

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерії та енергетики**

**Кафедра машиновикористання та сервісу технологічних систем**

**Кваліфікаційна робота**

**на правах рукопису**

**ШИХАНЦОВ МИКОЛА ВІКТОРОВИЧ**

**УДК 631.3**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських  
машин виготовлених з залізовуглецевих сплавів, які піддаються  
абразивному зношуванню**

**208 “Агроінженерія”**

**Подається на здобуття освітнього ступеня магістр**

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело \_\_\_\_\_ М.В. Шиханцов

**Керівник роботи**

**Міненко С.В.**

**кандидат технічних наук**

**Житомир – 2020**

## АНОТАЦІЯ

**Шиханцов Микола Вікторович.** Підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських машин виготовлених з залізовуглецевих сплавів, які піддаються абразивному зношуванню. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

В результаті аналізу експериментальних даних встановлено, що для кожного структурного стану металевої основи залізовуглецевих сплавів існує певна залежність зносостійкості від твердості.

Для сплавів з феритною основою (відпалений стан) зносостійкість збільшується при збільшенні твердості за рахунок підвищення вмісту карбідної фази, однак інтенсивність збільшення зносостійкості непостійна. В області малих кількостей карбідів (сталі) зносостійкість з підвищенням твердості збільшується досить інтенсивно. Тому зносостійкість чавунів навіть при заевтектичному вмісті вуглецю незначна і набагато нижче зносостійкості, яку можна отримати за рахунок мартенситу.

Зносостійкість сталей зі структурою мартенситу також залежить від твердості. У свою чергу, твердість мартенситу визначається вмістом в ньому вуглецю. Чим більше вуглецю містить мартенсит, тим вище твердість і зносостійкість, причому інтенсивність збільшення зносостійкості з ростом твердості збільшується. Максимальну зносостійкість для мартенситної структури володіє сталь У8 після гартування без відпустки. Визначені закономірності абразивного зношування залізовуглецевих сплавів в стандартних умовах випробувань без нагріву показали, що зносостійкість зразків зі структурою аустеніту значно вище, ніж зносостійкість зразків, в структурі яких міститься максимальна кількість мартенситу.

*Ключові слова: абразивне зношування, сталь, чавун, зносостійкість, аустеніт, мартенсит.*

## ANNOTATION

**Shikhantsov Mikola Viktorovich. Adjustment of wear-and-tear of parts of agricultural machinery manufactured from gold-carbon alloys, which are suitable for abrasive wear.** – *The quality of the robot as a manuscript.*

The quality of the robot for the purpose of the master's degree for specialties 208 – Agroengineering. – Polisky National University, Zhytomyr, 2020.

As a result of the analysis of the experimental data, it was established that for the skin structural frame of the metal base of gold-carbon alloys, there is a significant amount of wear and tear in terms of hardness.

For alloys with a ferite base (modified mill), the wear resistance increases with an increase in hardness for the increase in hardness instead of the carbide phase, however, the intensity of the increase in wear resistance In the area of small quantities of carbide (steel) wear resistance due to the increase in hardness increases intensively. Therefore, the wear-resistance of chavuns is insignificant with a hypereutical mixture in coal and is lower than the wear-resistance, as it can be recognized as martensite.

The wear resistance of steels due to the structure of martensite can also be found in terms of hardness. At its own heart, the hardness of martensite begins to appear together in a new coal. What is more in coal to take revenge on martensite, more hardness and wear resistance, moreover, the intensity of wear and tear increases with the growth of hardness increases. The maximum wear resistance for the martensitic structure of the U8 steel is written without a vent. On the basis of the regularities of abrasive wear of gallic carbon alloys in standard sinks without heat, it was shown that the wear resistance of the samples due to the structure of the austenitic structure is significant, the lower the wear resistance of the diffuseness, the structure of the structures

*Key words: abrasive wear, steel, chavun, wear resistance, austenite, martensite.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СКЛАДУ, СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕЙ І СПЛАВІВ НА ЇХ ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПРИ АБРАЗИВНОМУ ЗНОШУВАННІ.....	8
РОЗДІЛ 2.. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	16
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	22
ВИСНОВКИ.....	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	37

## ВСТУП

Сплави на основі заліза є основним матеріалом деталей сільськогосподарських машин, що піддаються абразивному зношуванню під час їх експлуатації.

Вивчення стійкості до абразивного зношування залізовуглецевих сплавів виконують вже близько ста років. Проте, до теперішнього часу не запропоновано експериментально обґрунтований науковий підхід до рекомендацій оп вибору структури, яка забезпечить суттєве підвищення зносостійкості. У іноземних дослідженнях відсутні системні результати про зносостійкість сталей та чавунів сплавів в залежності від хімічного складу і способів термічної обробки. Результати досліджень, представлені в літературі країн СНД і колишнього СРСР, вносять істотно більший внесок в базу інформації про зносостійкості залізовуглецевих сплавів, проте не можуть бути узагальнені, так як отримані для різних умов тертя. У зв'язку з цим проблема створення сплавів оптимального складу, що дозволять підвищити зносостійкість деталей сільськогосподарських машин в умовах абразивного зношування, є однією з актуальних проблем сільськогосподарського машинобудування та агроінженерії.

**Мета і задачі дослідження.** Метою магістерської роботи є розробка матеріалознавчих основ підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських машин виготовлених із залізовуглецевих сплавів при абразивному зношуванні.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- дослідити вплив складу, структури і властивостей сталей і сплавів на їх зносостійкість при абразивному зношуванні;
- розробити методику визначення відносної стійкості до абразивного зношування залізовуглецевих сплавів;
- провести експериментальні дослідження, проаналізувати результати та зробити висновки.

**Об'єкт дослідження:** процес абразивного зношування деталей сільськогосподарських машин.

**Предмет дослідження:** вплив хімічного складу, способів термічної обробки, структури і фізико-механічних характеристик сталей та чавунів на їх стійкість до абразивного зношування.

**Методи дослідження.** Дослідження виконано з використанням загальнонаукових методів пізнання, методів триботехніки, прикладної фізики, трибофізики та механіки. Обробку експериментальних даних виконували за допомогою прикладних комп'ютерних програм.

**Перелік публікацій за темою роботи:**

1. **Шиханцов М. В.** Проблема абразивного изнашивания сталей и сплавов. Збірник тез V-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»*. 28-29 березня 2019 року м. Житомир. ЖАТК. С. 300.

2. **Шиханцов М. В.** Дослідження впливу складу, структури і властивостей сталей і сплавів на їх зносостійкість при абразивному зношуванні. Збірник тез VI-ї всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 9-10 квітня 2020 року. Житомир : ЖАТК. С. 215-216.

3. Грабар І. Г., Зембицький В. В., Сичевський В. М., Швагро М. В., Курис І. М., **Шиханцов М. В.** Рідинно-абразивне зношування деталей сільськогосподарських машин. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції (Мелітополь, 02-27 листопада 2020 р.)*. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 122-124.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати роботи можуть бути впровадженні в умовах машинобудівних підприємств та ремонтних майстернях сільськогосподарських підприємствах України.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 21 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 38 сторінок комп'ютерного тексту, містить 4 таблиці і 9 рисунків.

## РОЗДІЛ 1

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СКЛАДУ, СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕЙ І СПЛАВІВ НА ЇХ ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПРИ АБРАЗИВНОМУ ЗНОШУВАННІ

Сплави на основі заліза – основний матеріал деталей машин, які в процесі експлуатації піддаються абразивного зношування. Тому об'єктом дослідження більшості робіт, присвячених вивченню зносостійкості, є залізобуглецевих сплави – сталі і чавуни. Випробування чистих металів проводять тільки з метою визначення загальної картини зносостійкості металевих матеріалів.

