинення і виділення надлишкових фаз. Для ділянок локального контакту швидкості нагрівання та охолодження можуть досягати дуже високих значень ($10^2 - 10^4$ °C/c і $10^3 - 10^4$ °C/c відповідно [3]), що впливає на характер взаємодії фрикційних поверхонь, динаміку процесів тертя і руйнування поверхонь. Поняття про динаміку процесів, що протікають при сухому терті, включає не тільки зміну структури і властивостей матеріалів для окремих їх мікрооб'ємів, а і зміну самого процесу тертя. Накопичення залишкових напруг, а також зміни структури та фізико - механічних властивостей можуть змінити стан фрикційного матеріалу в поверхневому шарі і його зносостійкість.

В умовах інтенсивного фрикційного зносу працюють прокатні валки, з'єднувальні тарілки, букси, гальмівні барабани і колодки, втулки клапанів, багато деталей автоматів і напівавтоматів, ряд деталей текстильних і дорожніх машин [3].

Можливість реалізації при сухому терті фазових і структурних перетворень визначається наступними факторами [3, 4]:

- локальністю нагрівання матеріалу на ділянках мікроконтакту до температур вище критичних;
- зсувом критичних точок фазових переходів під дією пластичної деформації;
- здійсненням перетворень мікродифузійним шляхом і визначаючим впливом на швидкість процесів, що протікають при формуванні нових структур, перепадів температур.

При цьому пружні і пластичні деформації відбуваються в умовах всебічного стиснення, що значно полегшує внутрішньокристалічні зрушення. Для неприродлених поверхонь питоме навантаження нелінійно впливає на знос, причому більшою мірою для поверхонь з малою площею контакту. Мікрогеометрія контактних поверхонь впливає на знос фрикційних елементів досить істотно. Діаметр плям торкання більшою мірою визначається геометрією мікронерівностей. Знос при сухому терті часто відбувається при високих температурах, що вимагає додання фрикційним сплавам низки спеціальних властивостей: високої термічної стійкості, хорошої теплопровідності, необхідної корозійної стійкості, відсутності фазових перетворень у виробках в усьому діапазоні робочих температур.

Фрикційний знос, як правило, носить втомний характер [4]. Поверхневе руйнування відбувається в результаті багаторазового порушення фрикційних зв'язків, особливо для деталей, що знаходяться в періодичному контакті. При терті першого роду (ковзанні) поряд з пружними деформаціями відбуваються пластичні деформації – зсув та зріз. Інтенсивне пластичне деформування поверхневого шару матеріалу супроводжується його локальним нагріванням. Це сприяє протіканню структурних та фазових перетворень в поверхневому шарі

матеріалу. Пластичні деформації, викликаючи підвищену активність поверхневого шару фрикційного матеріалу, призводять до окислення як його самого, так і продуктів зносу [3, 4]. Оксиди, що при цьому утворюються, впливають на умови тертя.

При терті другого роду (коченні), характерному для роботи зубчастих передач, шарнірних пар і підшипників кочення, дотичні точки проходять повторювані цикли, що викликає контактну втому і знос. Однією з форм прояву зносу робочої поверхні таких деталей є пітінг – осповидне (фрагментарне) викрашування матеріалу у зоні тертя. Інші типи руйнування проявляються у вигляді заїдання та схоплювання.

Зносостійкість литих деталей при сухому терті, також як і при абразивному зносі, знаходиться, як правило, у прямій залежності від твердості виливків. У деяких випадках ця залежність має зворотний характер, і мартенситні та інші тверді структури забезпечують литим деталям малу стійкість в умовах фрикційного зносу, що пояснюється їх незадовільною прироблюваністю та недостатньою пластичністю. Тому при сухому терті білі зносостійкі чавуни практично не використовуються, а перевага віддається графітیزованим сплавам системи залізо - вуглець - кремній [5, 6].

1.2 Сірі фрикційні чавуни

Сірі фрикційні чавуни відносяться до широко поширених конструкційних матеріалів, що використовуються для виготовлення деталей гальмівних пристроїв, механізмів зчеплення, фрикційних та інших механізмів тертя.

Основними особливостями сірих фрикційних чавунів є: високий коефіцієнт тертя, висока зносостійкість і здатність протистояти утворенню задирів у широкому інтервалі температур. Цим вимогам задовільно відповідають сірі фосфористі чавуни з металевою основою із дрібнозернистого перліту з рівномірно розподіленими включеннями подвійної та потрійної фосфідної евтектики і пластинчастого графіту [7]. Первинній структурі належить вирішальне значення у формуванні властивостей сірих фрикційних чавунів [7, 8].

У чавунах з вуглецевим еквівалентом $C_e > 5,2$ при низьких швидкостях охолодження утворюється розеткова форма графіту, що негативно впливає на механічні та експлуатаційні властивості фрикційних виробів. При цій формі графіту в центральній зоні зразків діаметром 30 - 60 мм утворюється переважно ферит, що призводить до зниження міцності, вібростійкості і зносостійкості чавуну [9]. Тому для отримання задовільних властивостей міцності і зносостійкості фосфористих чавунів при виготовленні фрикційних товстостінних виливків з заевтектичних сплавів повинні витримуватись співвідношення $Si / C = 0,65$ і $Si / (C + N) > 0,65$ [9].

Більш високі механічні властивості забезпечують чавуни доевтектичного та евтектичного складу. У виливках з товщиною стінок 40 мм при підвищеному вмісті фосфору утворюється металева основа П96 (Ф4) - ФЕЗ - ПД0 і графіт ПГ6 - ПГр3 - ПГд45 - ПГф2. Така структура забезпечує литим виробам хороші фрикційно - зносні властивості при роботі в парі з асбофрикційними матеріалами [8, 9].

Якщо в бінарній системі Fe - C критична швидкість кристалізації, при якій сірий чавун переходить у білий, дорівнює 420 - 450 мкм/с, то в потрібній системі Fe - C - P вона змінюється від 30 до 100 мкм/с. Це є однією з причин отримання структури білого чавуну з підвищеною концентрацією цементиту [7, 9, 10].

Зміна довжини включень графіту в основному визначається умовами охолодження і розміром відлитого зразка. Чисто перлітна структура в масивних зразках забезпечується тільки при відносно низькій ступені евтектичності ($S_e = 0,7 - 0,8$), що характерно для фосфористих нелегованих і модифікованих чавунів, які використовуються для виробництва тонкостінних фрикційних виливків. При збільшенні ступеня евтектичності до 0,8 - 0,9 кількість фериту в структурі різко зростає, а зносостійкість зразків знижується [10].

Встановлено, що добавка фосфору в сірий чавун підвищує його фрикційні властивості, але сприяє утворенню тріщин, знижує термічну стійкість, стабільність коефіцієнта тертя при підвищених температурах і механічні властивості, особливо динамічну міцність (табл. 1.1) [10]. Для поліпшення механічних влас-

тивостей фрикційного сірого чавуну доцільно реалізувати в ньому хоча б обмежену пластичність, що запобігає його крихкому руйнуванню.

При збільшенні ступеня евтектичності фосфористих чавунів до 0,8 - 1,0 має місце значне зниження пластичності, хоча дисперсність перліту залишається досить високою як при литті в кокіль, так і в пісчано - глинисті форми. У виливках з товщиною стінок понад 30 мм виникає осьова пористість і неоднорідність структури. У виливках з товщиною стінок 16 - 20 мм при литті в кокіль утворюється структура вибіленого чавуну при $S_e > 0,75$.

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

Вміст фосфору, мас. %	Збільшення коефіцієнта тертя, %	Твердість чавуну, HB	Характеристики зносостійкості при сухому терті			Термічна стійкість, цикли
			Швидкість зношування у процесі прироблення, мкм/г	Зношування при торцевому терті на машині І47-К54, мг/г	Відносна зносостійкість при терті котіння із ковзанням, %	
0,06	100	172	16 - 18,6	260	100	140
0,12	112	180	13 - 14,4	182	114	132
0,18	122	189	10,6 - 11,2	166	118	126
0,3	128	196	8,8 - 10,4	149	132	114
0,55	132	218	7,5 - 8,7	132	144	86
0,96	138	225	7,0 - 7,8	116	156	73
1,35	144	233	6,2 - 7,2	108	165	62
1,85	148	241	5,6 - 6,7	85	178	36

Перехід від структури сірого чавуну до структури білого чавуну в системі залізо - вуглець - фосфор відбувається при більш низьких швидкостях охолодження, ніж в системі залізо - вуглець. Порівнюючи структури евтектик, отриманих при однакових швидкостях кристалізації, можна сказати, що потрібна

евтектика виявляється значно більш дисперсною, ніж подвійна. Це вказує на більш високу ступінь переохолодження при кристалізації залізо - вуглець - фосфідної евтектики [11].

Щоб у дослідженнях розрізнити Fe_3C і Fe_3P , травлення зразків потрібно здійснювати реактивом Мураками, який забарвлює Fe_3P у коричневий колір [9].

Для роботи у фрикційних парах, в яких контактні поверхні нагріваються до температури не більше $250^{\circ}C$ і небезпеки утворення тріщин немає, вміст фосфору в чавуні може бути доведений до 1,35 - 1,85 % (табл. 1.1). Однак для виготовлення фрикційних виробів, що працюють при підвищених температурах та ударних навантаженнях, коли одночасно з високою зносостійкістю необхідні підвищені термічна стійкість і динамічна міцність (наприклад, для гальмівних барабанів), слід використовувати більш термостійкі чавуни або інші фрикційні сплави [9, 10, 11].

Для отримання сірих фрикційних чавунів поряд з легуванням фосфором використовують комплексні лігатури і модифікатори, що містять бориди тугоплавких металів, дисульфід молібдену, нітрид бору і рідкоземельні метали, а також інші компоненти, що знижують знос при сухому терті і підвищують коефіцієнт тертя. Встановлено, що фрикційні матеріали з боридами тугоплавких металів і нітридом бору мають стабільний коефіцієнт тертя, хорошу прироблюваність, не схоплюються з контртілом, є корозійностійкими, негорючими, володіють необхідною механічною міцністю, зносостійкістю, а в ряді випадків і високими пружно-пластичними властивостями.

Для фрикційних виробів, що в процесі експлуатації нагріваються до температур $250 - 500^{\circ}C$, більш ефективними конструкційними матеріалами є мікролеговані сірі чавуни, що містять не більше 0,15 % фосфору. У табл. 1.2 наведено дані про вплив ряду легуючих елементів на твердість і величину зносу при сухому терті сірих фрикційних чавунів у виливках з товщиною стінок 30 - 40 мм [12, 13].

На первинну кристалізацію чавуну і його зносостійкість впливають температурні режими плавки, позапічної обробки, розливання, а також кількість і склад неметалічних включень і домішок (табл. 1.3) [14]. Вони визначають як

виділення і зростання графіту, так і структуру металевої основи, механічні та експлуатаційні властивості чавуну. На практиці для контролю якості фосфористого чавуну у пісчані ливарні форми відливають технологічні проби квадратного перетину з розмірами 25×25 мм або діаметром 35 мм і довжиною 120 мм. Експрес - контроль проводять по виду зламу технологічної проби.

Таблиця 1.2 - Вплив мікролегування на твердість і зносостійкість сірих фрикційних чавунів

Твердість, НВ	Зниження зносу, %	Відносна стабільність коефіцієнта тертя, %	Присадка мікролегуючих добавок						
			Mo	Cr	Cu	Ni	V	Sb	B
178	3,0	122	-	0,23	-	-	-	-	-
182	5,1	128	-	-	-	0,15	-	-	-
186	7,8	136	0,12	-	-	-	-	-	-
190	10,2	132	-	-	-	-	0,17	-	-
195	12,5	138	-	-	-	-	-	0,23	-
202	15,1	146	-	-	-	-	-	-	0,35
207	17	130	-	-	0,55	-	-	-	-
212	20,2	155	-	0,12	-	-	-	-	0,17
221	25,3	156	-	0,23	0,55	-	-	-	-
228	30	158	-	-	-	0,15	-	0,23	-
235	35,7	162	-	-	-	-	0,17	-	0,35
241	43,2	170	-	0,12	0,55	-	-	0,23	-
248	50,5	184	0,47	-	-	0,35	-	-	-
256	58	188	0,5	-	0,27	-	0,17	-	-
264	60,5	192	0,5	-	-	0,17	-	0,23	-

Таблиця 1.3 - Вплив модифікаторів на структуру і твердість фрикційних

чавунів

№	Вміст елементів, мас. %								Структура	Твердість, НВ
	C	Si	Mn	P	PЗМ	B	S	N		
1	3,53	2,42	0,12	0,08	-	-	0,02	-	П50; Ф50	181 - 193
2	3,53	2,42	0,12	0,08	0,03	-	-	-	П70; Ф30	187 - 201
3	3,52	2,43	0,12	0,08	0,07	-	-	-	П80; Ф20	221 - 235
4	3,51	2,45	0,12	0,07	0,16	-	-	-	П100	241 - 255
5	3,28	2,12	0,16	0,16	0,03	-	0,02	-	П75; Ф20; Л5	217 - 227
6	3,28	2,12	0,16	0,16	-	-	-	-	П85; Ф15; Л5	225 - 237
7	3,27	2,13	0,16	0,16	0,08	-	-	-	П90; Л10	235 - 250
8	3,25	2,15	0,15	0,16	0,16	-	-	-	П70; Л30	255 - 272
9	3,33	2,47	0,24	0,12	-	-	0,02	0,005	П80; Л20	217 - 227
10	3,32	2,52	0,23	0,11	-	0,03	0,02	0,006	П85; Ф15	227 - 235

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

Практичний інтерес представляє технологія виробництва виливків із зносостійкого доевтектичного чавуну Fe - C - Si - P з його заливкою у форму з пе-

регрівом вище температури плавлення на 100 - 250°C і швидкістю охолодження від 1,8 до 4 К/с з розплавленого стану до температури ліквідусу [15].

Проблему отримання чавунних кокільних виливків без аномальної феритно - графітової структури до теперішнього часу повністю не вирішено. Значна частина тонкостінних кокільних виливків, отриманих без вибілювання, містить в структурі на феритній основі міждендритний дисперсний графіт, що різко знижує їхні експлуатаційні властивості, особливо зносостійкість [15].

Режим зміцнювальної термічної обробки і, зокрема, температуру нагрівання для чавуну з міждендритним графітом (кокільне лиття) необхідно вибрати з урахуванням особливостей вихідної структури чавуну і її зміни в процесі нагрівання. Температура аустенізації чавуну з міждендритним графітом повинна призначатися не на 30 - 50°C вище критичної точки A_{c1} , як для звичайних сірих чавунів з пластинчастим графітом, а на 100 - 150°C вище A_{c1} [15].

Модифікування доевтектичних зносостійких чавунів рідкоземельними металами (РЗМ) в кількості 0,03 - 0,16 % знижує точки первинних і евтектичних перетворень, збільшує евтектичне переохолодження, подрібнюючи структуру чавуну і підвищуючи його твердість та зносостійкість [16]. У чавунах, хімічний склад яких близький до евтектичного складу, евтектичне переохолодження незначне і встановлення зв'язку між даними термічного аналізу і властивостями чавуну ускладнюється. Метод контролю якості розплаву по кривих охолодження і усадки чавунів по тривалості не перевищує 3 хв. і дозволяє проводити корегування хімічного складу розплаву, виплавленого в дуговій або індукційній печі, безпосередньо перед розливанням в ливарні форми [16].

По характеру впливу на мікроструктуру чавуну модифікатори на основі рідкоземельних металів можна розділити на дві групи [16]:

1. Модифікатори, що прискорюють процес графітизації, але не впливають на форму та розподіл включень графіту (модифікатори систем Si - Ca, Si - Ca - Na).

2. Модифікатори, що прискорюють процес графітизації та водночас подрібнюють графітну фазу, особливо графітну евтектику (модифікатори систем Si - Ba, Si - Ce, Si - Ba - Ce).

Слід відзначити, що позитивний вплив рідкоземельних металів на мікроструктуру сірих фрикційних чавунів спостерігається при їхньому сумарному вмісті не більше 0,18 %. При більш високій концентрації рідкоземельних металів у чавунах процес графітизації уповільнюється, а вміст карбідів збільшується. Важливим також є те, що модифікатори на основі РЗМ сильно прискорюють графітизацію вторинних карбідів та карбідів ледебуритної евтектики і водночас уповільнюють графітизацію карбідів, що входять до складу перліту [16]. За рахунок цього у чавунах, комплексно модифікованих РЗМ, отримати структуру перліту в металевій матриці значно простіше, ніж у чавунах, не модифікованих РЗМ (сплави № 1 та № 4 в табл. 1.3). В металевій матриці чавунів, не модифікованих РЗМ, поряд із перлітом може міститись значна кількість фериту. Ферит вкрай негативно впливає на фрикційну зносостійкість сірих чавунів.

Коефіцієнт тертя, пластичність і міцність сірого чавуну, що має ступінь евтектичності 0,8 - 1,0, істотно підвищуються при легуванні молібденом у кількості 0,12 - 0,9 %. Для нейтралізації карбідоутворюючі дії молібдену в чавун можуть вводиться сурьма та нікель [17].

Для підвищення в'язкості чавуну може використовуватись комплексне його легування молібденом і міддю або молібденом і нікелем. Поєднання молібдену та нікелю дозволяє отримувати бейнітний чавун, що володіє одночасно високою міцністю, в'язкістю і відносно стабільним при підвищенні температури коефіцієнтом тертя [17].

Мікролегування сірого чавуну бором забезпечує підвищення стійкості коефіцієнта тертя внаслідок утворення карбоборидів і більш дисперсної та твердої евтектики, ніж фосфідна евтектика. Виливки з чавуну, мікролегованого бором в кількості до 0,35 %, мають більш високу герметичність, ніж виливки з високофосфористих чавунів. При збільшенні вмісту бору більше 0,35 % знижуються пластичність і тріщиностійкість чавуну [18].

З даних, наведених у табл. 1.2 - 1.4, видно, що комплексне мікролегування є ефективним методом підвищення міцності, твердості та зносостійкості литих деталей з фрикційних чавунів [18]. Титан та TiN у фосфористих чавунах не використовують, оскільки вони знижують коефіцієнт тертя.

Таблиця 1.4 - Вплив мікролегування на твердість і міцність фрикційних чавунів

Твердість, HB	σ_B , МПа	Вміст мікролегуючих елементів, мас. %						
		Mo		Cu	Ni	Sb	V	B
172	197	-	-	-	-	-	-	-
186	211	-	0,13	-	-	-	-	-
187	220	-	-	-	0,35	-	-	-
189	221	0,12	-	-	-	-	-	-
191	232	-	-	-	-	-	0,17	-
193	232	-	-	-	-	0,23	-	-
197	232	-	-	-	-	-	-	0,35
201	240	-	-	0,55	-	-	-	-
220	251	-	0,23	0,55	-	-	-	-
223	263	-	-	-	0,15	0,23	-	-
227	272	-	-	-	-	-	0,17	0,35
235	283	-	0,12	0,55	-	0,23	-	-
237	294	0,47	-	-	0,35	-	-	-
245	295	0,5	-	0,27	-	-	0,17	-
249	298	0,5	-	-	0,17	0,23	-	-

При мікролегуванні фосфористих фрикційних чавунів металевою сурьмою остання витісняє фосфор з твердих фаз у рідкий розчин, що призводить до збільшення площі, яку займають включення фосфідної евтектики [19]. Кількість цементиту у виливках зростає, що призводить до збільшення мікротвердості фосфідної евтектики і фрикційно - зносних властивостей виливків.