Невід'ємною і очевидною частиною процесу руйнування поверхні тертя при абразивному зношуванні є проникнення в неї твердої частинки. Глибина проникнення в великій мірі визначається твердістю матеріалу, тому спроби пов'язати твердість матеріалу і його зносостійкість цілком природні. У багатьох роботах встановлена пряма або близька до неї залежність зносостійкості металів і сплавів від їх твердості [1-14].

Однак в інших роботах відзначають, що сама по собі твердість не може однозначно характеризувати зносостійкість [3]. Зв'язок твердості і зносостійкості має місце лише при підвищенні твердості за рахунок певних чинників: підвищення вмісту карбідної фази, термічної або хіміко-термічної обробки, легування, збільшення сил міжатомних зв'язку в кристалічній решітці.

Відзначається, що залежність зносостійкості від твердості спостерігається тільки в межах окремо взятих сплавів або будь-якого типу структури [1, 2]. При одній і тій же твердості сплави з більшою міцністю володіють більшою зносостійкістю [3]. Твердість впливає на зносостійкість, але в поєднанні з іншими факторами [8]. Оскільки процес абразивного зношування сталей і сплавів в багатьох випадках супроводжує фрикційний або об'ємний нагріванням, їх зносостійкість в першу чергу залежить від твердості при температурі експлуатації [10]. Разом з тим, зносостійкість не завжди може



визначатися твердістю [1, 2], оскільки при одній твердості спостерігається різна зносостійкість [1, 6].

Настільки велика різниця в думках щодо впливу твердості на зносостійкість сталей і сплавів призводить до висновку, що однозначної залежності зносостійкості від твердості не існує [1-13]. Деякі дослідники взагалі заперечують зв'язок між твердістю і зносостійкість матеріалів.

Значення твердості визначає здатність матеріалу чинити опір нормальними напруженням. Однак при абразивному зношуванні виникають і дотичні напруження, опір яким більшою мірою характеризується пластичними властивостями металу. При одній і тій же твердості різні матеріали можуть володіти різними пластичними властивостями і відповідно, різною зносостійкістю [12].

Оскільки процес абразивного зношування складається з двох стадій - проникнення частки в поверхню і переміщення – зносостійкість повинна залежати від тих властивостей матеріалу, які контролюють ці дві стадії [8]. Безліч елементарних процесів пластичних і пружних деформацій поверхні тертя матеріалу, які складають основу механізму абразивного зношування, дозволяє очікувати, що зносостійкість сталей і сплавів залежить від їх механічних властивостей [1].

Результати досліджень залежності зносостійкості залізобуглецевих сплавів при абразивному зношуванні від їх механічних властивостей виявляються у великій кількості публікацій. Автори пов'язують зносостійкість з різними характеристиками: межею міцності [7, 13, 15], межею плинності [15], ударною в'язкістю [8, 14, 15], в'язкістю руйнування [15], модулем пружності [6, 7-9] , а також комплексом механічних властивостей [1-13]. Однак єдиний висновок, який можна зробити на підставі наведених результатів, полягає в тому, що між механічними властивостями і зносостійкістю не існує однозначної залежності [14].

Більш того, відсутність залежності зносостійкості залізовуглецевих сплавів тільки від механічних властивостей можна пояснити, тим що при зміні складу сплаву його механічні властивості змінюються не однозначно. У той же час, більш виражена залежність зносостійкості від складу сплавів, як правило, має місце в деяких випадках.

Наприклад, великий вплив на зносостійкість здійснює вміст вуглецю в сплаві. За даними [2, 9] підвищення твердості сталей за рахунок вмісту вуглецю збільшує зносостійкість в більшій мірі, ніж підвищення твердості за рахунок термічної обробки. До того ж, збільшення зносостійкості загартованої сталі спостерігається тільки до евтектоїдного вмісту вуглецю [12, 16-17].

Другим резервом збільшення зносостійкості залізовуглецевих сплавів є легування [17, 18]. З іншого боку, легування не завжди збільшує зносостійкість [14]. Наприклад, комплексне легування малими добавками не призводить до збільшення зносостійкості матеріалу деталей землерийних і дорожніх машин [8].

Суперечливі дані про вплив легування можна пояснити тим, що при дослідженні залежності зносостійкості залізовуглецевих сплавів від їх складу необхідно враховувати ті зміни в структурі, які пов'язані з введенням легуючих елементів [13-15]. Структурний стан сплавів тим більше необхідно враховувати, що ніякі зміни зносостійкості не відбуваються без зміни мікроструктури [11, 15, 16, 17].

Багато дослідників вважають, що з усіх структур найбільшою зносостійкістю володіє мартенсит. Тому для досягнення високої зносостійкості залізовуглецевих сплави необхідно піддавати загартуванню на максимальну твердість [2, 16]. Відпустка загартованих сплавів знижує твердість мартенситу і призводить до структурних змін, тому зносостійкість сплавів після гартування закономірно знижується при збільшенні температури відпустку, тобто при зміні структури від мартенситу до трооститу, сорбіту та перліту [11].

Значне підвищення твердості залізовуглецевих сплавів в результаті загартування відбувається за рахунок спотворень кристалічної решітки. Однак наслідком цих спотворень є і ослаблення міжатомних сил зв'язку [12]. Тому сплави з мартенситною структурою відрізняються підвищеною крихкістю, що призводить до руйнування деталей, схильних до ударів в процесі експлуатації [13]. Таким чином, підвищена крихкість істотно обмежує сферу застосування сплавів зі структурою мартенситу.

Альтернативою мартенситу в зносостійких залізовуглецевих сплавах можуть бути тільки бейніт і аустеніт, оскільки твердість і зносостійкість фериту знаходяться на мінімальному рівні.

Структуру бейніту можна отримати в результаті ізотермічного загартування. Причому, підвищеною твердістю відрізняється нижній бейніт, який може бути отриманий при відносно низькій температурі витримки, яка лише трохи перевищує температуру початку мартенситного перетворення для даного сплаву. Недоліком такої термообробки є дуже великий час витримки, порядку 10<sup>3</sup> с і більше. У той же час зносостійкість бейніта нижче, ніж мартенситу [14, 15], тому використовувати сплави зі структурою бейніту в умовах абразивного зношування навряд чи доцільно.

Зносостійкість залізовуглецевих сплавів може бути підвищена за рахунок використання аустенітної основи [3]. У той же час, за даними [13, 15] аустеніт має низьку зносостійкість при абразивному зношуванні.

Розбіжність дослідників на думці про вплив аустеніту на зносостійкість залізовуглецевих сплавів при абразивному зношуванні можна пояснити різними причинами.

Структуру аустеніту можна отримати в дуже широкому діапазоні вмісту легуючих елементів і вуглецю. Зміст вуглецю в аустеніт може досягати 2,14%. Цілком ймовірно, що при різному вмісті вуглецю може бути отримана і різна зносостійкість аустенітних сплавів.

При термічній обробці можна отримати аустеніт різної стабільності, в залежності від сумарного вмісту вуглецю та інших легуючих елементів в аустеніті перед загартуванням. Зміна стабільності аустеніту також може призводити до зміни зносостійкості. Тут необхідно зазначити роботи Л. С. Малінова з колегами, присвячені всебічному дослідженню метастабільного аустеніту. Показано, що в багатьох випадках абразивного зношування сплави з метастабільним аустенітом мають високу зносостійкість [12].

Нарешті, зносостійкість сплавів зі структурою аустеніту значно залежить від умов зношування. Наприклад, при ударно-абразивному зношуванні білих чавунів підвищення вмісту аустеніту в структурі збільшує зносостійкість при низькій енергії удару. Однак при високій енергії удару вплив аустеніту на зносостійкість негативно [11].

Таким чином, сплави зі структурою аустеніту в деяких випадках можуть бути з успіхом використані в якості зносостійких матеріалів. Однак до теперішнього часу немає даних, що дозволяють визначити раціональний склад аустенітних сплавів на основі заліза для умов абразивного зношування.

Значний резерв підвищення терміну служби деталей машин полягає в використанні карбідної фази для збільшення твердості і зносостійкості залізовуглецевих сплавів. Дослідженню впливу карбідів і їх характеристик на зносостійкість сплавів присвячено більш, ніж значна кількість публікацій [3, 7-9]. У більшості робіт відзначено, що збільшення вмісту карбідної фази в сплавах збільшує зносостійкість. При цьому відмінність властивостей карбідів в сплавах різного складу не впливає на зносостійкість, оскільки твердість карбідів значно вище твердості основи.

В інших роботах вказується, що за рахунок простого збільшення вмісту карбідної фази без зміни природи карбідів можливо лише незначне збільшення зносостійкості [11, 20]. Для ефективного збільшення зносостійкості має значення в'язкість карбідів і їх форма [10].

Відзначається, що карбіди у вигляді ледебуритної сітки (евтектичних карбідів) сприяють значному збільшенню зносостійкості чавунів [92].

При високому тиску абразивного середовища – близько 100 МПа – зносостійкість деталей, що мають грубу сітку карбідів по межах зерен, знаходиться на низькому рівні [11].

При однаковій кількості карбідної фази в сплаві збільшення її дисперсності призводить до зростання твердості і зносостійкості [12, 13].

З приводу впливу карбідної фази на зносостійкість сплавів з мартенситною основою єдиної думки немає. Є дані як про збільшення [13], так і про зниження [16] зносостійкості мартенситних сплавів при збільшенні вмісту цементиту.

В роботі [3] показано, що зносостійкість цементиту в великій мірі залежить від тиску на поверхню тертя. Дослідження проводили на зразках однофазного цементиту і залізо-цементитного композиту в широкому діапазоні вмісту цементиту. Встановлено, що однофазний цементит має високу зносостійкість при тисках нижче, ніж 0,15 МПа. Однак при тисках понад 0,31 МПа зразки з об'ємним вмістом цементиту, що перевищує 75%, інтенсивно зношувалися в зв'язку з крихким руйнуванням карбідних частинок.

Істотного збільшення зносостійкості сплавів можна досягти за рахунок спеціальних карбідів [18, 20], значна кількість яких утворюється в високовуглецевих сплавах, легованих більш, ніж 10% хрому. Ще більше збільшення зносостійкості може бути досягнуто при використанні анізотропії цих карбідів [14, 15].

За деякими даними збільшення зносостійкості сплавів можна підвищити при виділенні дрібнодисперсних карбідів при вторинній кристалізації [13]. Однак при випаданні карбідів в сталі Гадфільда зносостійкість не збільшується, незважаючи на збільшення твердості [2].

При абразивному зношуванні в поєднанні з ударними навантаженнями велике значення має форма карбідів і структура металевої основи. У цих

умовах гарну зносостійкість мають аустеніто-мартенситні сплави з включеннями карбідів середньої величини. Тут карбіди забезпечують досить високу зносостійкість, а металева основа запобігає їх викришування при ударах [19].

У роботах [3, 8] також вказується, що при абразивному зношуванні карбідних сплавів велике значення мають властивості металевої основи. При низькій зносостійкості основи карбіди не можуть в повній мірі протистояти руйнуванню поверхні, оскільки знос основи навколо карбідів веде до їх викришування.

Таким чином, аналіз різних факторів, від яких залежить зносостійкість залізобуглецевих сплавів при абразивному зношуванні, показує, що всі три компоненти сплаву (склад, структура, властивості) вносять вклад в рівень їх опору зношуванню. Кожен з цих чинників в свою чергу залежить від багатьох змінних, що і пояснює настільки великий діапазон можливих значень зносостійкості сплавів на основі заліза, а також настільки невелику кількість результатів досліджень, які мають значну наукову і практичну цінність.

### **Висновки по розділу 1.**

Максимальний рівень зносостійкості, якого можна досягти при використанні залізобуглецевих сплавів, що істотно залежить від співвідношення твердості абразиву і поверхні тертя.

Підвищення стійкості до абразивного зношування можна досягнути за рахунок вибору оптимального типу металевої основи в поєднанні з карбідною фазою високої твердості. Цей підхід, ймовірно, є найбільш продуктивним при створенні зносостійких сплавів на основі заліза. Спроби значно підвищити зносостійкість за рахунок використання аморфного стану металів, анізотропії структури або штучно створених білих шарів не призводять до бажаного результату.

Оптимізація структурного стану залізовуглецевих сплавів дозволяє іноді скористатися ефектом природного зміцнення поверхні тертя при абразивному зношуванні

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Однією з основних завдань, які необхідно вирішити для досягнення мети роботи, є визначення залежностей зносостійкості залізобуглецевих сплавів від їх складу і структури. Складність визначення цих залежностей полягає у виборі методу визначення зносостійкості, який повинна дозволяти відтворювати абразивне зношування в «чистому» вигляді при виключенні можливо більшого числа незначущих факторів. Крім того, результати випробувань повинні бути легкі для сприйняття і мати можливість порівняти їх з уже відомими даними різних авторів.

У вітчизняній і зарубіжній дослідницькій практиці використовують стандартні методи проведення випробувань – ДСТУ, ГОСТи або міжнародні стандарти, стандарти різних країн і професійних товариств (ISO, DIN, ASTM і т.д.), не дивлячись на те, що застосування стандартних методик не є обов'язковим при проведенні дослідницьких робіт. Використання стандартних методів випробувань значно підвищує цінність отриманих результатів і висновків, зроблених на підставі аналізу експериментальних даних.

У зв'язку з цим для проведення випробувань залізобуглецевих сплавів необхідно було використовувати будь-якої зі стандартних методів визначення зносостійкості металевих матеріалів при абразивному зношуванні.

З часів СРСР існують два стандарти на проведення випробувань металевих матеріалів на абразивне зношування. Обидва стандарти в даний час діють в Україні.

ГОСТ 23.208-79 регламентує випробування на зношування незакріпленим абразивом. Установка для проведення цих випробувань аналогічна машині Бринелля-Хаворті. Аналогом даного стандарту є американський стандарт ASTM G65. Суть методу полягає в зношуванні плоского зразка притиснутим до



нього гумовим колесом. При цьому вільний абразив певного гранулометричного складу подається між зразком і колесом.

Інтенсивність руйнування матеріалу при такому режимі випробувань не є максимальною, тому що більшість абразивних частинок лише пластично деформують поверхню. Видалення мікрооб'ємів відбувається тільки після багаторазової взаємодії ділянки поверхні з абразивними зернами. Крім того, існує ймовірність шаржування зразків малої твердості, що взагалі виключає можливість проведення випробувань.

ГОСТ 17367-71 регламентує випробування металевих матеріалів на зношування закріпленим абразивом. Аналогом цього стандарту є американський стандарт ASTM G132. Суть методу полягає в стиранні циліндричного зразка про абразивний полотно. Зразок з певним зусиллям притискається торцем до абразивної поверхні і рухається щодо неї. Зразок проходить строго постійний шлях, а про інтенсивність зношування матеріалу зразка судять по зміні його маси або лінійних розмірів.

При одноцикловому зношуванні, напруження в контактах твердих частинок з матеріалом поверхні перевищують межу міцності матеріалу, мікрооб'єми якого видаляються при одноразовій взаємодії з абразивними зернами або переходячи в перед руйнівний стан, можуть бути легко відділені при наступному контакті з абразивом. У зв'язку з цим для цілей цієї роботи найбільш прийнятною випробувальною методикою слід вважати ГОСТ 17367-71.

В основу ГОСТ 17367-71 покладений розроблений М.М.Хрущовим і М.А.Бабічевим метод випробувань на машині Х4-Б, який полягає в наступному.