Можна припустити, що евтектика в сплавах Fe - C - Si - P - Sb не складна фосфідно - сурм'яниста, а звичайна потрійна голчата типу ФЕ4. Диференціальний термічний аналіз і мікроаналіз структури фосфідної евтектики підтверджують це припущення [20]. Збільшення при мікролегуванні сурьмою площі, яку займають окремі включення фосфідної евтектики, призводить до збільшення стабільності коефіцієнта тертя і зниження зносу. Такий вплив є характерним

і для хрому. Однак хром призводить до нерівномірного розподілу фосфідної евтектики і розташуванню її переважно по границях зерен у вигляді замкнутої сітки [20]. При комплексному мікролегуванні чавуну сурьмою в кількості 0,15 - 0,35 % і хромом у кількості 0,05 - 0,25 % відзначається більш рівномірний розподіл фосфідної евтектики і підвищення термічної стійкості чавуну. При вмісті в чавуні 0,23 % бору і 0,1 % сурьми твердість виливків підвищується до 227 НВ, а термічна стійкість – до 230 циклів [21].

Для отримання голчатої бейнітоподібної структури фрикційні чавуни додатково легують молібденом. При мікролегуванні чавуну молібденом твердість підвищується до 245 - 320 НВ, а фрикційні властивості досягають параметрів, необхідних для виготовлення штампів, провідок дротяних станів і сепараторів підшипників. Сучасні фрикційні чавуни з бейнітоподібною структурою комплексно легують вольфрамом, молібденом і нікелем [20]. При комплексному мікролегуванні підвищується щільність чавуну в товстостінних виливках. Схильність до усадкової пористості фосфористих чавунів знижується:

- при введенні бору, барію і вісмуту;
- при зниженні температур модифікування і заливки;
- при збільшенні часу витримки розплаву після мікролегування і модифікування;
- при зменшенні вмісту в розплаві фосфору, хрому, марганцю, алюмінію і сірки;
- при використанні просушених пісчано-глинистих ливарних форм і коків.

Додаткове введення в розплав кремнію, кальцію, цирконію і вуглецю збільшує схильність чавуну до усадкової пористості і знижує його фрикційні властивості. Зміна співвідношення між фосфором, кремнієм, марганцем і хромом в фосфористих чавунах є найважливішим резервом регулювання стабільності коефіцієнта тертя та інших фрикційних властивостей, а присадка молібдену в кількості 0,3 - 0,6 % підвищує фрикційну теплостійкість і службові властивості. Чавуни, леговані 0,3 - 0,6 % молібдену, 0,2 - 0,4 % фосфору і 0,03 - 0,06 % бору, характеризуються однорідною структурою графіту і металевої основи (навіть у

товстостінних виливках), мають високі механічні та фрикційні властивості, стабільний (до 600°C) коефіцієнт тертя [19, 21]. З них виготовляють великі фрикційні накладки, циліндри і товстостінні барабани. Чавуни, що містять тільки фосфор і бор або фосфор і ванадій, можуть бути рекомендовані тільки для виготовлення тонкостінних виливків, які працюють при температурах до 500°C.

Широке розповсюдження отримали високолеговані алюмінієві чавуни з пластинчастим графітом. Вони володіють рядом цінних фізичних та експлуатаційних властивостей: високою корозійною стійкістю, зносостійкістю, жароміцністю, стабільним коефіцієнтом тертя і високою теплопровідністю. Сприятливим результатом впливу алюмінію на ростостійкість чавунів є зміщення критичних точок фазових перетворень в область високих температур [22]. Ця обставина має особливо важливе значення при роботі деталей в умовах циклічних навантажень. При термоциклічному впливі в області температур фазових перетворень може відбуватись нерівномірне поперемінне розширення і стиснення під впливом великої різниці питомих обсягів фаз, що утворюються. Все це сприяє утворенню тріщин і, в кінцевому підсумку, викликає зростання, а потім і руйнування литих деталей.

У структурі алюмінієвих чавунів завжди знаходиться певна кількість різних сполук (зокрема сульфідів і фосфідів), що утворюються завдяки наявності у сплавах постійних домішок [23]. Відносно висока гетерогенність будови алюмінієвих чавунів створює помітні труднощі при встановленні закономірностей, що пов'язують структуру з властивостями сплавів.

У сплавах з високим вмістом вуглецю алюміній впливає як на процес графітизації, так і на структуру металевої основи. Алюміній сприяє графітизації чавуну. Однак при збільшенні вмісту алюмінію понад 5 % його графітуюча здатність знижується, а при 9 - 16 % алюмінію сплав кристалізується без виділення графіту [23]. Чавуни цієї групи характеризуються високою твердістю та крихкістю; вони погано обробляються усіма видами механічної обробки. Подальше підвищення в чавуні вмісту алюмінію до 25 % знову призводить до інтенсивної графітизації. Чавун, легований 19 - 25 % алюмінію, має цілком задовільні ливарні властивості. Частина алюмінію зв'язана у нітриди [23]. Цей легова-

ний чавун може бути використаний для виготовлення зубчастих коліс планетарних редукторів, гальмівних колодок скребкових конвеєрів та інших гальмівних пристроїв.

Властивості алюмінієвих чавунів визначаються специфічною структурою графіту, який знаходиться у вигляді коротких пластин з заокругленими кінцями [24]. Виливки з алюмінієвих чавунів, виготовлені в пісчаних формах, мають більш чисту поверхню, ніж виливки із звичайного сірого чавуну. Алюмінієвий чавун відрізняється також підвищеною корозійною стійкістю внаслідок утворення на поверхні тонкого захисного шару з оксиду алюмінію. При вмісті алюмінію понад 26 % чавун стає дуже твердим і крихким.

Відносно оптимальної структури металевої матриці сірих фрикційних чавунів єдиної думки серед дослідників не існує. Більшість дослідників відзначають, що вибір оптимальної структури металевої матриці напряму залежить від умов експлуатації деталей [8, 11, 14, 18, 20]. Якщо температура у зоні тертя не перевищує 250°C, максимальною фрикційною зносостійкістю володіють чавуни з мартенситною та мартенситно - бейнітною металевою основою. Мартенсит утворюється без додаткової термічної обробки у процесі охолодження виливки у ливарній формі при концентрації нікелю в чавуні 3,5 - 4,0 %.

При температурі у зоні тертя 250 - 450°C оптимальною структурою металевої основи вважається бейніт. Бейніт значно менш чутливий, ніж мартенсит, до концентраторів напруг, які утворюють пластинки графіту, і забезпечує високу тріщиностійкість сірого чавуну при різкій зміні температури у зоні тертя [14, 18, 20, 21].

Безпосередньо у виливках отримати структуру бейніту (нижнього або верхнього) вкрай складно. Тому найчастіше виливки піддають ізотермічному гартуванню. Технологічний процес ізотермічного гартування включає наступні операції [20]: аустенізацію, охолодження до температури ізотермічного перетворення, витримку при цій температурі і охолодження до кімнатної температури. Аустенізація проводиться при температурі 870 - 910°C в печах безокисного нагрівання. Температура ізотермічного перетворення може коливатись в межах від 300 до 500°C.

Оскільки проведення ізотермічного гартування потребує додаткових матеріальних та енергетичних витрат, на практиці його застосовують досить рідко, а підвищення термостійкості та тріщиностійкості фрикційних чавунів забезпечують не бейнітною структурою металевої основи, а структурою зернистого перліту [19].

Якщо температура у зоні тертя періодично підвищується до 450 - 600°C, найкращим варіантом структури металевої основи сірих фрикційних чавунів є марганцевий аустеніт [20, 21]. Вміст марганцю в аустенітних сірих чавунах складає 10 - 13 %. При такій концентрації марганцю утворюється стабільний аустеніт, який в умовах інтенсивної пластичної деформації поверхневих шарів фрикційних елементів сильно зміцнюється, але не розпадається з утворенням крихкого мартенситу. Марганцевий аустеніт ефективно пручається втомному руйнуванню завдяки поєднанню двох властивостей: здатності до сильного зміцнення при пластичному деформуванні та здатності до релаксації внутрішніх напруг, що виникають при пластичному деформуванні. Частковій релаксації внутрішніх напруг сприяють підвищені температури в зоні фрикційного контакту.

Аналіз сучасних підходів до вибору системи легування та мікролегування сірих фрикційних чавунів дозволяє зробити наступні висновки:

1. Максимальною тріщиностійкістю та теплостійкістю в умовах сухого тертя при періодичному підвищенні температури у зоні тертя до 250 - 500°C володіють сірі чавуни, в яких вміст фосфору не перевищує 0,15 - 0,2 мас. %.

2. Ефективним заміником фосфору в сірих фрикційних чавунах є бор. Оптимальна концентрація бору складає 0,3 - 0,35 мас. %.

3. У виливках невеликого розміру або невеликої товщини для запобігання утворенню вторинних та евтектичних карбідів, а також великої кількості фериту слід використовувати чавуни, модифіковані рідкоземельними металами.

4. При підвищених температурах у зоні тертя найбільш оптимальними структурами металевої основи сірих фрикційних чавунів є зернистий перліт та марганцевий аустеніт.

2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мета досліджень полягала у вивченні впливу хімічного складу модифікаторів і вмісту легуючих елементів на структуру та фрикційні властивості аустенітних сірих чавунів. Хімічний склад чавунів змінювався у наступних межах: 3,2 - 3,8 мас. % С; 9 - 12 мас. % Mn; 2,5 - 3,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si. Цілеспрямовано варіювались концентрації вуглецю, марганцю та алюмінію. Концентрація кремнію у всіх зразках залишалась на постійному рівні – 1,7 - 1,9 мас. %. Хімічний склад чавунів контролювався в умовах заводської лабораторії на спектрометрі *SPECTROLAB - F8*.

Алюміній вводився до складу чавунів як замітник фосфору. Відомо, що фосфор суттєво підвищує схильність чавунів до вибілювання. Якщо в бінарній системі Fe - C критична швидкість кристалізації, при якій сірий чавун переходить у білий, дорівнює 420 - 450 мкм/с, то в потрійній системі Fe - C - P вона змінюється від 30 до 100 мкм/с [7, 9, 10]. Алюміній при вмісті до 5 мас. %, на відміну від фосфору, сприяє графітизації чавунів [23].

Для модифікування чавунів використовувались два типи лігатур: силіко - кальцієва лігатура *СiimMiu-1* та комплексна лігатура *ЦИСМ* системи Si-Ca-Ba-Se. Лігатури вводились у розплавлені чавуни у вигляді пресованих брикетів безпосередньо перед розливкою чавунів у ливарні форми – кокілі з теплоізоляційним покриттям по ТУ 226.32.884 - 86. Перед введенням у розплавлений чавун брикети зважувались на оптико-механічних вагах *ВЛМ-001* з точністю $\pm 0,0005$ г.

Відливались зразки трьох типів – 1) циліндричні діаметром 40 мм та довжиною 100 мм; 2) призматичні з розміром у поперечному перерізі 30 × 30 мм та довжиною 120 мм; 3) призматичні розміром 20 × 15 × 10 мм.

Циліндричні зразки використовувались для металографічного аналізу, а також для вимірювання твердості і мікротвердості. На призматичних зразках квадратного перетину (30 × 30 мм) контролювалась коерцитивна сила (для аустенітних чавунів вона повинна дорівнювати нулю). Призматичні зразки розмі-

ром $20 \times 15 \times 10$ мм використовувались для триботехнічних випробувань (див. розділ 4).

Твердість вимірювалась за шкалами Бринеля та Роквела відповідно на твердомірах *ТШ* та *ТК*. Підготовка зразків для вимірювання твердості здійснювалась наступним чином. Відлитий циліндричний зразок діаметром 40 мм та довжиною 100 мм розрізався на токарському верстаті *16К20* відрізним різцем на 4 окремих зразка. Потім торці зразків вирівнювались прохідним упорним різцем.

Випробування на твердість по Бринелю (рис. 2.1) здійснювалось вдавлюванням у поверхню зразка сталеві кульки діаметром 10 мм. Зусилля вдавлювання – 30000 Н, тривалість витримки під навантаженням – 10 с. Циліндричний зразок торцевою поверхнею встановлювався на предметний столик твердоміра.

Випробування складалось з повідомлення зразку двох навантажень: попереднього та остаточного. Попереднє навантаження повідомлялось вручну шляхом підняття столика так, щоб кулька вдавлювалась у поверхню зразка. Це досягалось поворотом маховика за годинниковою стрілкою до упору. Остаточне навантаження (30000 Н) повідомлялось автоматично шляхом натискання кнопки, розташованої на корпусі твердоміру. Навантаження діяло протягом 10с, після чого силова частина твердоміру автоматично відключалась. Потім поворотом маховика проти годинникової стрілки столик опускався. На поверхні зразка залишався відбиток. Діаметр відбитка вимірювався за допомогою спеціальної лупи, що входила у комплект твердоміра. Вимірювання діаметру відбитку проводилось у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Діаметр відбитка розраховувався як середнє арифметичне цих двох вимірювань. Значення твердості (НВ) розраховувалось по рівнянню:

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

де P – навантаження на кульку, Н; $P = 30000$ Н;

D – діаметр кульки, мм; $D = 10$ мм;

d – середній діаметр відбитка, мм.

Нанесення відбитків проводили таким чином, щоб відстань від центру відбитка до краю зразка була не менше двох діаметрів відбитка. Середнє значення твердості зразка визначалось за результатами чотирьох вимірювань. Кожне наступне вимірювання проводили на відстані не менше двох діаметрів від попереднього відбитка.

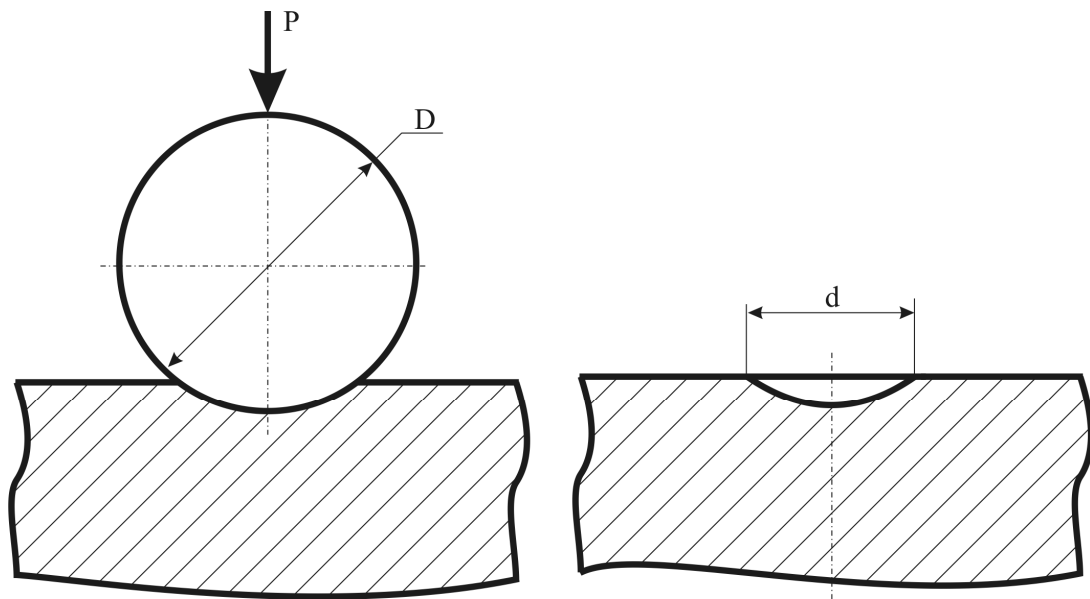


Рисунок 2.1 - Схема вимірювання твердості по Бринелю

Твердість по Роквелу визначалась по глибині вдавлювання в поверхню зразка алмазного конуса з кутом у вершині 120° (рис. 2.2). При випробуванні спочатку прикладалось попереднє навантаження ($P_0 = 100$ Н), а потім – остаточне навантаження ($P = 1500$ Н). Попереднє навантаження прикладалось вручну, остаточне – в автоматичному режимі.

Число твердості по Роквелу:

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

де h_0 – глибина проникнення (мм) алмазного конуса у поверхню зразка під дією попереднього навантаження $P_0 = 100\text{H}$;

h – глибина проникнення (мм) алмазного конуса у поверхню зразка під дією остаточного навантаження $P = 1500\text{H}$;

k, c – постійні величини; для конуса $k = 0,2\text{ мм}$; $c = 0,002\text{ мм}$.

Різниця $h - h_0$ глибин проникнення алмазного конуса у зразок під дією навантажень P_0 та P вимірювалась в автоматичному режимі і автоматично переводилась в одиниці твердості (HRC). Твердість по Роквелу (HRC) відраховувалась по чорній шкалі твердоміру “С”.

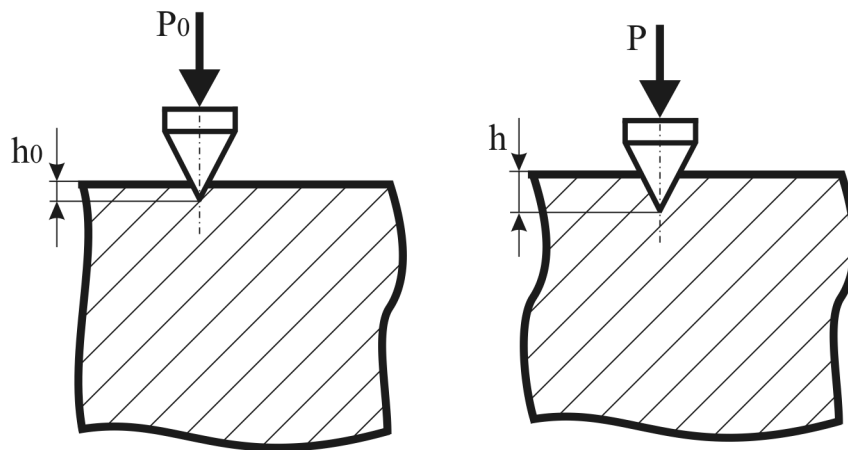


Рисунок 2.2 - Схема вимірювання твердості по Роквелу: P_0 – попереднє навантаження ($P_0 = 100\text{H}$); h_0 – глибина проникнення алмазного конуса у зразок під дією попереднього навантаження; P – остаточне навантаження ($P = 1500\text{H}$); h – глибина проникнення алмазного конуса у зразок під дією остаточного навантаження

Мікроструктуру чавунів досліджували на оптичному мікроскопі *MIM-8M*. Для виготовлення мікрошліфів використовувались зразки, на яких вимірювалась твердість по Бринелю та Роквелу. Рівну торцеву поверхню зразків, вільну від відбитків, шліфували на наждачному папері по ГОСТ 10054-82, ГОСТ 6456-82, послідовно зменшуючи розмір абразивних зерен в папері: P2000, P1500, P1000...A320. Після останнього шліфувального переходу на наждачному папері

А320 здійснювали полірування мікрошліфів на крузі з волоку до дзеркального блиску. В якості абразиву використовувалась суспензія, що складалась з дистильованої води та пасти ГОІ. Абразивна паста ГОІ випускається по технічним умовам Державного оптичного інституту.

Поліровані зразки промивались в етиловому спирті та акуратно протирались фільтрувальним папером. Для хімічного травлення мікрошліфів використовувалась царська водка.

Для шліфування та полірування мікрошліфів використовувався шліфувально-полірувальний станок *СШП-12*.

Мікротвердість вимірювалась на мікротвердомірі *ПМТ-3*. Схему вимірювань наведено на рис. 2.3. В якості індентора використовувалась стандартизована алмазна піраміда з кутом у вершини 136° . Навантаження на піраміду становило 20 - 50г . Менші значення навантаження використовувались при визначенні мікротвердості включень вторинного цементиту та інтерметалідів, більші – при визначенні мікротвердості аустенітної матриці.