Циліндричний зразок 2 випробуваного матеріалу діаметром 2 мм (рис. 2.1) третью торцем про абразивній поверхні (абразивне полотно). Полотно закріплено на металевому диску 1 з вертикальною віссю обертання. Зразок за допомогою цангового затиску закріплений в державці 3, суміщеної з вантажем певної маси 4. Маса державки з вантажем становить 300 г, що забезпечує

задане постійне нормальне навантаження на зразок протягом всього часу випробувань.

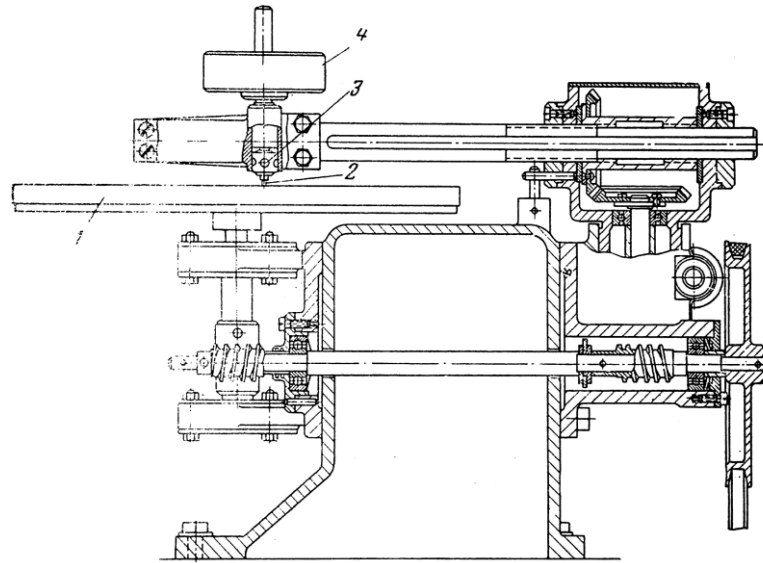


Рис. 2.1. Схема машини Х4-Б [7]: 1 – диск; 2 – зразок; 3 – державка; 4 – вантаж.

Вертикальне положення державки зі зразком забезпечується спеціальним кронштейном з отвором, при цьому посадка державки в отворі кронштейна виконується з мінімальним зазором. Це дозволяє державці вільно переміщатися щодо кронштейна при зношуванні зразка, завдяки чому зберігається постійне навантаження на зразок в процесі випробування. У той же час, зазор досить малий, щоб підтримувати вісь державки і зразка в вертикальному положенні.

Кронштейн з'єднаний з приводом машини таким чином, що робить радіальне переміщення на 1 мм на кожен оборот диска. Тому траєкторія руху зразка по абразивній поверхні являє собою спіраль Архімеда.

Радіальне переміщення зразка забезпечує постійне тертя по свіжій поверхні абразиву, незважаючи на те, що при діаметрі зразка 2 мм зміщення відбувається тільки на 1 мм. При розробці методу випробувань на машині Х4-Б показано [2], що одноразове проходження зразка по абразивній поверхні практично не змінює її властивості. У той же час подача на 1 мм замість 2 мм дозволяє вдвічі збільшити довжину шляху тертя, доступну для випробування на одному аркуші абразивного полотна.

Зовнішній вигляд машини Х4-Б, яка використовувалась при проведенні наших досліджень, показаний на рис. 2.2.

Теоретично при постійних умовах тертя знос зразка є постійним на шляху тертя певної довжини. При дійсно постійних умовах тертя це дозволило б визначати залежність абсолютного зносу різних матеріалів від їх властивостей.

На практиці умови тертя ніколи не бувають постійними. Навіть при використанні сучасних технологій виробництва властивості абразивних полотен змінюються навіть в межах одного рулону. Тому з прийнятною похибкою визначити залежність абсолютного зносу матеріалу від його властивостей практично неможливо.

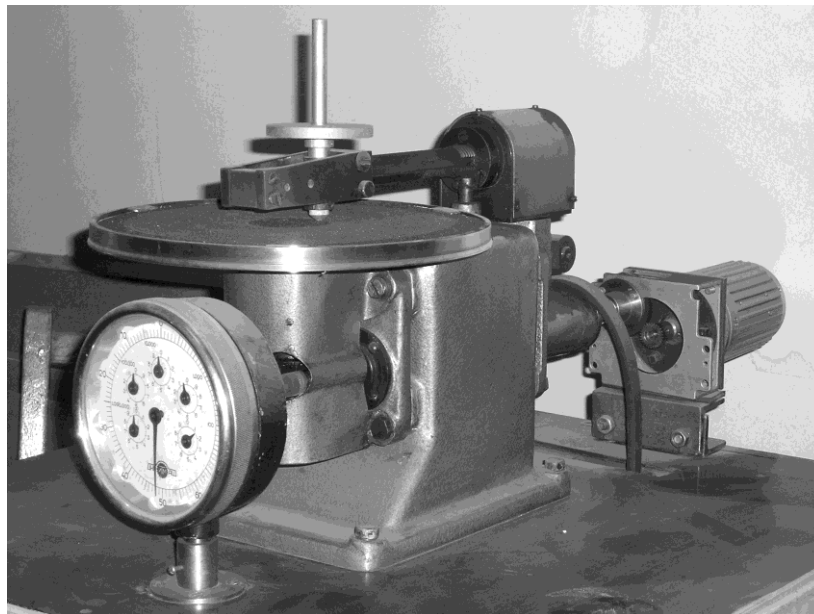


Рис. 2.2. Зовнішній вигляд машини Х4-Б

Для компенсації мінливості властивостей абразивного полотна за один випробувальний цикл крім зразка досліджуваного матеріалу (зразок) проводять випробування зразка еталонного матеріалу (еталон) на суміжній ділянці абразивної поверхні. При цьому шлях тертя зразка дорівнює шляху тертя зразка. В якості еталонного матеріалу приймають матеріал з постійними властивостями для того, щоб коливання зносу еталона на постійному шляху тертя відображали коливання властивостей абразивного полотна.

Ставлення зносу зразка до зносу еталона є відносним зносом матеріалу. Відносний знос матеріалу залежить тільки від його властивостей, оскільки коливання зношувальної здатності абразивного полотна компенсуються за допомогою еталона.

Як правило, в якості еталону використовують м'які матеріали (метали або відпалені сталі), властивості яких найбільш постійні за об'ємом. Однак знос таких еталонів істотно більше зносу випробуваних матеріалів (загартовані сталі, чавуни і т.д.). Тому величина відносного зносу матеріалів майже завжди менше одиниці, що незручно для сприйняття. Дійсно, чим краще матеріал з точки зору терміну його служби, тим менше величина його відносного зносу.

Щоб уникнути представлення результатів випробувань числами менше одиниці використовують відносну зносостійкість, яка є величиною, зворотною відносного зносу. Таким чином, відносна зносостійкість матеріалу розраховується як відношення зносу еталона до зносу зразка. Ця величина також не залежить від коливання зношувальної здатності абразивного полотна.

Відносну зносостійкість еталонного матеріалу приймають за одиницю, тому величини відносної зносостійкості випробовуваних матеріалів майже завжди більше одиниці. Вираз здатності матеріалу чинити опір абразивного зношування за допомогою відносної зносостійкості повністю відповідає суті дослідження. Чим вище число відносної зносостійкості, тим більш стійкий матеріал в умовах впливу абразиву.

Малий діаметр зразка (2 мм) дозволяє усунути шаржування поверхні тертя м'яких металів абразивними частинками і засмічення продуктами зносу проміжку між зразком і абразивом. В результаті з'являється можливість проводити дослідження безперервного ряду залізовуглецевих сплавів, від м'якого заліза і низьковуглецевих конструкційних сталей до твердих загартованих сталей і чавунів. Цією можливістю немає при використанні інших методик, які не дозволяють проводити випробування м'яких металів в зв'язку з їх шаржування абразивними зернами.