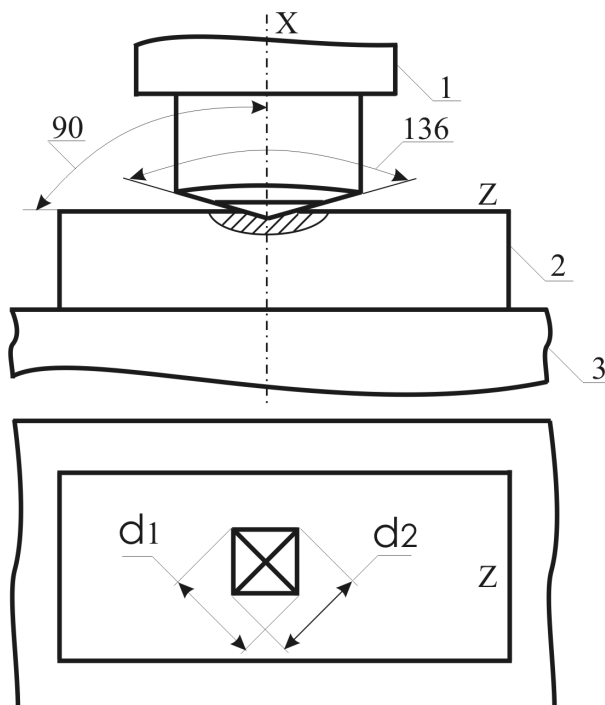


Рисунок 2.3 - Схема вимірювання мікротвердості:

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

Вимірювання мікротвердості проводилось на полірованих і травлених мікрошліфах в наступній послідовності:

1. *Встановлення зразка на предметний столик.*

Приготовлений для випробування зразок встановлювався на предметний столик мікротвердоміру так, щоб поверхня шліфа була строго перпендикулярна до напрямку переміщення піраміди при вдавлюванні. При порушенні цієї умови форма відбитка спотворюється, що позначається на точності вимірювання мікротвердості. Чим більше спотворена форма відбитка, тим більше похибка у визначенні мікротвердості.

Правильне положення шліфа відносно індентора досягалось впресовуванням зразка за допомогою ручного пресу в тонкий шар пластиліну на поверхні сталеві установної пластини. Зразок закріплювався таким чином, щоб під дією навантаження він не прогинався. Для кріплення установної пластини на столику мікротвердоміру на її нижній стороні є два штифти, які входять в отвори на робочій поверхні столика.

Закріпивши пластину із зразком, верхню плиту столика переміщували мікрометричними гвинтами до тих пір, поки ділянка мікрошліфа, що досліджувалась, не виявлялась під мікроскопом. При цьому столик був притиснутий до лівого упору.

Оглядаючи досліджувану ділянку шліфа і вибираючи місце для відбитка, ретельно фокусували мікроскоп. Для підвищення контрастності зображення використовували світлофільтри та діафрагмування.

Місце для відбитка вибиралось таким чином, щоб відстань від його центру до краю зразка була не менше подвоєної довжини діагоналі. Приблизно таку ж найменшу відстань залишали між геометричними центрами сусідніх відбитків, щоб запобігти їхньому перекриттю. Якщо один з відбитків більше іншого, то між їхніми центрами витримувалась відстань не менше двох діагоналей більшого відбитка.

При закріпленні індентора в патроні навантажувального пристрою стежили за тим, щоб співпадали риси, нанесені на оправці піраміди і на патроні. Це

забезпечувало правильне положення індентора відносно мікрошліфа і його надійну фіксацію в патроні.

Мікротвердомір встановлювався на підкладці з губчастої гуми.

Перед випробуванням перевірялась справність навантажувального пристрою. Для цього 2 - 3 рази вхолосту опускався шток з індентором без навантаження на полірований плоский зразок з алюмінію. Шток, як і має бути, рухався плавно, без ривків і помітного тертя, а на поверхні зразків не було видно відбитків. Відбитки появлялись при навантаженні на індентор 0,5 - 1,0 г.

2. Вдавлювання алмазної піраміди в поверхню зразка.

Після встановлення вантажу на шток механізму навантаження і фокусування мікроскопа столик із зразком повертався до упору проти годинникової стрілки, при цьому вибране для відбитка місце на досліджуваній області мікрошліфа підводилось під піраміду.

Навантаження здійснювалось повільним і плавним поворотом рукоятки аретира проти годинникової стрілки. Швидкість опускання піраміди була настільки малою, що динамічний вплив мас штока, індентора і вантажу не впливав на розміри відбитка. Дана умова забезпечувалась при тривалості опускання піраміди 8 - 15с. Тривалість витримки під навантаженням становила 5с.

По закінченні витримки шток з індентором повертався у вихідне положення поворотом рукоятки аретира до упору за годинниковою стрілкою. Предметний столик плавно, без поштовхів, повертався до упору по годинниковій стрілці, і вимірювалась діагональ відбитка.

3. *Вимірювання діагоналей відбитка* проводилось за двома схемами. Для визначення довжини діагоналей відбитка у відносно крупних зернах аустенітної матриці використовувалась класична схема, в якій напрям переміщення перехрестя збігався з діагоналлю (рис. 2.4). Для вимірювання діагоналей відбитка за цим способом окуляр-мікрометр закріплювався у такому положенні, при якому перехрестя точно рухалось вздовж діагоналі. Далі, переміщуючи перехрестя в одному напрямку (наприклад, справа наліво) послідовно наводили його спочатку на правий кінець діагоналі, а потім – на лівий. Різниця відліків – початкового Z_1 і кінцевого Z_2 , – знятих у цих позиціях за шкалою барабана окуляр-

мікрометра, помножена на ціну поділу шкали g , дорівнювала довжині горизонтальної діагоналі d_1 :

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

Для вимірювання довжини другої діагоналі окуляр - мікрометр повертався на 90° і закріплювався у новому положенні. Перехрестя рухалось точно вздовж вертикальної діагоналі відбитка. Спочатку його наводили на один кінець діагоналі, потім на іншій, і по вимірювальній шкалі барабана окуляр-мікрометра визначали довжину вертикальної діагоналі d_2 .

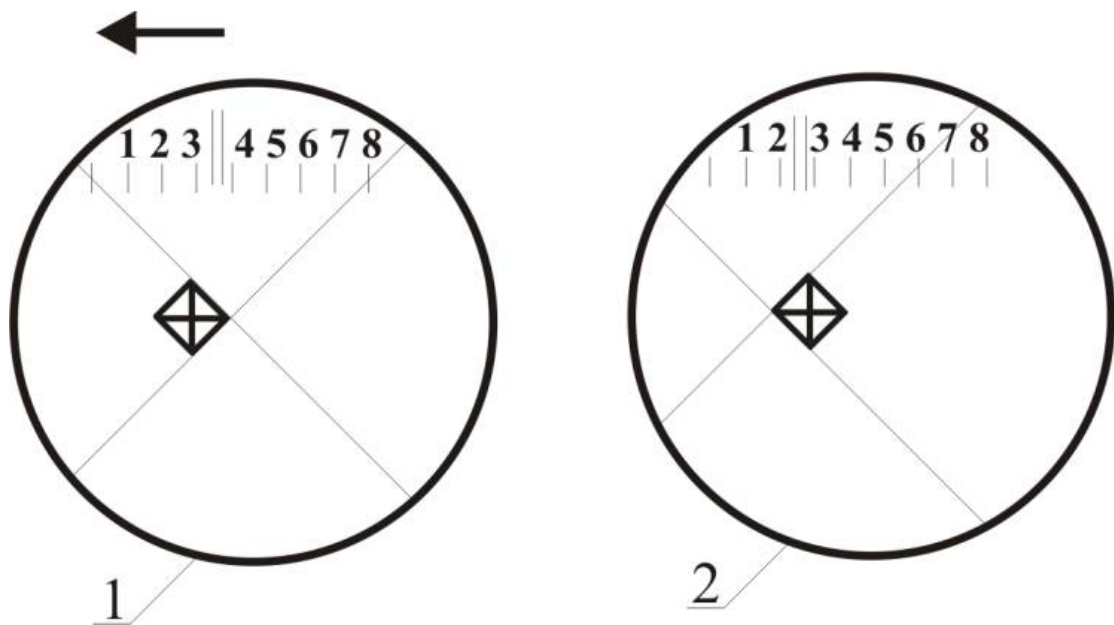


Рисунок 2.4 - Схема вимірювання діагоналей відбитка при русі перехрестя вздовж діагоналі: 1, 2 – відповідно початкове і кінцеве положення перехрестя; стрілкою вказано напрямок переміщення перехрестя при обертанні рукоятки гвинтового окуляр - мікрометра

Для вимірювання довжини діагоналей відбитка у включеннях вторинного цементиту та інтерметалідів використовувалась схема на рис. 2.5.

4. Розрахунок мікротвердості, МПа, здійснювався по формулі:

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

де P – навантаження на піраміду, Н; $P = 20 - 50$ г (0,2 - 0,5 Н);

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

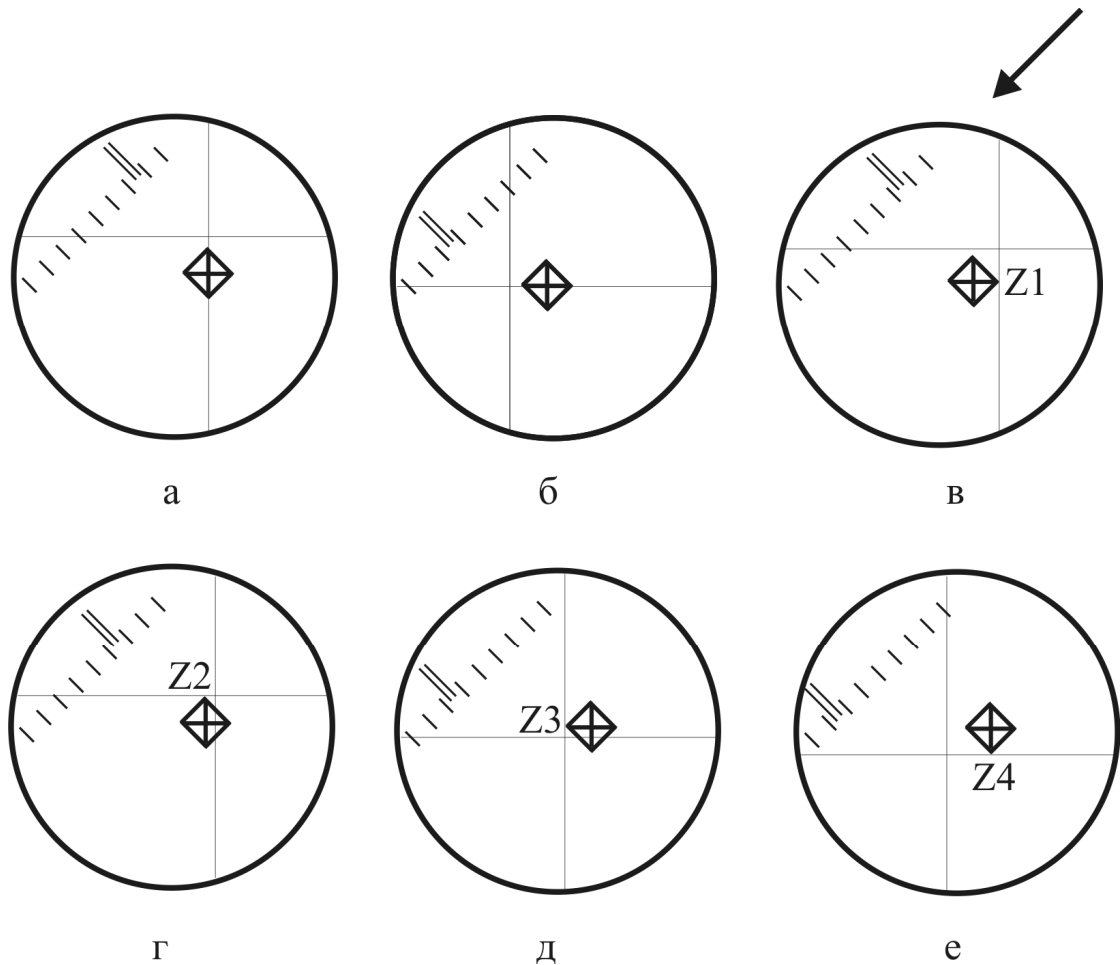


Рисунок 2.5 - Схема вимірювання діагоналей відбитка у включеннях вторинного цементиту та інтерметалідів: стрілкою вказано напрямок переміщення перехрестя при обертанні рукоятки гвинтового окуляра - мікрометра

Методику триботехнічних випробувань чавунів наведено в розділі 3.

3 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 досліджувались, мали аустенітну металеву матрицю, їхню мікроструктуру визначали за графітом та цементитом. Структуру фосфідної евтектики не досліджували, оскільки чавуни містили не більше 0,15 мас. % фосфору.

При визначенні графіту оцінці підлягали форма, розподіл, розміри, кількість включень графіту, при визначенні цементиту – кількість та розміри включень цементиту, наявність ледебуриту.

Металографічний аналіз чавунів починали із вивчення травлених ділянок мікрошліфів, на яких виявляли вторинний і евтектичний цементит. Якщо в структурі чавунів виявляли евтектичний цементит (ледебурит), зразки бракували. Кількість вторинного цементиту не повинна перевищувати 6 %; у протилежному випадку зразки також бракували.

Якщо на травленій ділянці мікрошліфів був відсутній ледебурит і кількість вторинного цементиту не перевищувала 6 %, проводили аналіз форми та розподілу включень графіту на нетравлених ділянках мікрошліфів.

Кількість вторинного цементиту та ледебуриту в структурі чавунів оцінювали за шкалою 10А ГОСТ 3443-87 як середній відсоток площі, яку займали ці включення на мікрошліфах не менше ніж у трьох полях зору (табл. 3.1).

При наявності в структурі чавунів включень цементиту у кількості менше 1,0 % (одне - два включення площею менше 2000 мкм² у трьох різних полях зору), їх оцінювали як «сліди».

Розмір ізольованих включень вторинного цементиту та ледебуриту оцінювали за шкалою 10Б ГОСТ 3443-87 через середню площу трьох найбільших включень (табл. 3.2).

Форма включень графіту в структурі чавунів оцінювалась по шкалі 1А ГОСТ 3443-87.

Таблиця 3.1 - Бали для визначення кількості вторинного цементиту та ледебуристу ГОСТ 3443-87

Позначення балу	Площа, зайнята вторинним цементитом або ледебуристом, %
Ц 2	До 2 (допустимий бал)
Ц 4	Від 3 до 6 (допустимий бал)
Ц 10	Від 10 до 15 (недопустимий бал)
Ц 25	Від 15 до 40 (недопустимий бал)
Ц 40	Більше 40 (недопустимий бал)

Таблиця 3.2 - Бали для визначення розміру включень вторинного цементиту та ледебуристу ГОСТ 3443-87

Позначення балу	Площа найбільших включень вторинного цементиту або ледебуристу, мкм ²
Цп 2000	До 2000
Цп 6000	Від 2000 до 10000
Цп 13000	Від 10000 до 16000
Цп 20000	Від 16000 до 25000
Цп 25000	Більше 25000

Оцінка довжини включень графіту здійснювалась по шкалі 1Б ГОСТ 3443-87 (табл. 3.3). Визначення довжини включень графіту проводилось по середній довжині трьох найбільших включень. Максимальна довжина включень визначалась у трьох різних полях зору.

Розподіл включень графіту оцінювали по шкалі 1В ГОСТ 3443-87 (табл. 3.4). При наявності в структурі чавунів включень графіту, що займали площу до 1,0 % від загальної площі мікрошліфа, їх оцінювали як «сліди».

Кількість включень графіту оцінювали за шкалою 1Г ГОСТ 3443-87 через середній відсоток площі, яку займали на мікрошліфах включення графіту у трьох різних полях зору.

Таблиця 3.3 - Бали для визначення довжини включень пластинчастого графіту ГОСТ 3443-87

Позначення балу для визначення довжини включень пластинчастого графіту	Довжина включень пластинчастого графіту, мкм
ПГд15	До 15
ПГд25	Від 15 до 30
ПГд45	Від 30 до 60
ПГд90	Від 60 до 120
ПГд180	Від 120 до 250
ПГд350	Від 250 до 500
ПГд750	Від 500 до 1000
ПГд1000	Більше 1000

Таблиця 3.4 - Бали для визначення розподілу графітних включень ГОСТ 3443-87

Позначення балу для визначення розподілу графітних включень	Площа, зайнята графітом, %
ПГ2	До 3
ПГ4	Від 3 до 5
ПГ6	Від 5 до 8
ПГ10	Від 8 до 12
ПГ12	Більше 12

Еталонні мікроструктури для визначення графіту та цементиту згідно ГОСТ 3443-87 наведено на рис. 3.1 - 3.9.



ПГф1

Пластинчаста прямолінійна



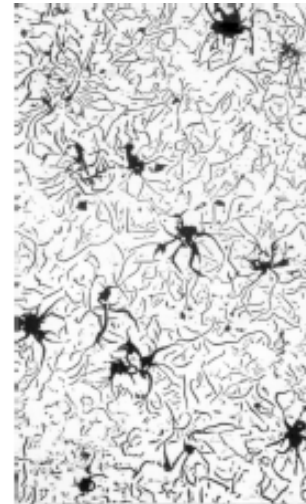
ПГф2

Пластинчаста завихрена



ПГф3

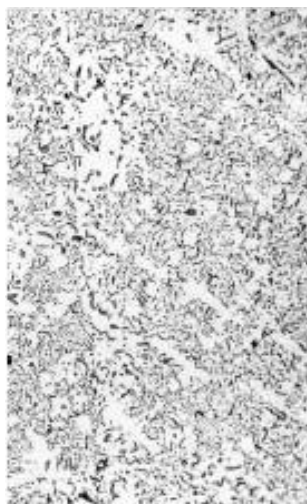
Голчаста



ПГф4

Гнездоподібна

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



ПГд15



ПГд25



ПГд45



ПГд90

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



ПГд180



ПГд350



ПГд750



ПГд1000

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



ПГр1

Рівномірний розподіл



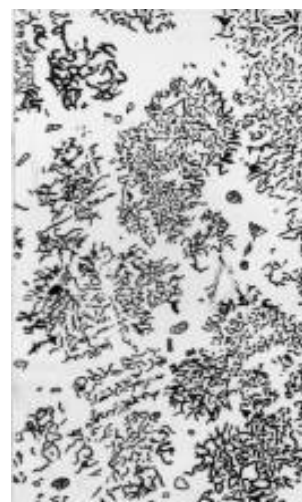
ПГр2

Нерівномірний розподіл



ПГр3

Колонії пластинчастого графіту



ПГр4

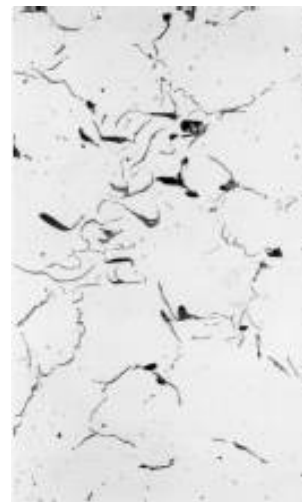
Колонії міждендритного графіту

Рисунок 3.4 - Еталонна шкала 1В ГОСТ 3443-87 – Розподіл включень графіту
(шкали ПГр1 - ПГр4), $\times 100$