Визначення кількості аустеніту і мартенситу проводили за методом, заснованому на вимірюванні інтегральної інтенсивності перших близько розташованих дифракційних ліній: 111 аустеніту і 110 мартенситу. Для контролю даних знімали лінії 222 мартенситу, а також лінії 331 і 420 аустеніту.

Відомо, що інтегральна інтенсивність  $I$  дифракційної лінії обумовлена наступним співвідношенням

$$I = I' \cdot V, \quad (2.1)$$

де  $I'$  – інтенсивність променів, розсіяних від одиниці об'єму даної фази;  
 $V$  – об'ємний вміст фази в зразку.

Величина  $I'$  визначається цілою низкою чинників і розраховується за формулою:

$$I' = I_0 \cdot k \cdot |\bar{S}| \cdot f(\theta) \cdot A(\theta\mu) \cdot e^{-2M} \cdot P_{hkl} \cdot N^2,$$

Для проведення досліджень абразивного зношування залізовуглецевих сплавів виготовлені зразки складів системи Fe-C в максимально можливому діапазоні вмісту вуглецю при варіації всіх типів структурного стану металевої основи.

### РОЗДІЛ 3

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Усунення нагріву поверхні тертя зразків (машина Х4-Б) дозволило провести стандартні випробування залізовуглецевих сплавів на зношування закріпленим абразивом.

У міру збільшення вмісту вуглецю в структурі з'являється цементит в тому чи іншому вигляді – в складі перліту, вторинний цементит, первинний цементит. Для отримання ферокарбідної структури при мінімальній твердості зразки піддавали відпалу.

Мікроструктура сплавів при вмісті вуглецю до 1,2% (доевтектоїдні і заевтектоїдні сталі) відповідає стандартним вуглецевим сталям. Мікроструктура сплавів з вмістом вуглецю 2,05%, 3,30% і 4,30% показана на рис. 3.1, 3.2 і 3.3 відповідно.

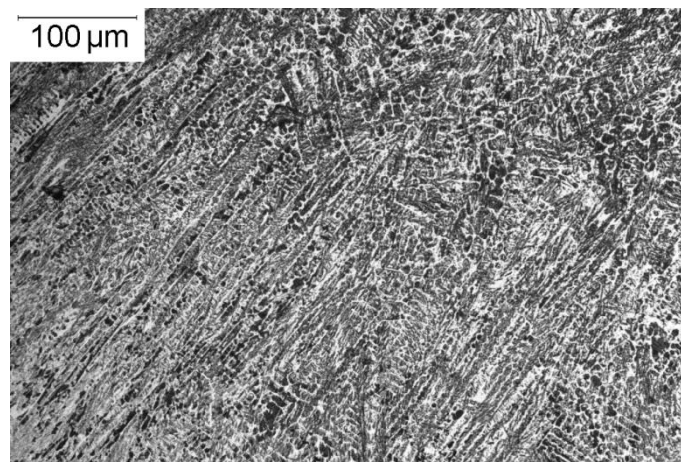


Рис. 3.1. Мікроструктура сплаву з вмістом вуглецю 2,05%. Лиття в кварцову трубку. Збільшення при зйомці  $\times 200$

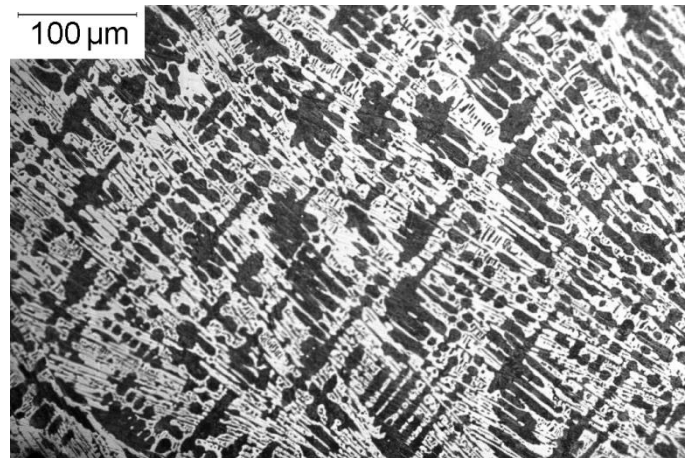
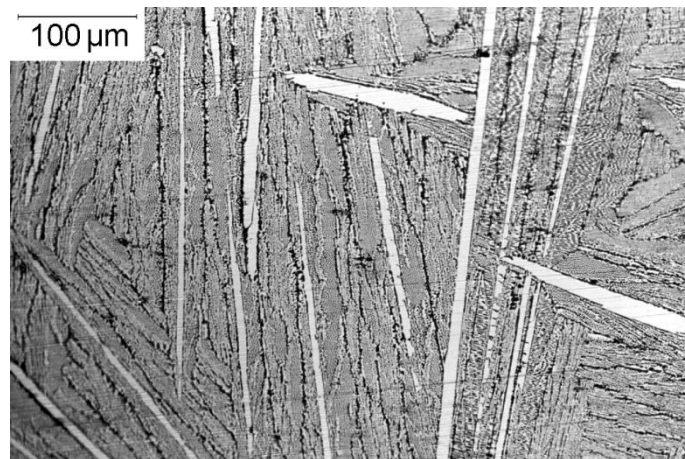
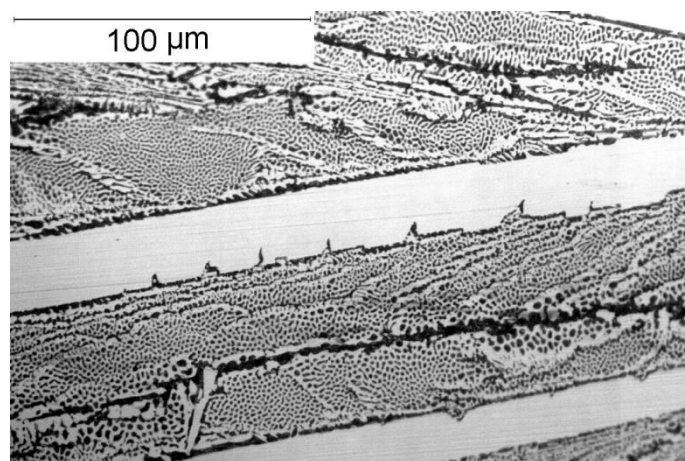


Рис. 3.2. Мікроструктура сплаву з вмістом вуглецю 3,30%. Лиття в кварцову трубку. Збільшення при зйомці  $\times 200$



а



б

Рис. 3.3. Мікроструктура сплаву з вмістом вуглецю 4,30%. Лиття в кварцову трубку: Збільшення при зйомці: а –  $\times 200$ ; б –  $\times 500$ .

Результати визначення твердості  $HV$  і відносної зносостійкості  $\varepsilon$  сплавів з феритною основою представлені в табл. 3.1. Для порівняння показані значення відносної зносостійкості  $\varepsilon'$  тих же матеріалів, отримані при випробуваннях на машині Х4-Б до усунення фрикційного нагрівання.

Для визначення зносостійкості мартенситу дві партії зразків сталей від Ст. 3 до У8 піддавалися загартуванню. Далі зразки однієї з партій були відпущені при різних температурах аж до 300 °С. Сукупність зразків першої та другої партій представляла ряд сталей зі структурою мартенситу з різним вмістом в ньому вуглецю.

Таблиця 3.1 – Результати визначення твердості  $HV$  і відносної зносостійкості  $\varepsilon$  сплавів з феритною основою. У порівнянні показані значення відносної зносостійкості  $\varepsilon'$  тих же матеріалів при випробуваннях на машині Х4-Б до усунення фрикційного нагрівання зразків.

Концентрація вуглецю, % мас	HV	Довірчий інтервал. Надійності висновку 0,96	$\varepsilon$	Довірчий інтервал. Надійності висновку 0,96	$\varepsilon'$
0,15	119	0,03	1,1	0,04	1,0
0,45	184	0,04	1,3	0,07	1,3
0,80	187	0,08	1,4	0,05	1,3
1,19	220	0,05	1,8	0,08	1,5
2,05	340	0,14	1,9	0,14	1,7
3,30	480	0,18	2,3	0,11	2,0
4,33	572	0,32	2,4	0,15	2,1

Результати випробувань сталей зі структурою мартенситу представлені в табл. 3.2. Для порівняння показані значення відносної зносостійкості тих же матеріалів, отримані при випробуваннях на машині Х4-Б до усунення фрикційного нагрівання.



Таблиця 3.2 – Результати визначення твердості  $HV$  і відносної зносостійкості  $\epsilon$  сталей зі структурою мартенситу. У порівнянні показані значення відносної зносостійкості  $\epsilon'$  тих же матеріалів при випробуваннях на машині Х4-Б до усунення фрикційного нагрівання зразків

Концентрація вуглецю, % мас	Термообробка	HV	Довірчий інтервал. Надійності висновку 0,96	$\epsilon$	Довірчий інтервал. Надійності висновку 0,96	$\epsilon'$
0,15	Загартування	420	6	1,7	0,05	1,5
	Загартування, відпуск 300 °С	398	5	1,5	0,05	1,3
0,44	Загартування	722	17	2,3	0,11	2,2
	Загартування, відпуск 250 °С	579	9	2,1	0,06	1,9
	Загартування, відпуск 300 °С	532	19	1,9	0,10	1,6
0,49	Загартування	761	11	2,4	0,09	2,3
	Загартування, відпуск 300 °С	570	15	2,0	0,10	1,8
0,83	Загартування	860	21	2,9	0,17	2,8
	Загартування, відпуск 150 °С	815	22	2,7	0,09	2,5
	Загартування, відпуск 300 °С	612	8	2,2	0,11	2,0

При збільшенні вмісту вуглецю в залізовуглецевих сплавах понад евтектоїдного вже неможливо отримати чисто мартенситну структуру після гартування. Чим більше вуглецю містить сталь (до 2,14% С) або чавун (більше 2,14% С), тим більше цементиту збережеться в структурі після гартування поряд з мартенситом. Це дає можливість досліджувати вплив надлишкової фази карбиду на зносостійкість залізовуглецевих сплавів з мартенситною основою.

Зразки заевтектоїдних сплавів з вмістом вуглецю від 0,8% до 4,3% гартували на максимальну твердість. При цьому отримано ряд структур з

основою мартенситу евтектоїдного складу і різною кількістю вторинного цементиту. Результати випробувань зразків з мартенситокарбідною структурою представлені в табл. 3.3. Для порівняння показані результати, отримані при випробуваннях тих же матеріалів на машині Х4-Б до усунення фрикційного нагрівання.

Таблиця 3.3 – Результати визначення твердості  $HV$  і відносної зносостійкості  $\varepsilon$  сплавів з мартенситокарбідною структурою. У порівнянні показані значення відносної зносостійкості  $\varepsilon'$  тих же матеріалів при випробуваннях на машині Х4-Б до усунення фрикційного нагрівання зразків

Концентрація вуглецю, % мас	HV	Довірчий інтервал. Надійності висновку 0,96	$\varepsilon$	Довірчий інтервал. Надійності висновку 0,96	$\varepsilon'$
1,22	875	8	3,1	0,17	2,8
2,05	888	23	3,0	0,21	2,8
3,30	966	25	3,0	0,15	2,8
4,33	986	38	3,0	0,18	2,8

Випробування показали, що збільшення кількості цементиту в мартенситній основі не збільшує зносостійкість сплавів. Такий результат на перший погляд є несподіваним, проте, цілком відповідає висновкам інших дослідників.

Таким чином, як результати наших досліджень, так і літературні дані свідчать про те, що зносостійкість залізобуглецевих сплавів зі структурою мартенситу не може бути збільшена за рахунок фази карбіду. Тому зносостійкість загартованої сталі У8 є гранично можливою при використанні мартенситної структури.

Незважаючи на те, що зносостійкість мартенситу значно вище зносостійкості фериту, у багатьох випадках абразивного зношування термін

служби деталей машин навіть в загартованому стані незадовільний. У зв'язку з цим особливий інтерес представляють дослідження зносостійкості аустенітної структури сплавів на основі заліза. Дослідження зносостійкості аустеніту в сплавах системи залізо-вуглець тим більше актуально, що думки різних авторів про зносостійкість аустеніту при абразивному зношуванні діаметрально протилежні.

Аустенітна основа в сплавах системи Fe-C може бути отримана в заевтектоїдних сталях і чавунах після гартування з однофазної  $\gamma$ -області. При цьому для отримання аустеніту без включень надлишкових карбідів або мартенситу необхідно забезпечити чітко визначений зміст вуглецю в сплаві.

Кількість аустеніту в сплаві після гартування визначається температурою початку мартенситного перетворення  $M_H$ . Чим нижче  $M_H$ , тим більше аустеніту міститься в структурі. При цьому сама  $M_H$  залежить від вмісту вуглецю в аустеніт перед загартуванням (рис. 3.4, а).

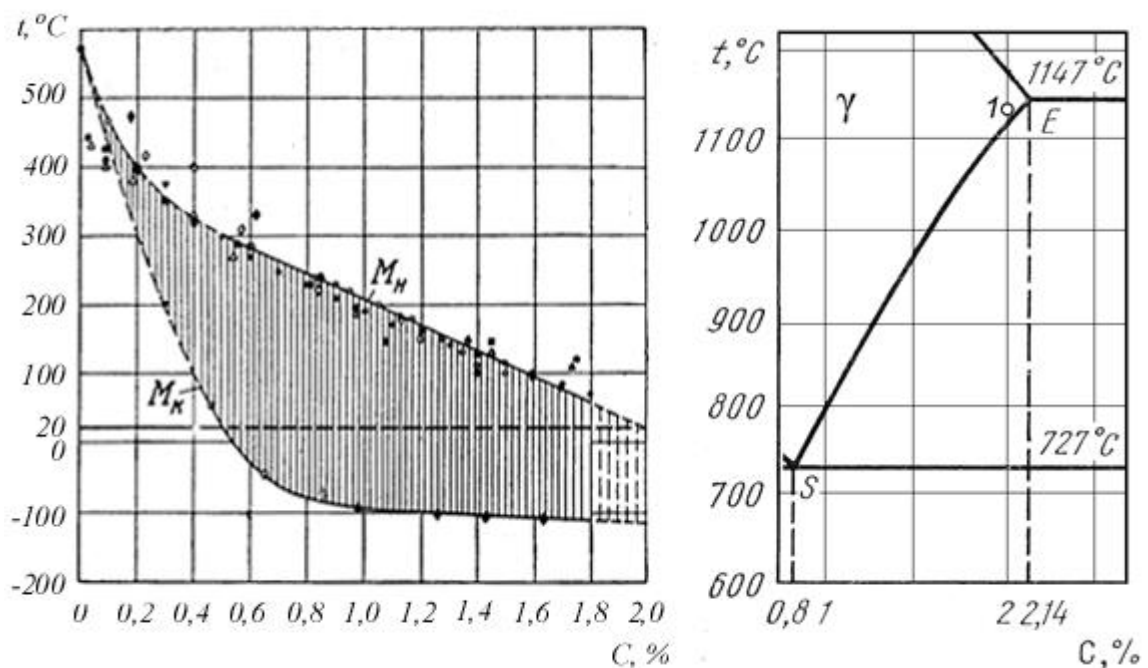


Рис. 3.4. Визначення хімічного складу сплаву і температури його нагріву під загартування для отримання аустенітної структури: а – залежність температури початку і кінця мартенситного перетворення від вмісту вуглецю в

аустеніті перед загартуванням;  $b$  – температура нагрівання під загартування (1) сплаву, що містить 2,0% С.