ПГр5

Гілковий розподіл



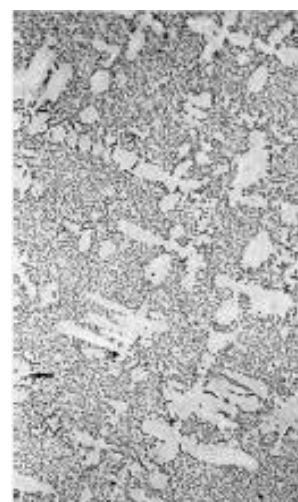
ПГр6

Сітчастий розподіл



ПГр7

Розеточний розподіл



ПГр8

Міждендритний крапковий розподіл

Рисунок 3.5 - Еталонна шкала 1В ГОСТ 3443-87 – Розподіл включень графіту
(шкали ПГр5 - ПГр8), $\times 100$



ПГр9

Міждендритний пластинчастий розподіл

Рисунок 3.6 - Еталонна шкала 1В ГОСТ 3443-87 – Розподіл включень графіту
(шкала ПГр9), $\times 100$

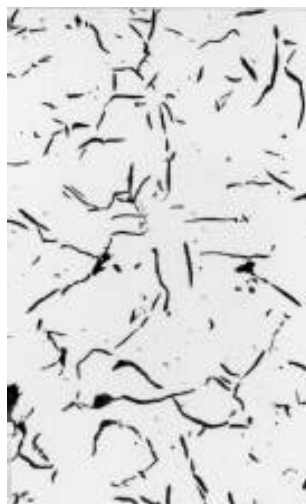


ПГ2



ПГ4

Рисунок 3.7 - Еталонна шкала 1Г ГОСТ 3443-87 – Кількість включень графіту,
% (шкали ПГ2, ПГ4), $\times 100$



ПГ6



ПГ10



ПГ12

Рисунок 3.8 - Еталонна шкала 1Г ГОСТ 3443-87 – Кількість включень графіту,
% (шкали ПГ6 - ПГ12), $\times 100$

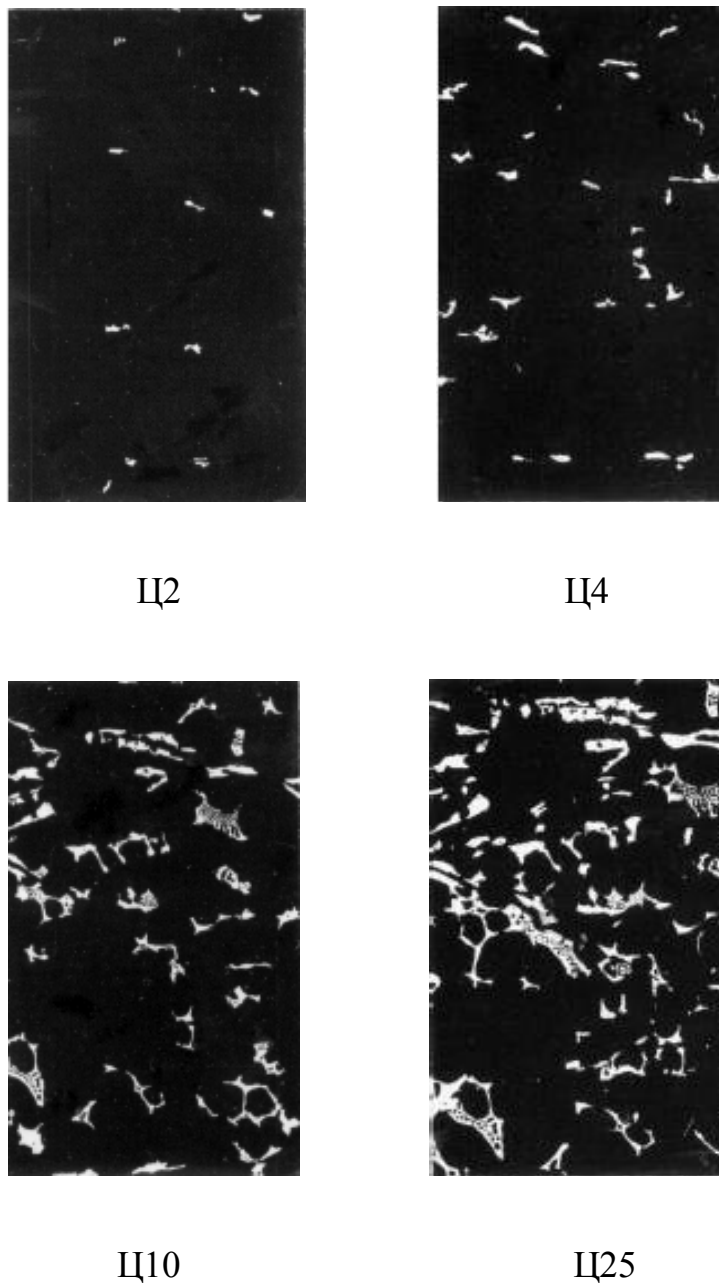


Рисунок 3.9 - Еталонна шкала 10А ГОСТ 3443 - 87 – Вміст цементиту та ледебури-ту, об. % (шкали Ц2 - Ц25), $\times 100$

3.2 Вплив модифікаторів на кількість, розподіл та розміри включень цементиту

Дослідження впливу модифікаторів на кількість, розподіл та розміри включень цементиту проводили на серії зразків, які мали наступний хімічний склад: 3,4 - 3,5 мас. % С; 10 - 11 мас. % Мп; 2,5 - 2,7 мас. % Аl; 1,7 - 1,9 мас. % Si.

Немодифікований чавун має структуру аустеніт + вторинний цементит + ледебурит без помітних слідів графіту (рис. 3.10). Такий чавун непридатний для виготовлення антифрикційних виливків.

При модифікуванні чавуну силіко - кальцієвою лігатурою *СіімМіи-1* у кількості 0,03 мас. % в мікроструктурі виливок чітко фіксуються вторинний цементит і ледебурит (рис. 3.11, а, б). Вміст цементиту та ледебуриту за еталонною шкалою 10А ГОСТ 3443 - 87 складає 10 - 15 % (шкала Ц10 на рис. 3.9). При збільшенні вмісту лігатури до 0,05 мас. % ледебурит зникає (рис. 3.12), а кількість вторинного цементиту не перевищує 6 % (шкали Ц2 - Ц4 ГОСТ 3443 - 87 на рис. 3.9).

Комплексна лігатура *ЦИСМ* системи Si-Ca-Ba-Se забезпечує інтенсивну графітизацію чавуна при меншій концентрації, ніж силіко - кальцієва лігатура *СіімМіи-1*. При модифікуванні чавуну лігатурою *ЦИСМ* у кількості 0,01 мас. % об'ємний вміст вторинного цементиту і ледебуриту у виливках складає ~ 10 % (рис. 3.13, а, б). При збільшенні вмісту лігатури до 0,03 мас. % ледебурит не виділяється, а кількість вторинного цементиту не перевищує 4 % (рис. 3.14).

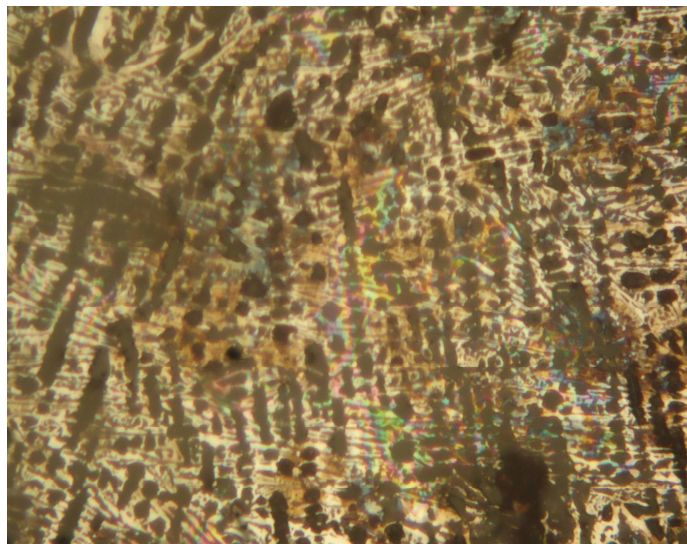
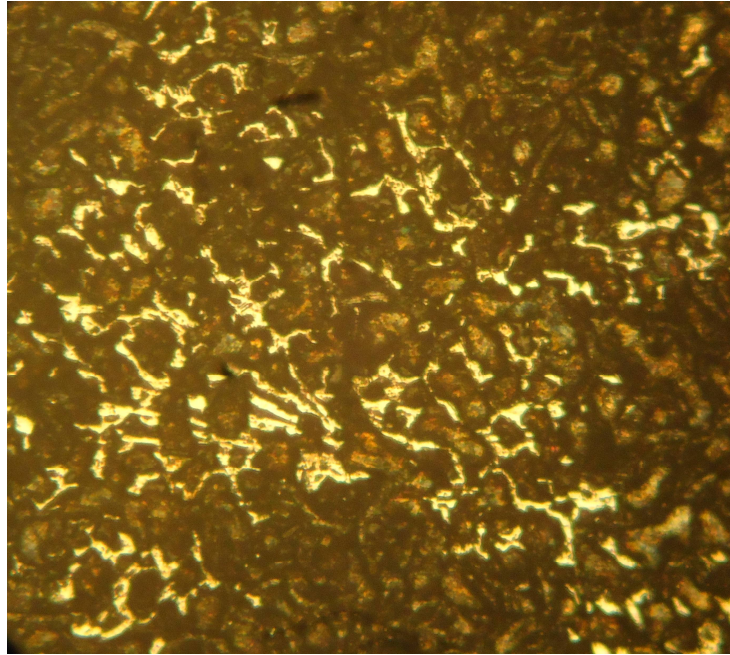
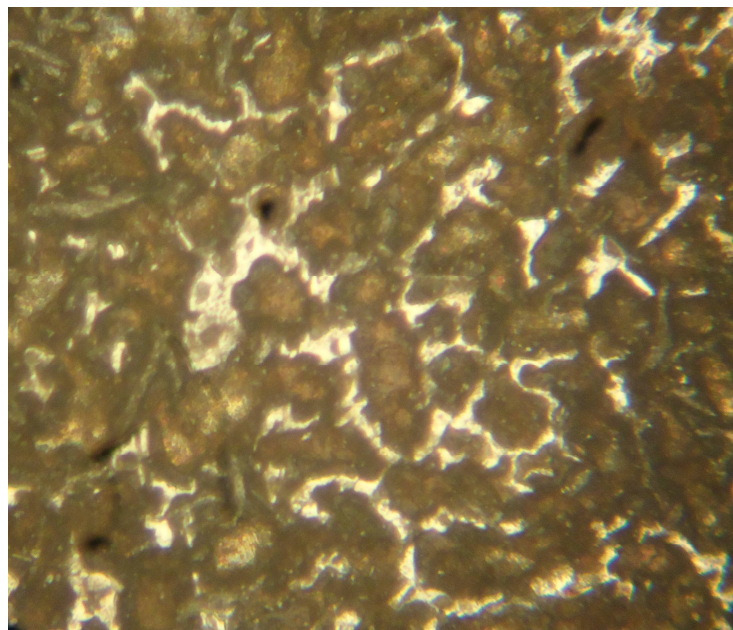


Рисунок 3.10 - Мікроструктура немодифікованого чавуна
(3,4 - 3,5 мас. % C; 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 - 2,7 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si):
структура – аустеніт + вторинний цементит + ледебурит;
вміст вторинного цементиту та ледебуриту 45 - 50 %; × 130



а



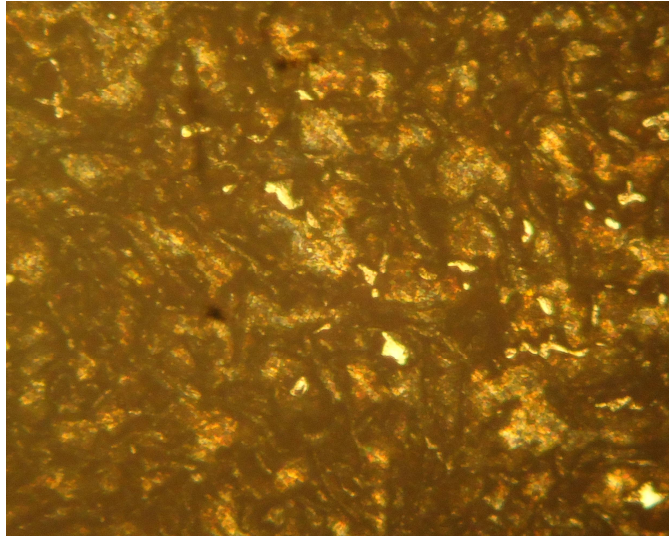
б

Рисунок 3.11 - Мікроструктура чавуна, модифікованого силіко - кальцієвою лігатурою *СіімМіш-1* в кількості **0,03 мас. %**

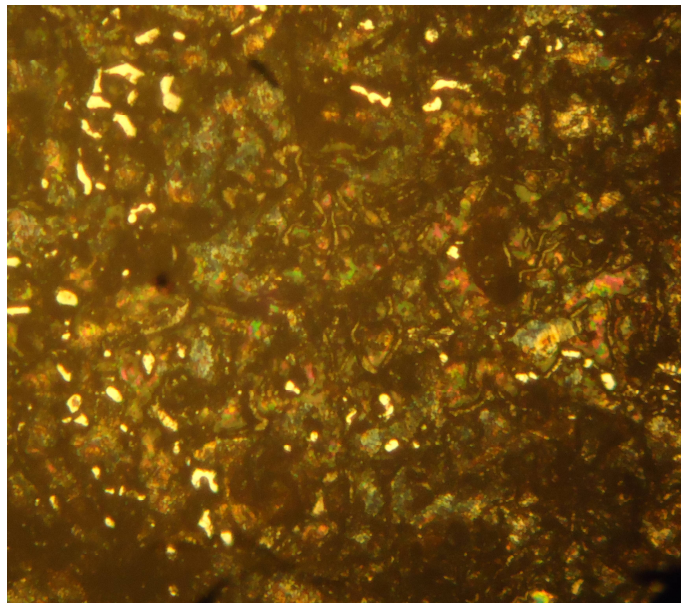
(3,4 - 3,5 мас. % C; 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 - 2,7 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si):

структура – аустеніт + графіт + вторинний цементит + ледебурит;

вміст вторинного цементиту та ледебуриу 10 - 15 %; а – $\times 130$; б – $\times 200$

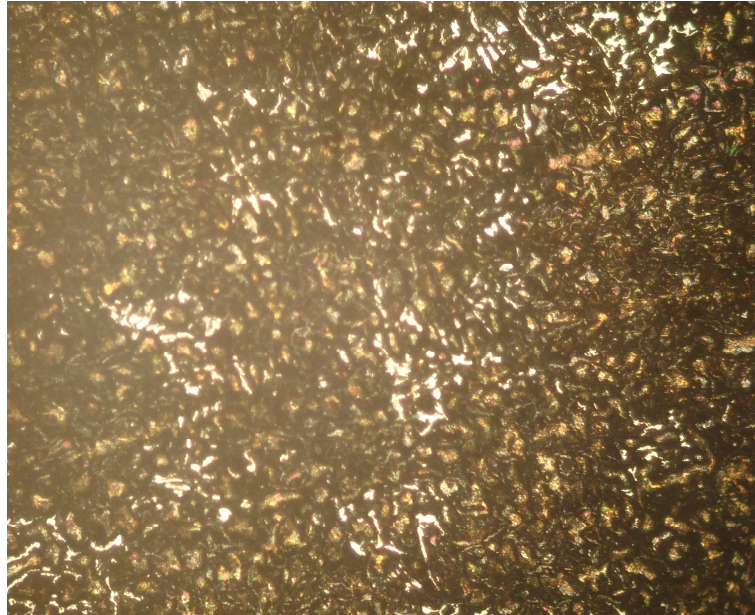


а

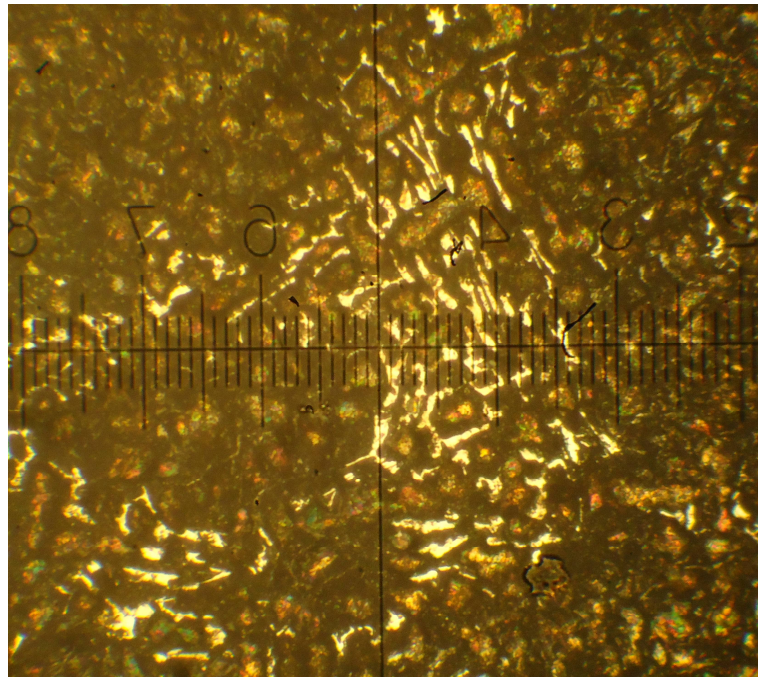


б

Рисунок 3.12 - Мікроструктура чавуна, модифікованого силіко - кальцієвою лігатурою *СіітМіш-1* в кількості **0,05 мас. %** (3,4 - 3,5 мас. % C; 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 - 2,7 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si): структура – аустеніт + графіт + вторинний цементит; вміст вторинного цементиту 2 - 6 %; × 130



а

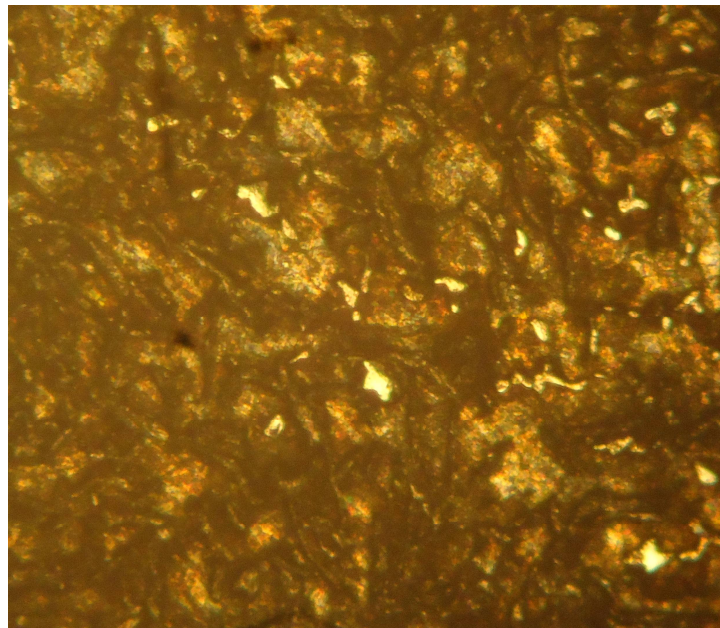


б

Рисунок 3.13 - Мікроструктура чавуна, модифікованого комплексною лігатурою ЦИСМ системи Si-Ca-Ba-Se у кількості **0,01 мас. %** (3,4 - 3,5 мас. % C; 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 - 2,7 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si): структура – аустеніт + графіт + вторинний цементит + ледебурит; вміст вторинного цементиту та ледебуриту **~10 %**; а – $\times 130$; б – $\times 170$



а



б

Рисунок 3.14 - Мікроструктура чавуна, модифікованого комплексною лігатурою ЦИСМ системи Si-Ca-Ba-Sc у кількості **0,03 мас. %**

(3,4 - 3,5 мас. % C; 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 - 2,7 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si):

структура – аустеніт + графіт + вторинний цементит;

вміст вторинного цементиту **2 - 4 %**; $\times 130$

Більш детальні дані щодо впливу вмісту модифікаторів на кількість цементиту в чавуні наведено на рис. 3.15. Оптимальний вміст силіко - кальцієвого модифікатора *CiimMiu-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 складає 2 - 4 %, ледебурит – відсутній.