Максимальний вміст вуглецю в аустеніті, для якого  $M_n$  (~50 °С) визначена експериментально, складає 1,8% (рис. 3.4, а). При цьому після гартування фіксується близько 70% залишкового аустеніту. Цілком ймовірно, що екстраполяція залежності  $M_n = f(\% \text{ С})$  в область більшого вмісту вуглецю (пунктир) справедлива. Тоді при 2,0% С в аустеніті перед загартуванням температура початку мартенситного перетворення становить 20 °С, що має забезпечити повністю аустенітну структуру сплаву в загартованому стані.

Таким чином, для отримання аустенітної структури необхідний сплав з вмістом вуглецю 2,0-2,1%. Для отримання структури аустеніту сплав необхідно загартувати від температури вище  $A_{ст}$ , тобто 1120-1140 °С (рис. 3.8, б).

При більш високому, ніж 2,1%, вмісті вуглецю в сплаві (чавуни) повністю аустенітну структуру отримати неможливо. Максимальна розчинність вуглецю в аустеніті складає 2,14%, тому навіть при нагріванні під загартування до температури, яка наближається до температури ліквідус, частина цементиту не розчиниться в аустеніті в зв'язку з його граничним насиченням вуглецем. Тому в структурі сплаву після гартування з підвищених температур поряд з аустенітом буде присутній та чи інша кількість цементиту, якого тим більше, чим більший вміст вуглецю в сплаві.

При вмісті вуглецю меншому, ніж 2,1%, навіть нагрівання металу в однофазну область не зможе забезпечити достатньої кількості вуглецю в аустеніті. У зв'язку з цим температура початку мартенситного перетворення буде підвищена, що призведе лише до часткового протіканню мартенситного перетворення при загартуванні і як наслідок, появи тієї чи іншої кількості мартенситу. Причому, чим менше вуглецю міститься в сплаві, тим вище температура початку мартенситного перетворення а отже, тим більша кількість мартенситу утворюється після гартування.

Для отримання аустенітної структури використовували зразки сплаву з вмістом вуглецю 2,05% (рис. 3.5). Після гартування від 1130 °С в структурі фіксується аустеніт при невеликій кількості мартенситу (рис. 3.5).

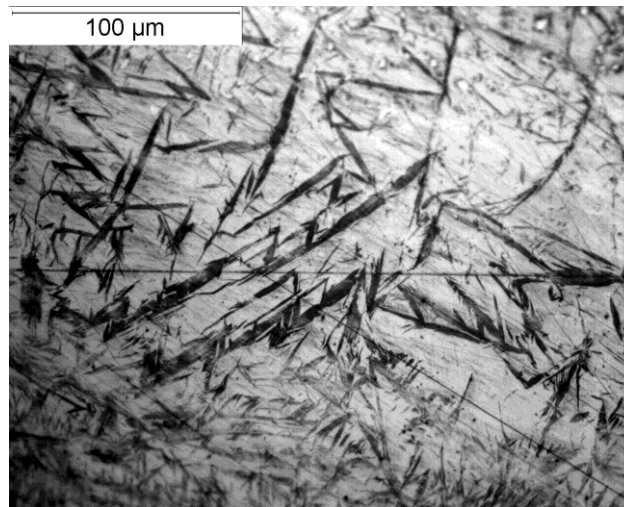


Рис. 3.5. Мікроструктура сплаву з вмістом вуглецю 2,05% після гартування від 1130 °С. Збільшення при зйомці  $\times 500$

При недостатній температурі нагріву під загартування сплаву, що містить 2,05%, частина цементиту не розчиняється, відповідно концентрація вуглецю в аустеніті перед загартуванням знижена і температура початку мартенситного перетворення підвищена. Тому металева основа сплаву після гартування поряд з аустенітом містить мартенсит. Крім того, в структурі присутній надлишковий цементит.

Таким чином, випробуваннями серії зразків сплаву з концентрацією вуглецю 2,05% після гартування від різних температур припускали визначити зносостійкість аустеніту, а також вплив мартенситу і цементиту на зносостійкість сплавів, що містять в структурі аустеніт. Результати представлені в табл. 3.4. Для порівняння показані результати, отримані при випробуваннях тих же матеріалів на машині Х4-Б до усунення фрикційного нагрівання.

Таблиця 3.4 – Результати визначення твердості  $HV$  і відносної зносостійкості  $\varepsilon$  сплаву з вмістом вуглецю 2,05% після гартування від різної температури. У порівнянні показані значення відносної зносостійкості  $\varepsilon'$  тих же матеріалів при випробуваннях на машині Х4-Б до усунення фрикційного нагрівання зразків

Температура загартування, °С	HV	Довірчий інтервал. Надійності висновку 0,96	$\varepsilon$	Довірчий інтервал. Надійності висновку 0,96	$\varepsilon'$
930	785	22	3,4	0,19	2,9
985	585	28	3,6	0,15	2,9
1130	330	10	4,2	0,20	3,0

Обробка результатів стандартних випробувань на абразивне зношування без нагріву зразків залізовуглецевих сплавів в різному структурному стані показує, що в межах певного типу металевої основи існує залежність відносної зносостійкості зразків від твердості (рис. 3.6).

Залежність  $\varepsilon = f(HV)$  для сплавів з феритною основою показує незначний вплив карбідної фази на стійкість до абразивного зношування сталей і чавунів, які відпалені. При високому процентному вмісті цементиту відносна зносостійкість білих чавунів всього лише в 2,3-2,4 рази вище відносної зносостійкості заліза. Тому білі нелеговані чавуни в відпаленого стані навряд чи можуть бути використані в якості зносостійкого матеріалу для деталей сільськогосподарських машин, які в процесі експлуатації піддаються впливу абразивного середовища.

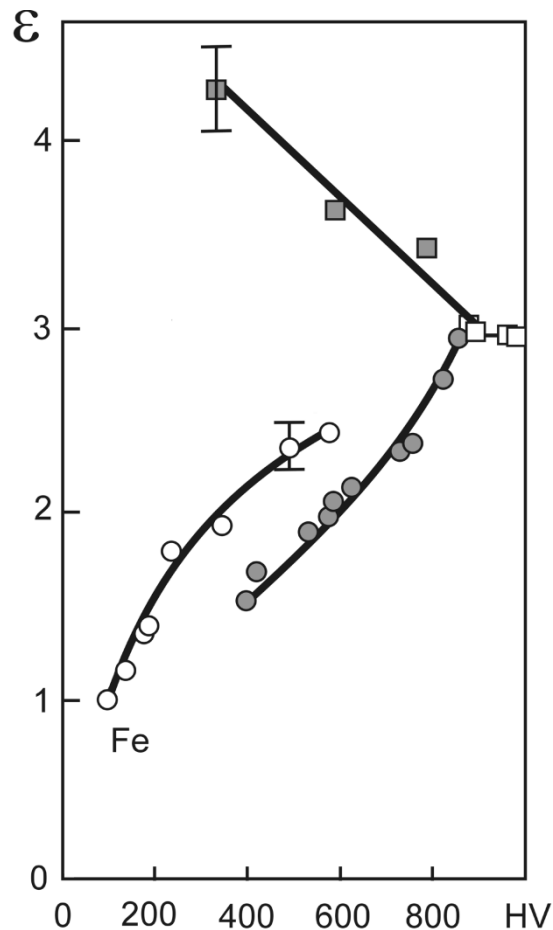


Рис. 3.6. Графічне представлення результатів випробувань сплавів системи Fe-C на абразивне зношування (без нагрівання): ○ - сплави з феритною основою при різному вмісті цементиту (табл. 3.1); ● - сталі зі структурою мартенситу (табл. 3.2); □ - сплави з мартенситокарбідною структурою (табл. 3.3); ■ - сплав з вмістом вуглецю 2,05% після гартування від різної температури для отримання аустеніту в структурі (табл. 3.4).