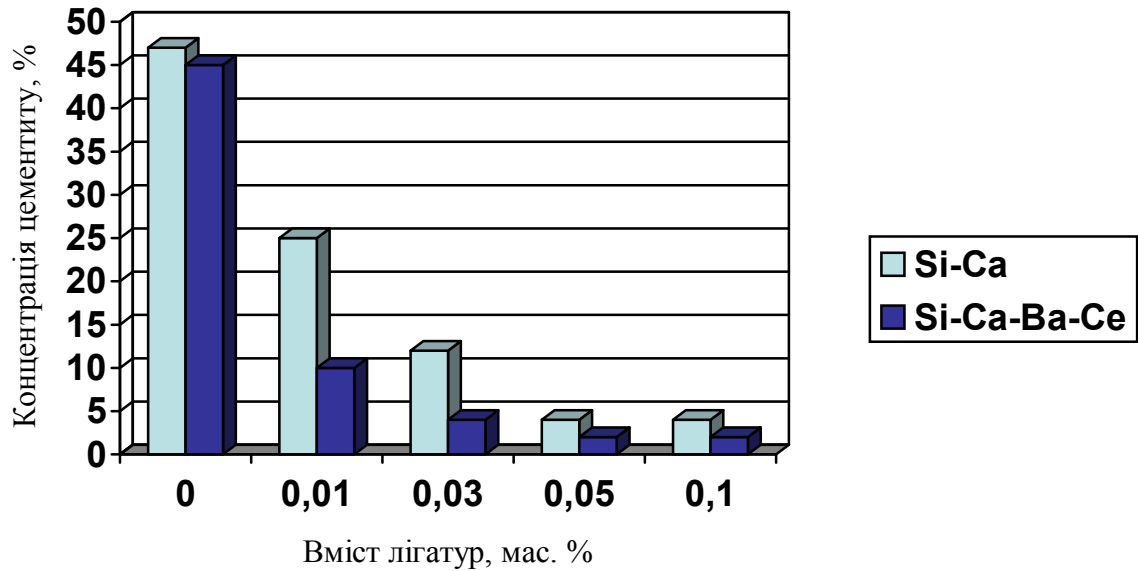


Рисунок 3.15 - Вплив вмісту модифікаторів на концентрацію цементиту в чавуні (3,4 - 3,5 % C; 10 - 11 % Mn; 2,5 - 2,7 % Al; 1,7 - 1,9 % Si)

Вуглець та алюміній у складі чавуна підвищують швидкість його графітизації та сприяють зменшенню вмісту цементиту (рис. 3.16, 3.17). Дослідження впливу концентрації вуглецю на вміст цементиту в чавуні проводили з використанням зразків, які містили 3,2; 3,5 та 3,8 мас. % C. Вміст марганцю, алюмінію та кремнію в зразках був однаковий: 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si. В якості модифікатора використовували комплексну лігатуру *ЦИСМ*. Вона забезпечує більш інтенсивну графітизацію чавуну, ніж лігатура *CiimMiu-1* (рис. 3.15). При вмісті в чавуні лігатури *ЦИСМ* 0,03 мас. % збільшення концентрації вуглецю з 3,2 до 3,8 мас. % призводить до зменшення кількості цементиту з 6 % до 2 %. В чавуні, що містить 0,05 мас. % лігатури *ЦИСМ*,

при збільшенні концентрації вуглецю з 3,2 до 3,8 мас. % кількість цементиту зменшується з 4 до 1 % (рис. 3.16).

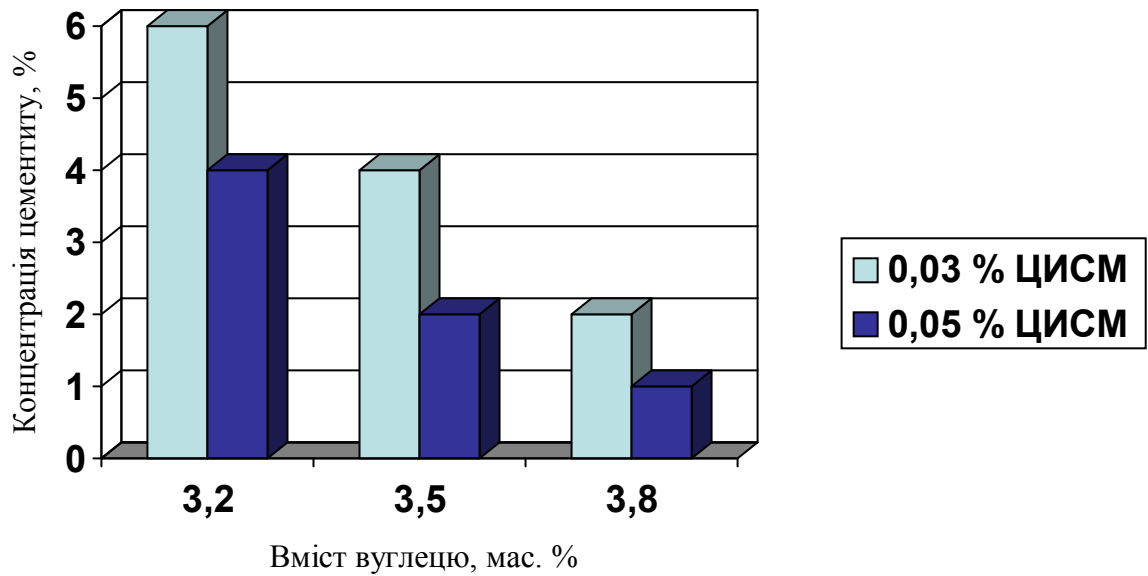


Рисунок 3.16 - Вплив вмісту вуглецю на концентрацію цементиту в чавуні, модифікованому лігатурою ЦИСМ (Si-Ca-Ba-Ce) (10 - 11 мас. % Mn; 2,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si)

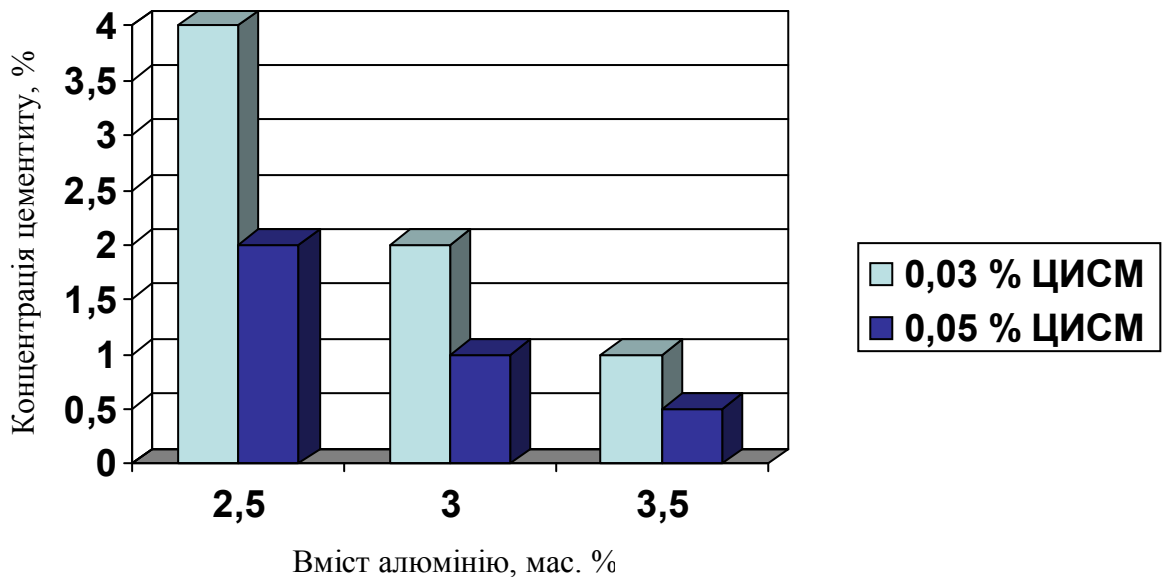


Рисунок 3.17 - Вплив вмісту алюмінію на концентрацію цементиту в чавуні, модифікованому лігатурою ЦИСМ (Si-Ca-Ba-Ce) (10 - 11 мас. % Mn; 3,5 мас. % C; 1,7 - 1,9 мас. % Si)

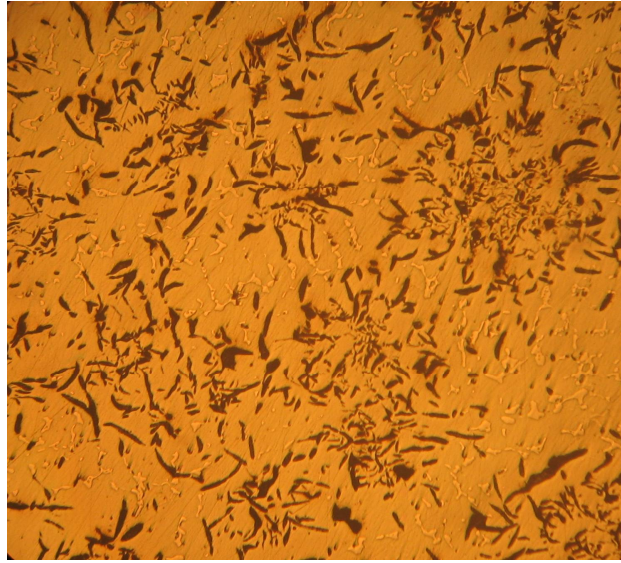
Дослідження впливу концентрації алюмінію на вміст цементиту в чавуні проводили з використанням зразків, які містили 2,5; 3,0 та 3,5 мас. % Al. Вміст марганцю, вуглецю та кремнію в зразках був однаковий: 10 - 11 мас. % Mn; 3,5 мас. % C; 1,7 - 1,9 мас. % Si. В якості модифікатора використовували комплексну лігатуру ЦИСМ. При вмісті лігатури 0,03 мас. % збільшення концентрації алюмінію з 2,5 до 3,5 мас. % призводить до зменшення кількості цементиту з 4 % до 1 %. В чавуні, що містить 0,05 мас. % лігатури ЦИСМ, при збільшенні концентрації алюмінію з 2,5 до 3,5 мас. % кількість цементиту зменшується з 2 до 0,5 % (рис. 3.17).

3.3 Вплив модифікаторів на кількість, розподіл та розміри включень графіту

Форма та розподіл включень графіту досліджувались на нетравлених ділянках мікрошліфів. Для досліджень використовували дві серії зразків з вмістом вуглецю 3,5 та 3,8 мас. %. Вміст марганцю, алюмінію та кремнію в зразках не змінювався і складав: 10 - 11 мас. % Mn; 2,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si. В зразках з чавуну, модифікованого силіко - кальцієвою лігатурою *СiimMiu-1*, форма включень графіту – пластинчаста завихрена (еталонна шкала ПГф2 по ГОСТ 3443-87) (рис. 3.18, а, б). Довжина включень графіту відповідає еталонній шкалі ПГд90 (ГОСТ 3443-87; середня довжина графітних включень 90 мкм). Розподіл включень графіту – колонії пластинчастого та міждендритного графіту (шкали ПГр3, ПГр4 по ГОСТ 3443-87).

І при концентрації вуглецю 3,5 % (рис. 3.18, а), і при концентрації вуглецю 3,8 % (рис. 3.18, б) на мікрошліфах чітко ідентифікується грубодисперсна графітна евтектика. При збільшенні концентрації вуглецю в чавуні з 3,5 до 3,8 % зростає товщина пластин графіту та кількість графіту, а також доля графітних включень, розташованих по границях зерен аустеніту (міждендритний розподіл графіту). Міждендритний розподіл графіту сприяє одночасному суттєвому зменшенню міцності та 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.

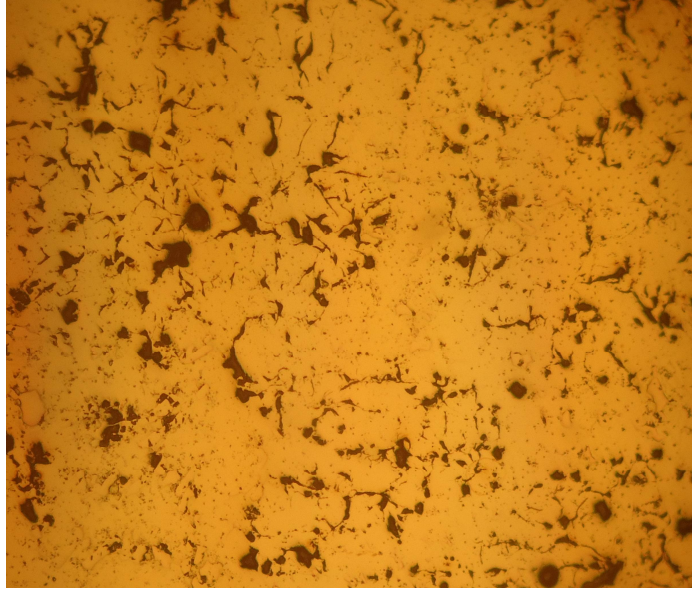


а

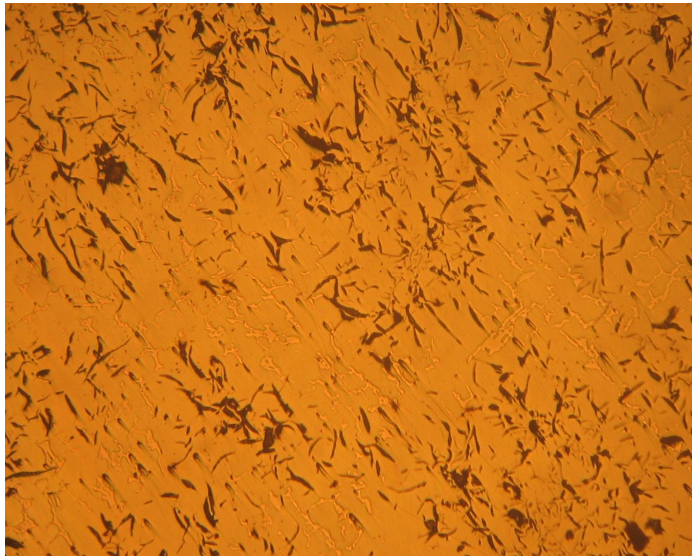


б

Рисунок 3.18 - Морфологія графіту у чавуні, модифікованому силіко - кальцієвою лігатурою *СітМіш-1* в кількості **0,1 мас. %** (10 - 11 мас. % *Mn*; 2,5 мас. % *Al*; 1,7 - 1,9 мас. % *Si*); $\times 130$; а – вміст вуглецю 3,4 %; б – вміст вуглецю 3,8 мас. %



а



б

Рисунок 3.19 - Морфологія графіту у чавуні, модифікованому лігатурою ЦИСМ в кількості **0,05 мас. %** (10 - 11 мас. % Mn; 2,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si); $\times 130$;

а – вміст вуглецю 3,4 %; б – вміст вуглецю 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.

Таблиця 3.5 - Мікротвердість структурних складових фрикційного чавуну

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

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ФРИКЦІЙНИХ СІРИХ ЧАВУНІВ

4.1 Матриця плану експерименту. Аналіз вихідних даних

Мета експерименту полягала у визначенні оптимального хімічного складу фрикційних сірих чавунів, модифікованих двома типами лігатур: силіко - кальцієвою лігатурою *СііМіш-1* та комплексною лігатурою *ЦИСМ* системи Si-Ca-Ba-Se. Лігатури вводились у розплавлені чавуни у вигляді пресованих брикетів безпосередньо перед розливкою чавунів у ливарні форми. Вони забезпечували інтенсивну графітизацію чавунів і попереджували утворення в структурі виливок вторинних та евтектичних карбідів. Хімічний склад чавунів: 3,2 - 3,8 мас. % C; 9 - 12 мас. % Mn; 2,5 - 3,5 мас. % Al; 1,7 - 1,9 мас. % Si. Структура чавунів – аустеніт + пластинчастий графіт + інтерметаліди FeAl, Fe₃Al. Алюміній вводився до складу чавунів як замітник фосфору. Інтерметаліди FeAl, Fe₃Al розташовуються у структурі чавунів значно більш рівномірно, ніж включення фосфідної евтектики. Тому чавуни, леговані алюмінієм, на відміну від чавунів, легованих фосфором, мають високу тріщиностійкість при підвищених температурах у зоні тертя.

Оптимальний хімічний склад чавунів визначався по мінімуму інтенсивності їхнього зношування в умовах сухого тертя. Триботехнічні випробування чавунів проводились на машині тертя СМЦ-2 за схемою “ролик - колодка” (рис. 4.1). Ролик 2, виготовлений із сталі 45 твердістю 45 - 48 HRC, обертався із постійною частотою 300 об./хв., а нерухома чавунна колодка 1 притискалась до ролика з зусиллям 350Н (рис. 4.1). Тривалість кожного триботехнічного випробування становила три хвилини.

Після повного циклу випробувань визначалась втрата маси чавунних колодок і розраховувалась інтенсивність зношування чавунів. Зважування колодок до та після випробувань здійснювалось на оптико-механічних вагах ВЛМ-001 з точністю $\pm 0,0005$ г.

Інтенсивність зношування чавунів визначалась як питома втрата маси колодок:

$$W = \frac{\Delta M}{A}, \text{ г/см}^2,$$

ΔM – втрата маси чавунних колодок, г;
 A – площа поверхні тертя колодок; $A = 1,4 \text{ см}^2$.

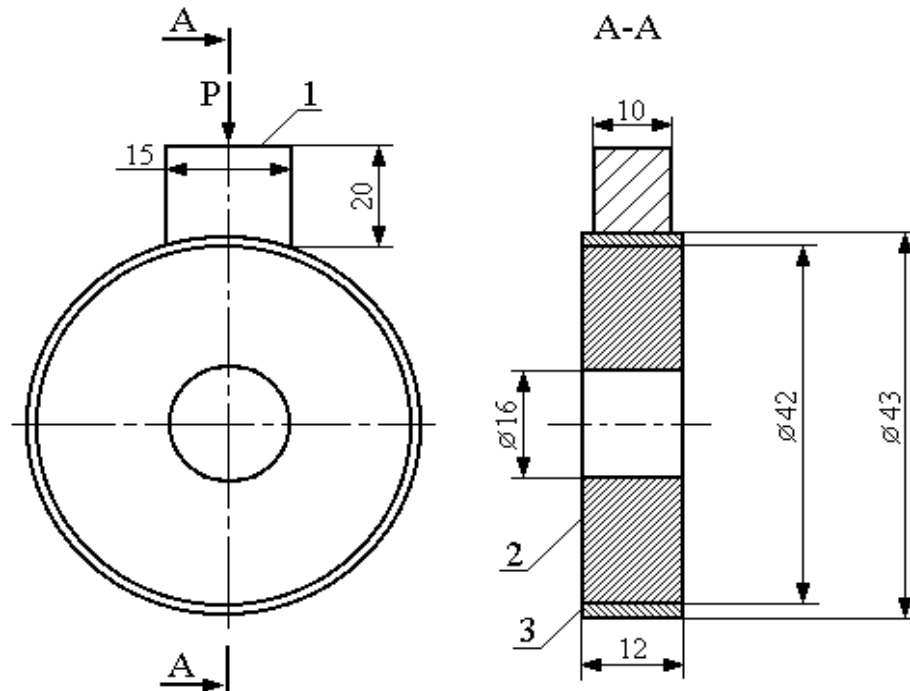


Рисунок 4.1 - Схема триботехнічних випробувань фрикційних чавунів:

1 – колодка із фрикційного чавуну; 2 – ролик із сталі 45

Експериментальні дослідження проводились з використанням методики повного факторного експерименту 2^3 (табл. 4.1, 4.2). Експеримент складався з 8 дослідів. У кожному досліді випробовувались зразки фрикційного чавуну різного хімічного складу. Кожний дослід дублювався три рази. Факторами, що варіювались, були концентрації легуючих елементів в чавуні: алюмінію (x_1), марганцю (x_2), вуглецю (x_3). Межі варіювання концентрації легуючих елементів (табл. 4.1, 4.2): алюмінію – 2,5 - 3,5 %, інтервал варіювання 0,5 %; марганцю – 9 - 12 %, інтервал варіювання 1,5 %; вуглецю – 3,2 - 3,8 %, інтервал варіювання 0,3 %. Умовний вміст легуючих елементів по верхньому та нижньому рівнях позначений через кодовані значення факторів “ $X_i = +1$ ” і “ $X_i = -1$ ”. Верхній рі-

вень “ $X_i = +1$ ” відповідає максимальному вмісту легуючих елементів, нижній рівень “ $X_i = -1$ ” – мінімальному їхньому вмісту.

Таблиця 4.1 - Матриця плану ПФЕ 2^3 "Інтенсивність зношування чавунів, модифікованих лігатурою Si-Ca"

Фактор, що варіюється		Al, %	Mn, %	C, %	Інтенсивність зношування (W), г/см ²
Основний рівень		3,0	10,5	3,5	
Інтервал варіювання		0,5	1,5	0,3	
Верхній рівень		3,5	12,0	3,8	
Нижній рівень		2,5	9,0	3,2	
№ досліду	X_0	X_1	X_2	X_3	
1	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	-1(3,2)	0,857
2	+1	+1 (3,5)	-1 (9,0)	-1 (3,2)	0,617
3	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,461
4	+1	+1 (3,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,561
5	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	1,263
6	+1	+1 (3,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	1,394
7	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	+1 (3,8)	1,183
8	+1	+1 (3,5)	+1 (12)	+1 (3,8)	1,46

Таблиця 4.2 - Матриця плану ПФЕ 2^3 "Інтенсивність зношування чавунів, модифікованих лігатурою Si-Ca-Ba-Ce"

Фактор, що варіюється		Al, %	Mn, %	C, %	Інтенсивність зношування (W), г/см ²
Основний рівень		3,0	10,5	3,5	
Інтервал варіювання		0,5	1,5	0,3	
Верхній рівень		3,5	12,0	3,8	
Нижній рівень		2,5	9,0	3,2	
№ досліду	X_0	X_1	X_2	X_3	
1	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	-1(3,2)	0,383
2	+1	+1 (3,5)	-1 (9,0)	-1 (3,2)	0,281
3	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,232
4	+1	+1 (3,5)	+1 (12)	-1 (3,2)	0,297
5	+1	-1 (2,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	0,078
6	+1	+1 (3,5)	-1 (9,0)	+1 (3,8)	0,131
7	+1	-1 (2,5)	+1 (12)	+1 (3,8)	0,059
8	+1	+1 (3,5)	+1 (12)	+1 (3,8)	0,084

В табл. 4.1 представлені експериментальні середні значення інтенсивності зношування чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca, в табл. 4.2 – чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca - Ba - Ce. Графічне зістав-

лення експериментальних даних, наведених в табл. 4.1, 4.2, дозволяє заключити, що хімічний склад чавунів по різному впливає на їхню зносостійкість залежно від типу модифікатора (рис. 4.2).

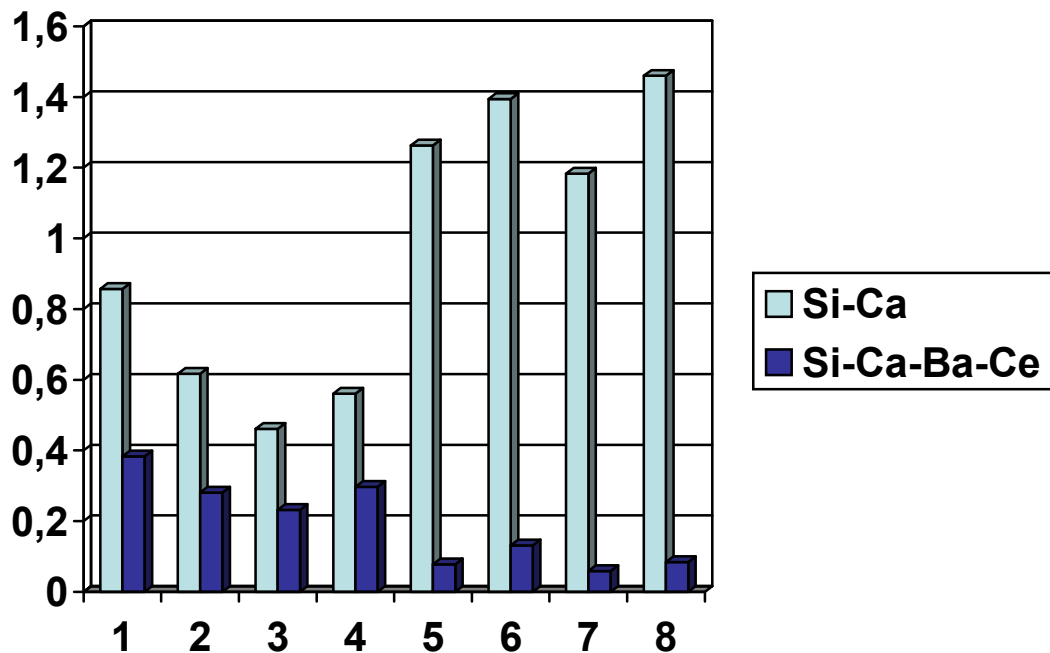


Рисунок 4.2 - Інтенсивність зношування (г/см^2) фрикційних сірих чавунів, модифікованих лігатурами систем Si - Ca та Si - Ca - Ba - Ce, по дослідах

Серед чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca, максимальну зносостійкість має чавун, що містить 2,5 % Al; 12 % Mn; 3,2 % C (інтенсивність зношування – $0,461 \text{ г/см}^2$) (рис. 4.2). Максимальна зносостійкість чавуну досягається при вмісті в ньому вуглецю по нижньому рівню – 3,2 %.

Серед чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca - Ba - Ce, максимальну зносостійкість має чавун, що містить 2,5 % Al; 12 % Mn; 3,8 % C (інтенсивність зношування – $0,061 \text{ г/см}^2$) (рис. 4.2). Максимальна зносостійкість чавуну досягається при вмісті в ньому вуглецю по верхньому рівню – 3,8 %.

Звертає на себе увагу також і той факт, що зносостійкість чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca - Ba - Ce, істотно перевищує зносостійкість чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca (рис. 4.2). Тому у подальшому основна увага приділялась оптимізації хімічного складу фрикційних чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca - Ba - Ce.

Для виявлення можливих напрямів оптимізації хімічного складу фрикційних чавунів, модифікованих лігатурою системи Si - Ca - Ba - Ce, за результатами випробувань, наведених у табл. 4.2, було побудоване регресійне рівняння, що описує вплив вмісту основних легуючих елементів (алюмінію, марганцю, вуглецю) на інтенсивність зношування чавунів.

Таблиця 4.3 - Значення інтенсивності зношування чавунів, модифікованих лігатурою Si - Ca - Ba - Ce, по дублях

Фактор, що варіюється	Натуральні (фактичні) значення факторів			Інтенсивність зношування ($W_{u,g}$), г/см ²		
	x_1 (% Al)	x_2 (% Mn)	x_3 (% C)			
Основний рівень, x_{i0}	3,0	10,5	3,5			
Інтервал варіювання, Δx_i	0,5	1,5	0,3			
Верхній рівень, $x_{i(max)}$ ($X_i = +1$)	3,5	12,0	3,8			
Нижній рівень, $x_{i(min)}$ ($X_i = -1$)	2,5	9,0	3,2			
№ досліду, u	Кодовані значення факторів і відповідні їм (у дужках) натуральні значення			Номер дубля, g		
	X_1 (Al)	X_2 (Mn)	X_3 (C)	1	2	3
u = 1	-1 (2,5 %)	-1 (9 %)	-1 (3,2 %)	0,37	0,384	0,381
u = 2	+1 (3,5 %)	-1 (9 %)	-1 (3,2 %)	0,282	0,294	0,28
u = 3	-1 (2,5 %)	+1 (12 %)	-1 (3,2 %)	0,229	0,23	0,243
u = 4	+1 (3,5 %)	+1 (12 %)	-1 (3,2 %)	0,29	0,3	0,28
u = 5	-1 (2,5 %)	-1 (9 %)	+1 (3,8 %)	0,082	0,08	0,07
u = 6	+1 (3,5 %)	-1 (9 %)	+1 (3,8 %)	0,12	0,14	0,13
u = 7	-1 (2,5 %)	+1 (12 %)	+1 (3,8 %)	0,061	0,066	0,054
u = 8	+1 (3,5 %)	+1 (12 %)	+1 (3,8 %)	0,079	0,08	0,087

Результати визначення інтенсивності зношування чавунів по дублях представлені в табл. 4.3. Змінні x_1 , x_2 , x_3 у табл. 4.3 задають хімічний склад чавунів через концентрацію легуючих елементів у натуральному виді, а змінні X_1 , X_2 , X_3 – у кодованому виді відповідно через верхній ($X_i = +1$) і нижній ($X_i = -1$) рівні. Для побудови регресійного рівняння спочатку використовувались кодовані значення факторів X_i , а потім здійснювався перехід від кодованих значень

факторів до їх фактичних (натуральних) значень x_i .

Відповідно до даних, наведених у табл. 4.3, для побудови регресійної залежності інтенсивності зношування чавунів від вмісту в них вуглецю, алюмінію і марганцю необхідно провести 24 випробування. Для того щоб виключити вплив випадкових помилок, викликаних різними зовнішніми чинниками, дані випробування проводились рандомізовано у часі, тобто у випадковій послідовності.

4.2 Розрахунок дисперсії та відносної помилки експерименту

Для визначення дисперсії та відносної помилки експерименту було проведено ряд проміжних розрахунків:

- 1) розраховано порядкові дисперсії;
- 2) знайдено абсолютні та відносні помилки вимірювань інтенсивності зношування чавунів у кожному досліді;
- 3) визначено довірчі інтервали для середніх значень інтенсивності зношування чавунів у кожному досліді;
- 4) оцінено статистичну значимість порядкових дисперсій, а також абсолютних і відносних помилок вимірювань інтенсивності зношування чавунів;
- 5) оцінено відтворюваність експериментальних даних за критерієм Кохрена.

Порядкова дисперсія $S_{W_u}^2$ в кожному досліді визначалась по формулі:

$$S_{W_u}^2 = \frac{\sum_{g=1}^{n_u} (W_{u_g} - \bar{W}_u)^2}{f_u}; \quad (4.1)$$

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

де g та n_u – відповідно номер дубля та кількість дублів в u - му досліді;

W_{u_g} – значення інтенсивності зношування у g - му дублі u - го досліді;

\bar{W}_u – середнє значення інтенсивності зношування в u - му досліді;

f_u – число ступенів свободи в u - му досліді при визначенні u - ї порядкової дисперсії $S_{W_u}^2$.

Число ступенів свободи – поняття, що враховує у статистичних ситуаціях зв'язки, які обмежують свободу зміни випадкових величин. Це число визначається як різниця між кількістю виконаних дослідів і кількістю констант, підрахованих за результатами тих же дослідів.

Для даних умов експерименту $n_u = 3$, $f_u = 3 - 1 = 2$ (у кожному досліді за результатами 3 дублів визначається 1 константа – порядкова дисперсія). Тоді вираз (4.1) можна переписати наступним чином:

$$S_{W_u}^2 = \frac{\sum_{g=1}^3 (W_{u_g} - \bar{W}_u)^2}{2}. \quad (4.3)$$

Порядкова дисперсія по виразу (4.3) розраховується для кожного u - го досліді.

Абсолютна помилка вимірювань в u - му досліді визначалась з виразу:

$$\sigma_{W_u} = \sqrt{S_{W_u}^2}, \quad (4.4)$$

відносна помилка (далі по тексту – варіація) вимірювань – з виразу:

$$V_{W_u} = \frac{\sigma_{W_u} \cdot 100\%}{\bar{W}_u}. \quad (4.5)$$

Результати розрахунків порядкових дисперсій, абсолютних помилок і варіацій вимірювань для вихідних даних, взятих з табл. 4.3, наведені в табл. 4.4.

Наведемо приклад розрахунку порядкової дисперсії, абсолютної помилки і варіації вимірювань у першому досліді ($u = 1$).

Порядкова дисперсія:

$$S_{W_1}^2 = \frac{\sum_{g=1}^3 (W_{1g} - \bar{W}_1)^2}{2} = \frac{(0,37-0,383)^2 + (0,384-0,383)^2 + (0,381-0,383)^2}{2} = 1,053 \cdot 10^{-4}.$$

Таблиця 4.4 - Результати розрахунків порядкових дисперсій, абсолютних помилок і варіацій вимірювань інтенсивності зношування чавунів

Номер дослід, u	Номер дубля, g	Значення інтенсивності зношування W_{ug} по дублях, $г/см^2$	Середнє значення інтенсивності зношування \bar{W}_u в дослідках, $г/см^2$	Порядкова дисперсія, $S_{W_u}^2$	σ_{W_u}	V_{W_u} , %
1	1	0,37	0,383	$1,053 \cdot 10^{-4}$	0,01	2,6
	2	0,384				
	3	0,381				
2	1	0,282	0,281	$8,129 \cdot 10^{-5}$	$9,016 \cdot 10^{-3}$	3,2
	2	0,294				
	3	0,28				
3	1	0,229	0,232	$1,08 \cdot 10^{-4}$	0,01	4,4
	2	0,23				
	3	0,243				
4	1	0,29	0,297	$1,572 \cdot 10^{-4}$	0,013	4,2
	2	0,3				
	3	0,28				
5	1	0,082	0,078	$2,767 \cdot 10^{-5}$	$5,26 \cdot 10^{-3}$	6,7
	2	0,08				
	3	0,07				
6	1	0,12	0,131	$4,724 \cdot 10^{-5}$	$6,873 \cdot 10^{-3}$	5,2
	2	0,14				
	3	0,13				
7	1	0,061	0,059	$2,729 \cdot 10^{-5}$	$5,224 \cdot 10^{-3}$	8,7
	2	0,066				
	3	0,054				
8	1	0,079	0,084	$3,59 \cdot 10^{-5}$	$5,992 \cdot 10^{-3}$	7,1
	2	0,08				
	3	0,087				
Сума	-	-	-	$5,899 \cdot 10^{-4}$	-	-

Абсолютна помилка вимірювань інтенсивності зношування:

$$\sigma_{W_1} = \sqrt{S_{W_1}^2} = \sqrt{1,053 \cdot 10^{-4}} = 0,01.$$

Варіація вимірювань інтенсивності зношування:

$$V_{w_1} = \frac{\sigma_{w_1} \cdot 100\%}{\bar{W}_1} = \frac{0,01 \cdot 100}{0,383} = 2,682(\%).$$

Порядкові дисперсії, абсолютні помилки і варіації вимірювань визначені по вибірках обмеженого об'єму (у даному експерименті кожний опит дублювався 3 рази). Тому неминуче виникає питання про те, з якою надійністю обчислені їхні значення або, що те ж саме, яка їхня статистична значимість.

Для оцінки статистичної значимості порядкових дисперсій, абсолютних помилок і варіацій вимірювань розраховувались довірчі інтервали для відповідних середніх значень інтенсивності зношування \bar{W}_u (табл. 4.4). Довірчим інтервалом $(\bar{W}_u - \Delta W_u; \bar{W}_u + \Delta W_u)$ для інтенсивності зношування є такий інтервал, в який із заздалегідь заданою імовірністю $P = 1 - \alpha$, близькою до одиниці, потрапляють усі можливі значення інтенсивності зношування. Математично ця умова записується в такий спосіб:

$$P(\bar{W}_u - \Delta W_u \leq W_u \leq \bar{W}_u + \Delta W_u) = 1 - \alpha.$$

Чим більш вузький для обраної імовірності довірчий інтервал, тим точніше оцінка інтенсивності зношування. І, навпаки, якщо ширина довірчого інтервалу велика, то оцінка, проведена за допомогою даного інтервалу, мало прийнятна для практичного використання. Оскільки границі довірчого інтервалу залежать від елементів вибірки, значення $(\bar{W}_u - \Delta W_u)$ та $(\bar{W}_u + \Delta W_u)$ можуть змінюватись від вибірки до вибірки.

Імовірність $P = 1 - \alpha$ прийнято називати *довірчою* імовірністю (або *надійністю*), а параметр α – рівнем значимості. Вибір довірчої імовірності або рівня значимості не є математичним завданням, а визначається специфікою пробле-

ми, що розв'язується, і вимогами до надійності вимірювань. Найчастіше задають надійність $P = 0,95; 0,97; 0,99$. Даному рівню надійності відповідають рівні значимості $0,05; 0,03; 0,01$. В інженерних задачах і задачах прикладного матеріалознавства, як правило, використовують рівень значимості $\alpha = 0,05$.

Для розрахунку ширини довірчого інтервалу використовували співвідношення:

$$\Delta W_u = t_1 \frac{\sigma_{w_u}}{\sqrt{n_u}}, \quad (4.6)$$

де t_1 – критерій Ст'юдента для визначення ширини довірчого інтервалу;

σ_{w_u} – абсолютна помилка вимірювань інтенсивності зношування в u -му досліді (табл. 4.4);

n_u – кількість дублів в досліді ($n_u = 3$).

Значення критерію Ст'юдента t_1 табульовані. Для $n_u = 3$ і рівня значимості $\alpha = 0,05$ $t_1 = 2,45$ [25].

З урахуванням (4.6) довірчий інтервал для середніх значень інтенсивності зношування \bar{W}_u задається виразом:

$$\left(\bar{W}_u - t_1 \frac{\sigma_{w_u}}{\sqrt{n_u}}; \bar{W}_u + t_1 \frac{\sigma_{w_u}}{\sqrt{n_u}} \right). \quad (4.7)$$

Величина $\Delta W_u = t_1 \frac{\sigma_{w_u}}{\sqrt{n_u}}$ є скорегованою помилкою вимірювань інтенсивності зношування. Значення порядкових дисперсій, абсолютних помилок і варіацій вимірювань вважаються статистично значимими, якщо в кожному досліді скорегована помилка вимірювань ΔW_u менше абсолютної помилки вимірювань σ_{w_u} :

$$\Delta W_u \leq \sigma_{w_u}. \quad (4.8)$$

Усі значення порядкових дисперсій, абсолютних помилок і варіацій вимі-

рувань є статистично значимими, оскільки в кожному досліді виконується умова (4.8) (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 - Результати оцінки статистичної значимості порядкових дисперсій, абсолютних помилок і варіацій вимірювань інтенсивності зношування чавунів

Номер досліду, u	\overline{W}_u (табл. 4.4)	n_u	t_1	σ_{w_u} (табл. 4.4)	$\Delta W_u = t_1 \frac{\sigma_{w_u}}{\sqrt{n_u}}$	Довірчий інтервал
1	0,383	7	2,45	0,01	$9,502 \cdot 10^{-3}$	(0,373; 0,392)
2	0,281			$9,016 \cdot 10^{-3}$	$8,349 \cdot 10^{-3}$	(0,272; 0,289)
3	0,232			0,01	$9,621 \cdot 10^{-3}$	(0,223; 0,242)
4	0,297			0,013	0,012	(0,285; 0,308)
5	0,078			$5,26 \cdot 10^{-3}$	$4,871 \cdot 10^{-3}$	(0,073; 0,083)
6	0,131			$6,873 \cdot 10^{-3}$	$6,364 \cdot 10^{-3}$	(0,124; 0,137)
7	0,059			$5,224 \cdot 10^{-3}$	$4,837 \cdot 10^{-3}$	(0,055; 0,064)
8	0,084			$5,992 \cdot 10^{-3}$	$5,549 \cdot 10^{-3}$	(0,078; 0,089)

Після оцінки статистичної значимості порядкових дисперсій, абсолютних помилок і варіацій вимірювань оцінювалась відтворюваність експериментальних даних. На цій стадії перевірялась гіпотеза про сталість дисперсії шуму з використанням критерію Кохрена. Перевірка даної гіпотези дозволяє судити про однорідність або неоднорідність ряду дисперсій. Якщо ряд дисперсій однорідний, різні значення інтенсивності зношування \overline{W}_u визначені з однаковою точністю. Якщо ряд дисперсій неоднорідний, різні значення інтенсивності зношування визначені з різною точністю.

Процедура перевірки статистичних гіпотез у загальному випадку формально передбачає порівняння деякого критерію, розрахованого за експериментальними даними, з його табличним значенням при обраному заздалегідь рівні значимості. Рівень значимості визначає найбільшу імовірність відкинути пра-

вильну гіпотезу, тобто найбільшу імовірність припущення про те, що експериментальний результат помилковий. Наприклад, якщо рівень значимості вибирають рівним 0,05 (що дуже часто робиться у технічних задачах), то це означає, що допускається 5 % - ва імовірність невірної рішення і довіря 95 % - ва імовірність вірного рішення.

Розрахункове значення критерію Кохрена обчислювалось по формулі:

$$G^{\text{розр}} = \frac{S_{W_u}^2}{\sum_{u=1}^N S_{W_u}^2}, \quad (4.9)$$

де $S_{W_u}^2$ – максимальна порядкова дисперсія.

Розрахункове значення критерію Кохрена ($G^{\text{розр}}$) порівнювалось з його табличним значенням ($G^{\text{табл}}$), яке визначалось по таблицях [26] залежно від рівня значимості α , числа ступенів свободи f_u і числа дослідів N : $G^{\text{табл}}(\alpha; f_u; N)$. Якщо $G^{\text{розр}} < G^{\text{табл}}$, ряд порядкових дисперсій однорідний, якщо $G^{\text{розр}} > G^{\text{табл}}$, ряд порядкових дисперсій неоднорідний.

Для даних умов експерименту $f_u = 2$; $N = 8$. По табл. 4.4 знаходимо максимальну порядкову дисперсію $(S_{W_u}^2)_{\text{max}} = 1,572 \cdot 10^{-4}$ і суму всіх порядкових дисперсій $\sum_{u=1}^8 S_{W_u}^2 = 5,899 \cdot 10^{-4}$. Тоді $G^{\text{розр}} = \frac{1,572 \cdot 10^{-4}}{5,899 \cdot 10^{-4}} = 0,267$. Приймавши рівень значимості $\alpha = 0,05$, для числа ступенів свободи $f_u = 2$ і числа дослідів $N = 8$ одержимо наступне табличне значення критерію Кохрена [26]: $G_{0,05;2;8}^{\text{табл}} = 0,561$. Оскільки $G^{\text{розр}} < G_{0,05;2;8}^{\text{табл}}$ ($0,267 < 0,561$), ряд порядкових дисперсій однорідний.

Якщо ряд порядкових дисперсій однорідний, можна приступати до визначення дисперсії, абсолютної помилки та варіації експерименту.

Дисперсія експерименту розраховувалась по рівнянню:

$$S_W^2 = \frac{\sum_{u=1}^8 S_{W_u}^2}{N}, \quad (4.10)$$

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

Абсолютна помилка експерименту визначалась з виразу:

$$\sigma_w = \sqrt{S_w^2}, \quad (4.11)$$

варіація експерименту – з виразу:

$$V_w = \frac{\sigma_w \cdot 100\%}{\bar{W}}, \quad (4.12)$$

$$\text{де } \bar{W} = \frac{\sum_{u=1}^8 \bar{W}_u}{N}.$$

Варіація експерименту є мірою його точності. Точність експерименту вважається задовільною, якщо варіація експерименту не перевищує 10 %:

$$V_y \leq 10\%. \quad (4.13)$$

$$S_w^2 = \frac{\sum_{u=1}^8 S_{W_u}^2}{N} = \frac{5,899 \cdot 10^{-4}}{8} = 7,373 \cdot 10^{-5};$$

$$\sigma_w = \sqrt{S_w^2} = \sqrt{7,373 \cdot 10^{-5}} = 8,587 \cdot 10^{-3};$$

$$\bar{W} = \frac{\sum_{u=1}^8 \bar{W}_u}{N} = \frac{1,544}{8} = 0,193;$$

$$V_w = \frac{\sigma_w \cdot 100\%}{\bar{W}} = \frac{8,573 \cdot 10^{-3} \cdot 100}{0,193} = 4,45(\%).$$

Точність експерименту слід визнати задовільною, оскільки виконується умова (4.13): варіація експерименту не перевищує 10 %.

4.3 Побудова регресійного рівняння

4.3.1 Розрахунок коефіцієнтів регресії

Для побудови залежності інтенсивності зношування чавунів від вмісту в них алюмінію, марганцю та вуглецю скористаємось регресійним рівнянням у неповній квадратичній формі [27]:

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

У розвернутому вигляді рівняння (4.14) можна записати наступним чином [28]:

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

де X_1, X_2, X_3 – кодовані значення факторів, які можуть змінюватись від -1 до +1 (табл. 4.3);

$b_0, b_1 \dots b_{123}$ – коефіцієнти регресійного рівняння.

Коефіцієнти регресійного рівняння (4.15) розраховуються по залежності [28]:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{i_u} \bar{W}_u}{N}, \quad (4.16)$$

де u – номер досліджу;

X_{i_u} – кодовані значення факторів (X_1, X_2, X_3) в u -му досліді (табл. 4.3);

\bar{W}_u – середнє значення інтенсивності зношування чавунів в u -му досліді.

Розпишемо вираз (4.16) для усіх коефіцієнтів, що входять у регресійне рівняння (4.15):

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{\sum_{u=1}^N X_{0_u} \bar{W}_u}{N}; \quad b_1 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{1_u} \bar{W}_u}{N}; \quad b_2 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{2_u} \bar{W}_u}{N}; \\ b_3 &= \frac{\sum_{u=1}^N X_{3_u} \bar{W}_u}{N}; \quad b_{12} = \frac{\sum_{u=1}^N (X_1 X_2)_u \bar{W}_u}{N}; \quad b_{13} = \frac{\sum_{u=1}^N (X_1 X_3)_u \bar{W}_u}{N}; \\ b_{23} &= \frac{\sum_{u=1}^N (X_2 X_3)_u \bar{W}_u}{N}; \quad b_{123} = \frac{\sum_{u=1}^N (X_1 X_2 X_3)_u \bar{W}_u}{N}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Для розрахунку коефіцієнтів $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$, використовуючи дані, наведені в табл. 4.3, 4.4, складемо розширену матрицю планування (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 - Розширена матриця плану ПФЕ 2³

Номер досліду	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	$\bar{W}_u, \text{Г/см}^2$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	0,383
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	0,281
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	0,232
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	0,297
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0,078
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	0,131
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	0,059
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,084

Розрахуємо коефіцієнти $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ у регресійному рівнянні (4.15) по залежностях (4.17) з урахуванням знаків X_i у стовбцях табл. 4.6:

$$b_0 = \frac{\bar{W}_1 + \bar{W}_2 + \bar{W}_3 + \bar{W}_4 + \bar{W}_5 + \bar{W}_6 + \bar{W}_7 + \bar{W}_8}{8} =$$

$$= \frac{0,383 + 0,281 + 0,232 + 0,297 + 0,078 + 0,131 + 0,059 + 0,084}{8} = 0,193;$$

$$b_1 = \frac{-\bar{W}_1 + \bar{W}_2 - \bar{W}_3 + \bar{W}_4 - \bar{W}_5 + \bar{W}_6 - \bar{W}_7 + \bar{W}_8}{8} =$$

$$= \frac{-0,383 + 0,281 - 0,232 + 0,297 - 0,078 + 0,131 - 0,059 + 0,084}{8} = 4,911 \cdot 10^{-3};$$

$$b_2 = \frac{-\bar{W}_1 - \bar{W}_2 + \bar{W}_3 + \bar{W}_4 - \bar{W}_5 - \bar{W}_6 + \bar{W}_7 + \bar{W}_8}{8} =$$

$$= \frac{-0,383 - 0,281 + 0,232 + 0,297 - 0,078 - 0,131 + 0,059 + 0,084}{8} = -0,025;$$

$$b_3 = \frac{-\bar{W}_1 - \bar{W}_2 - \bar{W}_3 - \bar{W}_4 + \bar{W}_5 + \bar{W}_6 + \bar{W}_7 + \bar{W}_8}{8} =$$

$$= \frac{-0,383 - 0,281 - 0,232 - 0,297 + 0,078 + 0,131 + 0,059 + 0,084}{8} = -0,105;$$

$$b_{12} = \frac{\bar{W}_1 - \bar{W}_2 - \bar{W}_3 + \bar{W}_4 + \bar{W}_5 - \bar{W}_6 - \bar{W}_7 + \bar{W}_8}{8} =$$

$$= \frac{0,383 - 0,281 - 0,232 + 0,297 + 0,078 - 0,131 - 0,059 + 0,084}{8} = 0,017;$$

$$b_{13} = \frac{\bar{W}_1 - \bar{W}_2 + \bar{W}_3 - \bar{W}_4 - \bar{W}_5 + \bar{W}_6 - \bar{W}_7 + \bar{W}_8}{8} =$$

$$= \frac{0,383 - 0,281 + 0,232 - 0,297 - 0,078 + 0,131 - 0,059 + 0,084}{8} = 0,014;$$

$$b_{23} = \frac{\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 - \bar{Y}_3 - \bar{Y}_4 - \bar{Y}_5 - \bar{Y}_6 + \bar{Y}_7 + \bar{Y}_8}{8} =$$

$$= \frac{0,383 + 0,281 - 0,232 - 0,297 - 0,078 - 0,131 + 0,059 + 0,084}{8} = 8,554 \cdot 10^{-3};$$

$$b_{123} = \frac{-\bar{W}_1 + \bar{W}_2 + \bar{W}_3 - \bar{W}_4 + \bar{W}_5 - \bar{W}_6 - \bar{W}_7 + \bar{W}_8}{8} =$$

$$= \frac{-0,383 + 0,281 + 0,232 - 0,297 + 0,078 - 0,131 - 0,059 + 0,084}{8} = -0,024.$$

Таким чином, отримані наступні значення коефіцієнтів регресійного рівняння (4.15) (табл. 4.7):

Таблиця 4.7 - Зведена таблиця з обчисленими значеннями коефіцієнтів регресійного рівняння (4.15)

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
0,193	$4,911 \cdot 10^{-3}$	-0,025	-0,105	0,017	0,014	$8,554 \cdot 10^{-3}$	-0,024

З урахуванням числових значень коефіцієнтів $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ (табл. 4.7) регресійне рівняння (4.15) запишеться у вигляді:

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

$$+ 8,554 \cdot 10^{-3} X_2 X_3 - 0,024 X_1 X_2 X_3 \quad (4.18)$$

4.3.2 Перевірка статистичної значимості коефіцієнтів регресії

Коефіцієнти регресії, які розраховані по рівнянням (4.16), (4.17), строго кажучи, визначені не точно, а з деякою похибкою. Мірою цієї похибки є дисперсія оцінок коефіцієнтів. Неминуча наявність похибки у визначенні коефіцієнтів регресії обумовлена коливаннями значень інтенсивності зношування при дублюванні кожного дослідів. З урахуванням цього рівняння (4.16) можна запи-

сати у наступному виді: $b_{i-\Delta b_i}^{+\Delta b_i} = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{W}_{u-\Delta W_u}^{+\Delta W_u}}{N}$. Вочевидь, при досить малих значеннях

коефіцієнтів b_i абсолютна похибка їхнього визначення $2\Delta b_i$, обумовлена похибкою визначення інтенсивності зношування, може виявитись неприпустимо великою. У цьому випадку значення коефіцієнта варто визнати статистично незначущим, а сам коефіцієнт виключити з регресійного рівняння. Статистична

незначущість коефіцієнта регресійного рівняння означає відсутність його впливу на інтенсивність зношування.

Якщо усі коефіцієнти регресійного рівняння (4.18) статистично значимі, з нього необхідно виключити найменший за абсолютним значенням коефіцієнт.

Оскільки дублювання дослідів рівномірне, дисперсію оцінок коефіцієнтів регресійного рівняння можна розрахувати по залежності:

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

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

N – кількість дослідів ($N = 8$);

S_w^2 – дисперсія експерименту.

Середньоквадратична помилка оцінки коефіцієнтів регресії визначається як:

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

Довірчий інтервал коефіцієнтів регресії Δ_{b_i} визначається з виразу:

$$\Delta_{b_i} = t_2 S_{b_i}, \quad (4.21)$$

де t_2 – критерій Ст'юдента, який залежить від рівня значимості α і числа ступенів свободи f_2 при визначенні дисперсії експерименту:

$$f_2 = (n_u - 1)N.$$

Коефіцієнти регресійного рівняння, абсолютна величина яких дорівнює довірчому інтервалу Δ_{b_i} або більше його, визнають статистично значимими.

Тобто для статистично значимих коефіцієнтів повинна виконуватись умова:

$$|b_i| \geq \Delta_{b_i} \quad \text{або} \quad |b_i| \geq t_2 S_{b_i}. \quad (4.22)$$

Умова (4.22) означає, що абсолютні значення статистично значимих коефіцієнтів регресії b_i повинні не менш ніж у t_2 разів перевищувати абсолютну помилку їхнього визначення S_{b_i} .

Коефіцієнти регресійного рівняння, абсолютна величина яких менше довірчого інтервалу Δ_{b_i} , вважаються статистично незначущими і виключаються з регресійного рівняння.

$$S_w^2 = 7,373 \cdot 10^{-5};$$

$$S_{b_i} = \sqrt{\frac{7,373 \cdot 10^{-5}}{7 \cdot 8}} = 1,147 \cdot 10^{-3};$$

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

Вибравши рівень значимості $\alpha = 0,05$, при числі ступенів свободи $f_2 = 16$ по таблицях [29] знайдемо табличне значення критерію Ст'юдента (t_2 - критерію): $t_2 = 2,04$. По виразу (4.21) розрахуємо довірчий інтервал коефіцієнтів регресії: $\Delta_{b_i} = 2,04 \cdot 1,147 \cdot 10^{-3} = 2,341 \cdot 10^{-3}$.

Статистично значимими коефіцієнтами, точність оцінки яких можна вважати задовільною, є усі 8 коефіцієнтів, що входять у регресійне рівняння (4.18): $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$. Абсолютні значення коефіцієнтів перевищують величину їхнього довірчого інтервалу $\Delta_{b_i} = 2,341 \cdot 10^{-3}$. Однак для визначення дисперсії апроксимації (дисперсії неадекватності) необхідно, щоб кількість статистично значимих коефіцієнтів у регресійному рівнянні (4.18) була менше кількості дослідів N ($N = 8$). Тому з регресійного рівняння (4.18) необхідно виключити найменший за абсолютним значенням коефіцієнт $b_1 = 4,911 \cdot 10^{-3}$ (табл. 4.7).

Після виключення коефіцієнту b_1 регресійне рівняння (4.18) запишеться у виді:

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

4.3.3 Перевірка адекватності регресійного рівняння експерименту

Процедура перевірки адекватності регресійного рівняння експерименту зводиться до виконання ряду послідовних обчислень:

1. Розрахунок теоретичних значень інтенсивності зношування в кожному досліді по рівнянню (4.23).

2. Зіставлення розрахункових і експериментальних значень інтенсивності зношування і знаходження дисперсії неадекватності.

3. Розрахунок критерію Фішера та остаточний висновок на підставі зіставлення його розрахункового і табличного значень про адекватність або неадекватність регресійного рівняння експерименту.

Використовуючи рівняння (4.23), визначимо розрахункові (теоретичні) значення інтенсивності зношування чавунів W'_u у кожному з восьми дослідів (u – номер досліді). Усі значення X_i у дане рівняння входять у кодовому масштабі (табл. 4.6):

у 1-му досліді: $X_1 = -1, X_2 = -1, X_3 = -1, X_4 = +1, X_5 = +1, X_6 = +1, X_7 = -1$;

у 2-му досліді: $X_1 = +1, X_2 = -1, X_3 = -1, X_4 = -1, X_5 = -1, X_6 = +1, X_7 = +1$;

у 3-му досліді: $X_1 = -1, X_2 = +1, X_3 = -1, X_4 = -1, X_5 = +1, X_6 = -1, X_7 = +1$;

у 4-му досліді: $X_1 = +1, X_2 = +1, X_3 = -1, X_4 = +1, X_5 = -1, X_6 = -1, X_7 = -1$;

у 5-му досліді: $X_1 = -1, X_2 = -1, X_3 = +1, X_4 = +1, X_5 = -1, X_6 = -1, X_7 = +1$;

у 6-му досліді: $X_1 = +1, X_2 = -1, X_3 = +1, X_4 = -1, X_5 = +1, X_6 = -1, X_7 = -1$;

у 7-му досліді: $X_1 = -1, X_2 = +1, X_3 = +1, X_4 = -1, X_5 = -1, X_6 = +1, X_7 = -1$;

у 8-му досліді: $X_1 = +1, X_2 = +1, X_3 = +1, X_4 = +1, X_5 = +1, X_6 = +1, X_7 = +1$.

З урахуванням знаків X_i розрахункові значення інтенсивності зношування чавунів дорівнюють, г/см²:

у 1-му досліді:

$$W'_1 = 0,193 + 0,025 + 0,105 + 0,017 + 0,014 + 8,554 \cdot 10^{-3} + 0,024 = 0,387;$$

у 2-му досліді:

$$W'_2 = 0,193 + 0,025 + 0,105 - 0,017 - 0,014 + 8,554 \cdot 10^{-3} - 0,024 = 0,276;$$

у 3-му досліді:

$$W'_3 = 0,193 - 0,025 + 0,105 - 0,017 + 0,014 - 8,554 \cdot 10^{-3} - 0,024 = 0,237;$$

у 4-му досліді:

$$W'_4 = 0,193 - 0,025 + 0,105 + 0,017 - 0,014 - 8,554 \cdot 10^{-3} + 0,024 = 0,292;$$

у 5-му досліді:

$$W'_5 = 0,193 + 0,025 - 0,105 + 0,017 - 0,014 - 8,554 \cdot 10^{-3} - 0,024 = 0,083;$$

у 6-му досліді:

$$W'_6 = 0,193 + 0,025 - 0,105 - 0,017 + 0,014 - 8,554 \cdot 10^{-3} + 0,024 = 0,126;$$

у 7-му досліді:

$$W'_7 = 0,193 - 0,025 - 0,105 - 0,017 - 0,014 + 8,554 \cdot 10^{-3} + 0,024 = 0,064;$$

у 8-му досліді:

$$W'_8 = 0,193 - 0,025 - 0,105 + 0,017 + 0,014 + 8,554 \cdot 10^{-3} - 0,024 = 0,079.$$

Отримані розрахункові значення інтенсивності зношування W'_u необхідні для визначення дисперсії неадекватності (табл. 4.8).

При рівномірному дублюванні дослідів дисперсія неадекватності $S_{\text{неад}}^2$ вираховується по формулі:

$$S_{\text{неад}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (W'_u - \bar{W}_u)^2}{f_1}; \quad f_1 = N - k', \quad (4.24)$$

де W'_u і \bar{W}_u – значення інтенсивності зношування в u -му досліді, відповідно розраховані по регресійному рівнянню (4.23) і визначені експериментально;

f_1 – число ступенів свободи;

k' – кількість коефіцієнтів у регресійному рівнянні (4.23), включаючи b_0 ;

N – кількість дослідів плану ($N = 8$).

Для даного експерименту $k' = 7$: регресійне рівняння (4.23) містить 7 коефіцієнтів. 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:

$$F_{\text{розр}} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_W^2}. \quad (4.25)$$

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

Таблиця 4.8 - Результати розрахунку дисперсії неадекватності

Номер дослід, u	\bar{W}_u	W'_u	$ \Delta W = W'_u - \bar{W}_u $	$\Delta W^2 = (W'_u - \bar{W}_u)^2$	f_1	$S^2_{\text{неад}}$
1	0,383	0,387	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$	1	$2 \cdot 10^{-4}$
2	0,281	0,276	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$		
3	0,232	0,237	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$		
4	0,297	0,292	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$		
5	0,078	0,083	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$		
6	0,131	0,126	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$		
7	0,059	0,064	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$		
8	0,084	0,079	0,005	$25 \cdot 10^{-6}$		
Сума	-	-	-	$2 \cdot 10^{-4}$		

Табличне значення критерію Фішера визначалось залежно від рівня значимості α і числа ступенів свободи f_1 і f_2 , обчислених раніше: $f_1 = 1$, $f_2 = 16$. При рівні значимості $\alpha = 0,05$ і ступенях свободи $f_1 = 1$ та $f_2 = 16$ табличне значення F - критерію дорівнює $F^{\text{табл.}} = 4,04$ [30].

Регресійне рівняння вважається адекватним експерименту, якщо виконується умова:

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

Оскільки умова (4.26) виконується ($F^{\text{розр}} = 2,617 < F^{\text{табл.}} = 4,04$), гіпотеза про адекватність регресійного рівняння (4.23) експерименту при 5 % - му рівні значимості (при рівні надійності 95 %) не відкидається.

Поряд із критерієм Фішера для оцінки адекватності регресійного рівняння експерименту використовують варіацію апроксимації. Варіація апроксимації не залежить від дисперсії експерименту, а визначається винятково величиною дисперсії неадекватності [30]:

$$V_a = \frac{\sqrt{S^2_{\text{неад}}} \cdot 100\%}{\bar{W}}, \quad (4.27)$$

де \bar{W} – середнє значення інтенсивності зношування по всіх дослідах.

Якщо варіація апроксимації не перевищує 10 %, регресійне рівняння признається адекватним експерименту незалежно від величини розрахункового критерію Фішера. Якщо варіація апроксимації перевищує 10 %, побудоване регресійне рівняння неадекватно описує експеримент [30].

$$\bar{W} = \frac{\sum_{u=1}^8 \bar{W}_u}{N} = \frac{1,544}{8} = 0,193; S_{\text{неад}}^2 = 2 \cdot 10^{-4}.$$

$$\text{Тоді } V_a = \frac{\sqrt{2 \cdot 10^{-4}} \cdot 100\%}{0,193} = 7,2(\%).$$

Оскільки варіація апроксимації не перевищує 10 %, регресійне рівняння (4.23) можна визнати адекватним експерименту.

Для використання рівняння (4.23) з метою прогнозування інтенсивності зношування фрикційних сірих чавунів залежно від їхнього хімічного складу зробимо наступні заміни змінних:

$$X_1 = \frac{x_1 - x_{10}}{\Delta x_1}; X_2 = \frac{x_2 - x_{20}}{\Delta x_2}; X_3 = \frac{x_3 - x_{30}}{\Delta x_3}, \quad (4.28)$$

де X_1, X_2, X_3 – кодовані значення факторів, які можуть змінюватись від -1 до +1 (факторами є концентрації алюмінію, марганцю і вуглецю в чавунах);

x_1, x_2, x_3 – відповідно концентрації алюмінію, марганцю і вуглецю в чавунах, виражені у відсотках: $x_1 = 2,5 - 3,5$ % (Al), $x_2 = 9 - 12$ % (Mn), $x_3 = 3,2 - 3,8$ % (C);

x_{10}, x_{20}, x_{30} – основний рівень, відносно якого варіювались концентрації легуючих елементів в експерименті: $x_{10} = 3,0$ % (Al), $x_{20} = 10,5$ % (Mn), $x_{30} = 3,5$ % (C);

$\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ – інтервал варіювання концентрації легуючих елементів: $\Delta x_1 = 0,5$ % (Al), $\Delta x_2 = 1,5$ % (Mn), $\Delta x_3 = 0,3$ % (C).

З урахуванням підстановок (4.28) регресійне рівняння (4.23) приймає наступний вид:

$$W' = 0,193 - 0,025X_2 - 0,105X_3 + 0,017X_1X_2 + 0,014X_1X_3 + 0,00855X_2X_3 - 0,024X_1X_2X_3; \rightarrow$$

$$\begin{aligned}
W' &= 0,193 - 0,025 \left(\frac{x_2 - x_{20}}{\Delta x_2} \right) - 0,105 \left(\frac{x_3 - x_{30}}{\Delta x_3} \right) + 0,017 \left(\frac{x_1 - x_{10}}{\Delta x_1} \cdot \frac{x_2 - x_{20}}{\Delta x_2} \right) + \\
&+ 0,014 \left(\frac{x_1 - x_{10}}{\Delta x_1} \cdot \frac{x_3 - x_{30}}{\Delta x_3} \right) + 0,00855 \left(\frac{x_2 - x_{20}}{\Delta x_2} \cdot \frac{x_3 - x_{30}}{\Delta x_3} \right) - 0,024 \cdot \left(\frac{x_1 - x_{10}}{\Delta x_1} \cdot \frac{x_2 - x_{20}}{\Delta x_2} \cdot \frac{x_3 - x_{30}}{\Delta x_3} \right) \rightarrow \\
W' &= 0,193 - 0,025 \left(\frac{x_2 - 10,5}{1,5} \right) - 0,105 \left(\frac{x_3 - 3,5}{0,3} \right) + 0,017 \left(\frac{x_1 - 3}{0,5} \cdot \frac{x_2 - 10,5}{1,5} \right) + \\
&+ 0,014 \left(\frac{x_1 - 3}{0,5} \cdot \frac{x_3 - 3,5}{0,3} \right) + 0,00855 \left(\frac{x_2 - 10,5}{1,5} \cdot \frac{x_3 - 3,5}{0,3} \right) - 0,024 \left(\frac{x_1 - 3}{0,5} \cdot \frac{x_2 - 10,5}{1,5} \cdot \frac{x_3 - 3,5}{0,3} \right). \quad (4.29)
\end{aligned}$$

Проаналізуємо рівняння (4.29). Оскільки в ньому відсутній коефіцієнт b_1 (коефіцієнт b_1 статистично незначущий), зміна вмісту алюмінію з 2,5 до 3,5 % не впливає на зносостійкість фрикційних сірих чавунів, модифікованих комплексною лігатурою системи Si - Ca - Ba - Ce. Отже, концентрацію алюмінію в чавунах можна брати по нижньому рівню – 2,5 %. Зміна вмісту марганцю (x_2) з 9 до 12 % та вуглецю (x_3) з 3,2 до 3,8 % призводить до зменшення інтенсивності зношування чавунів. Про це свідчать знаки коефіцієнтів b_2 та b_3 у рівнянні (4.29): $b_2 = -0,025$; $b_3 = -0,105$. Отже, для досягнення максимальної зносостійкості чавунів (мінімальної інтенсивності зношування) вміст марганцю та вуглецю доцільно брати по верхньому рівню – 12 % Mn та 3,8 % C.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ

5.1 Загальні вимоги охорони праці

Студенти, що беруть участь в НДР, допускаються до виконання робіт лише в присутності і під безпосереднім керівництвом викладача, що веде НДРС.

Забороняється працювати в лабораторії в нетверезому стані, вживати алкогольні напої, наркотичні і токсичні речовини під час роботи і після закінчення роботи на території університету [36 – 39].

Спецодяг і інші засоби індивідуального захисту повинні зберігатися в спеціально відведеному місці. Забороняється перебувати в лабораторії у верхньому одязі і класти одяг на випробувальні установки, прилади і устаткування.

При роботі в лабораторії необхідно дотримувати правила особистої гігієни. Забороняється приймати їжу на робочому місці.

У лабораторії має бути аптечка для надання першої допомоги при порізі, опіку і інших нещасних випадках [38].

Для гасіння можливих займань і пожеж лабораторія має бути оснащена необхідними засобами пожежегасіння (вогнегасник, ящик з піском).

До самостійної роботи в якості штампувальника допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, а також [39]:

- вступний інструктаж;
- інструктаж з пожежної безпеки;
- первинний інструктаж на робочому місці;
- навчання безпечним методам і прийомам праці не менше ніж за 10 годинною програмою;
- інструктаж з електробезпеки на робочому місці і перевірку засвоєння його змісту.

Основними небезпечними і шкідливими виробничими факторами при роботі на пресі холодного штампування при певних обставинах можуть бути [38]:

- елементи виробничого обладнання;
- несправний робочий інструмент;

- частки металу, що відлітають;
- електрострум;
- промисловий пил;
- виробничий шум;
- механічні небезпеки: розчавлювання, защемлення і падіння; відрізання; розрив, затягування, потрапляння під удар.

При виявленні несправностей устаткування, блокувань, пристроїв, інструментів та інші недоліки або небезпеки на робочому місці негайно повідомити викладачу. Приступити до роботи можна тільки з його дозволу після усунення всіх недоліків.

При виявленні загоряння або у випадку пожежі [39]:

- відключити обладнання;
- повідомити в пожежну охорону і адміністрації;
- приступити до гасіння пожежі наявними в цеху первинними засобами пожежогасіння відповідно до інструкції з пожежної безпеки.

При загрозі життю - покинути приміщення.

При нещасному випадку надати потерпілому першу (долікарську) допомогу, негайно повідомити про те, що трапилося викладачу, вжити заходів до збереження обстановки події (стан устаткування), якщо це не створює небезпеки для оточуючих.

5.2 Вимоги охорони праці перед початком роботи

Перед початком роботи мають бути перевірені з'єднання обладнання з контуром захисного заземлення, справність електроприладів, інструменту, автоматичних вимикачів, розеток, вилок, освітлення, а також наявність первинних засобів пожежогасіння [36 – 39].

Заземлюючі контакти розеток мають бути надійно з'єднані з контуром захисного заземлення.

Перед початком роботи переконатися в тому, що всі електроприлади, використовувані в експерименті, правильно підключені і надійно заземлені.

При експлуатації електроприладів необхідно керуватися правилами, викладеними в технічному паспорті.

При виявленні несправностей електроприладів, стендів, захисного заземлення повідомити про це науковому керівникові лабораторії, або зав. лабораторією.

Робота на пресах повинна проводитися тільки після перевірки [39]:

- справності штампів і відповідності їх розмірних модельних характеристик;
- наявності та справності навколо обертових частин пресів захисних огорожень, заземлюючих пристроїв, електропроводки;
- наявність і справність блокувальних і запобіжних пристроїв, зблокованих з пусковими механізмами.

Всі рухи (переміщення) преса, які можуть стати причиною небезпеки для обслуговуючого персоналу та оточуючих, повинні мати справне захисне блокування. Блокуючі пристрої преса при його роботі в одному з режимів повинні виключити можливість його роботи в іншому режимі і мимовільне перемикання з режиму на режим. З метою забезпечення безпеки штампувальника система управління пресом повинна мати пристрій аварійної зупинки, яке спрацьовує при будь-якому порушенні працездатності преса незалежно від режиму його роботи, в тому числі при взаємному відключенні будь-якого виду живлення, яке використовується в обслуговуваному обладнанні.

Органи аварійного відключення повинні оснащуватися механічними засувками для фіксації їх у положенні "Вимкнено". Повторне включення преса має бути можливим тільки після того, як всі органи аварійного відключення, які раніше були задіяні, будуть вручну наведені в початкове положення. Повернення у вихідне положення органів аварійного відключення не повинно викликати повторного включення будь-якої частини преса.

Робота на пресах повинна проводитися після перевірки:

- справності роботи приладів системи управління, наявності та рівня масла в резервуарі;
- відсутність течії масла;

- дії аварійно-попереджувальної сигналізації на сигнальному табло (червона лампочка - небезпеки);
- справності роботи фотозахисту;
- наявності тиску і відповідності його зусилля.

5.3 Вимоги охорони праці під час роботи

Дозволяється працювати лише зі справними електроприладами.

При роботі з електроприладами можливі випадки ураження людей електричним струмом. Причинами цього можуть бути [38, 39]:

- одночасний дотик руками або металевим предметом до корпусу електроприладів і оголених проводів;
- робота з несправними електроприладами;
- порушення правил користування електроприладами.

Забороняється працювати з електроприладами і вимірювальними приладами при знятому кожусі.

Забороняється висмикувати штепсельні роз'єми, вилки і фішки, узявшись за провід. Відключення проводити тільки узявшись за роз'єм, вилку або фішку, щоб уникнути короткого замикання і можливого при цьому нещасного випадку (опіку).

Забороняється працювати з електроприладами у вогкому одязі, вогкими руками, перекривати вентиляційні отвори, якщо вони є на приладах.

Куріння в лабораторії заборонене.

Забороняється залишати без спостереження, ремонтувати і переносити включені в мережу електроприлади.

Забороняється підключати декілька споживачів електроенергії до однієї штепсельної розетки.

Забороняється заміна згорілих запобіжників «жучками». Необхідно застосовувати запобіжники заводського виготовлення, що калібруються.

Забороняється захаращувати підступи до електричних пристроїв (шафам, автоматичним вимикачам, розеткам), а також відчиняти їх.

При раптовому припиненні подачі електроенергії всі вимикачі і рубильники мають бути негайно вимкнені.

Не допускається залишати неізольованими оголені проводи, перевантажувати електромережу, користуватися розбитими вилками, розетками і вимикачами.

Електроприлади мають бути розташовані на відстані не менше 1 м від нагрівальних приладів і не повинні піддаватися дії прямих сонячних променів.

Робоче місце утримувати в сухому і чистому стані, не допускати запиленості електроприладів, вимірювальних приладів, стендів.

Забороняється виконувати очистку від пилу і бруду включених в мережу 220V електроприладів, вимірювальних приладів, стендів.

При виявленні несправностей електроприладів, вимірювальних приладів, стендів, за відсутності їх заземлення, а також при появі іскріння або характерного запаху перегрітої ізоляції, негайно знеструмити їх. Повідомити про це науковому керівникові лабораторії або його заступникові.

Приступати до роботи дозволяється тільки після усунення помічених несправностей електроприладів, вимірювальних приладів і стендів.

При проведенні профілактичних і ремонтних робіт дозволяється використовувати ізопропиловий або етиловий спирт.

Дозволяється зберігати запас легкозаймистих рідин, що не перевищує 0,5 літра. Зберігання запасу дозволяється в тарі, що не згоряє, зі щільно закритою кришкою.

Забороняється виконувати ремонтні роботи, пов'язані з обслуговуванням преса, без відключення системи живлення. Обов'язковою є присутність другої особи, яка наглядає за безпекою виробництва робіт, в разі навчання і (або) налагодження з використанням переносного дистанційного пульта управління.

Оброблені та необроблені деталі повинні складатися тільки на відведених для цієї мети місцях так, щоб вони не захаращували робочого місця.

Для дрібних деталей, заготовок і відходів повинна бути передбачена спеціальна тара.

Для зберігання інструменту, невеликих, часто використовуваних пристроїв і оснащення, робочі місця повинні бути обладнані шафами, стелажми тощо.

Для екстреної зупинки обладнання повинно оснащуватися кнопками «Стоп» червоного кольору з грибоподібним штовхачем, що знаходяться в легкодоступних місцях, в зоні постійних робочих приміщеннях поруч з небезпечними вузлами, що часто обслуговуються.

5.4 Вимоги охорони праці після закінчення роботи

Після закінчення роботи вимкнути електроприлади, вимірювальні прилади, стенди.

Вимкнути всі автоматичні вимикачі, відключити використовувані подовжувачі мережі 220 V.

Привести до ладу робоче місце, прибравши пил, що з'явився, і сміття. Інструменти, пристосування та мастильні матеріали прибрати у відведене для них місце. Ганчір'я і займисті матеріали, щоб уникнути самозаймання, прибрати в металеві ящики з щільними кришками.

Зняти спецодяг, прибрати його в шафу, вимити руки та обличчя з милом.

При виході з приміщення лабораторії необхідно вимкнути всі споживачі електроенергії.

При виявлених під час роботи і після закінчення роботи несправностях і неполадках електроприладів повідомити наукового керівника лабораторії або його заступника.

5.5 Вимоги охорони праці в аварійних ситуаціях

При ліквідації аварійної ситуації необхідно діяти відповідно до плану ліквідації аварій [37].

При роботі з електроприладами і вимірювальними приладами в лабораторії можливі наступні аварійні ситуації:

- загоряння горючих матеріалів;
- ураження електричним струмом.

Джерелами спалаху в лабораторії можуть бути вузли приладів, пристроїв електроживлення, де в наслідок різних порушень перегріваються електронні компоненти схем, проводи, утворюються електричні іскри і дуги, здатні спричинити загоряння горючих матеріалів.

Співробітники і викладачі, що користуються електроприладами в лабораторії, зобов'язані знати розташування засобів пожежогасіння і уміти ними користуватися.

При пожежі [37, 38]:

- негайно знеструмити всі електроприлади загальним автоматичним вимикачем;
- негайно евакуювати в безпечне місце людей що були ушкоджені;
- повідомити за телефоном 101 в пожежну команду;
- видалити в безпечне місце неушкоджені електроприлади;
- приступити до гасіння пожежі первинними засобами пожежогасіння;
- повідомити керівництво університету про те, що сталося;
- електроприлади гасити вуглекислотними вогнегасниками, порошковими вогнегасниками або сухим піском;
- гасити електроприлади і дроти водою забороняється.

В разі ураження електричним струмом слід негайно знеструмити електроприлади і викликати швидку допомогу по телефону 103. Співробітники, що працюють в лабораторії, зобов'язані знати заходи надання першої допомоги людині, яка була ушкоджена при ураженні електричним струмом і уміти надати її при необхідності.

Негайно повідомити про нещасний випадок керівництво лабораторії, декана факультету.

ВИСНОВКИ

1. Досліджено вплив модифікаторів *CiimMiu-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 *CiimMiu-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.
3. 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.: Metallurgia, 1984. – 415с.
5. Раскатов А.Л. Специальные фрикционные и антифрикционные чугуны / А.Л. Раскатов, И.П. Расторгуев. – К.: Наук. думка, 1989. – 301с.
6. 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. Metallovedenie iznosostoykikh chugunov / Ползунов В.В., Вягилев К.М., Меркулов Е.И. – М.: Metallurgia, 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.: Metallurgia, 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., Мординова 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.: Metallurgy, 1988. – 241с.
16. Пархоменко В.Н. Легирование и микролегирование износостойких чугунов / В.Н. Пархоменко, Л.М. Дронов. – М.: Metallurgy, 1990. – 282с.
17. Котельников С.П. Микролегированные чугуны / С.П. Котельников, В.В. Маслов. – М.: Metallurgy, 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.: Изд-во 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.