Залежність  $\varepsilon = f(HV)$  для мартенситних структур демонструє, що при зростанні твердості зносостійкість мартенситу суттєво виростає. Така залежність пов'язана з тим, що, як згадувалося вище, при абразивному зношуванні відбувається динамічне зміцнення мартенситу. Ступінь зміцнення тим більше, чим більше в мартенситі вуглецю, при цьому максимальне зміцнення поверхні тертя спостерігається при випробуванні зразків сталі У8 після гарту без відпустки.

Зміцнення мартенситу при абразивному зношуванні пояснює також відсутність впливу карбідної фази на зносостійкість сплавів з мартенситокарбідною структурою.

Особливий інтерес викликає залежність  $\varepsilon = f(HV)$  для сплавів, що містять в структурі аустеніт. Максимальну зносостійкість має сплав з вмістом вуглецю 2,05% після гарту від 1130 °С при максимальній можливій кількості аустеніту в структурі (рис. 3.5). Незважаючи на невисоку твердість (330 HV), яка більш, ніж в 2,5 рази нижче твердості загартованої невідпущеної сталі У8 (860 HV), аустенітний сплав володіє значно більшою зносостійкістю ( $\varepsilon = 4,2$ ).

Ця величина зносостійкості є гранично можливою для нелегованих залізовуглецевих сплавів. При появі в аустенітній структурі мартенситу і цементиту в результаті недостатнього нагріву під загартування сплаву з вмістом вуглецю 2,05% твердість зразків збільшується, проте зносостійкість знижується (рис. 3.6).

Сукупність залежностей, представлених на рис. 3.6, фактично являє собою структурну діаграму відносної зносостійкості в залежності від твердості для сплавів системи Fe-C. Діаграма може бути використана в якості ілюстрації тих потенційних можливостей, якими володіють залізовуглецевих сплавів в якості матеріалів, зносостійких при абразивному зношуванні.

Спільний розгляд діаграми, представленої на рис.3.6і діаграми, отриманої раніше ілюструє вплив швидкості ковзання по абразиву і, отже, температури поверхні тертя, на зносостійкість залізовуглецевих сплавів (рис. 3.7).

Очевидно, що найбільш інтенсивно швидкість ковзання по абразиву впливає на зносостійкість сплаву зі структурою аустеніту. Якщо при частоті обертання диска машини Х4-Б  $1 \text{ с}^{-1}$  зносостійкість сплаву з аустенітної структурою (лінія 4, пунктир) знаходиться на рівні загартованого на мартенсит евтектоїда (лінія 3, пунктир), то при зменшенні частоти в 7,5 раз, тобто. до  $0,13 \text{ с}^{-1}$ , зносостійкість аустенітних сплавів різко збільшується (лінія 4, суцільна) і істотно перевищує зносостійкість мартенситних сплавів.



Вплив швидкості ковзання на зносостійкість сплавів в іншому структурному стані (ферит, мартенсит – рис. 3.7, лінії 1, 2, 3 пунктирні і прямі) не так істотно, хоча в будь-якому випадку зносостійкість сплавів закономірно знижується зі збільшенням швидкості ковзання по абразиву.

Порівняння отриманих результатів випробувань аустенітних сталей і сплавів без нагріву (рис. 3.7, суцільна лінія) і при невеликому підвищенні температури поверхні тертя (до 75 °С) (рис. 3.7, пунктир) показує, що навіть такий невеликий нагрів катастрофічно знижує зносостійкість. На практиці ж фрикційна взаємодія деталей машин з абразивом практично завжди викликає нагрів до таких і більш високих температур. Тому спроба вирішення питання про вибір зносостійких матеріалів для роботи в конкретних умовах абразивного зношування без урахування фрикційного або технологічного нагріву може призвести до помилкових висновків.

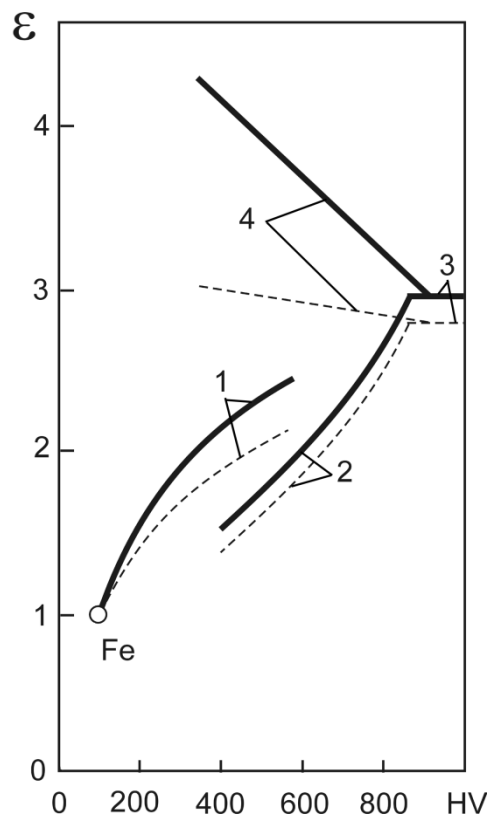


Рис. 3.7. Залежності відносної зносостійкості ( $\epsilon$ ) від твердості (HV) залізовуглецевих сплавів, отримані при швидкостях обертання диска машини Х4-Б  $1 \text{ c}^{-1}$  (пунктир) і  $0,13 \text{ c}^{-1}$  (суцільні лінії): 1 – ферит + цементит; 2 – мартенсит; 3 – мартенсит + цементит; 4 – аустеніт + мартенсит + цементит.

### **Висновки по розділу 3**

Таким чином, визначені закономірності абразивного зношування залізовуглецевих сплавів в стандартних умовах випробувань без нагріву. Показано, що зносостійкість зразків зі структурою аустеніту значно вище, ніж зносостійкість зразків, в структурі яких міститься максимальна кількість мартенситу.

## ВИСНОВКИ

Випробування зразків залізовуглецевих сплавів на абразивне зношування в стандартних умовах показали, що з трьох можливих типів структурного стану металевої основи (ферит, мартенсит, аустеніт) найбільшою зносостійкістю володіє аустеніт, незважаючи на невисоку твердість. Зносостійкість зразків з практично повністю аустенітної структурою при твердості 330 HV є максимально можливою для сплавів системи залізо-вуглець, і перевищує зносостійкість мартенситу загартованої сталі У8 при твердості 860 HV. При появі в структурі поряд з аустенітом мартенситу або цементиту зносостійкість сплавів знижується, незважаючи на підвищення твердості.

В результаті аналізу експериментальних даних встановлено, що для кожного структурного стану металевої основи залізовуглецевих сплавів існує певна залежність зносостійкості від твердості.

Для сплавів з феритною основою (відпалений стан) зносостійкість збільшується при збільшенні твердості за рахунок підвищення вмісту карбідної фази, однак інтенсивність збільшення зносостійкості нестійка. В області малих кількостей карбідів (сталі) зносостійкість з підвищенням твердості збільшується досить інтенсивно. Однак при переході до великих кількостей фази карбиду (чавуни) підвищення твердості вже не призводить до істотного зростання зносостійкості. Тому зносостійкість чавунів навіть при заевтектичному вмісті вуглецю незначна і набагато нижче зносостійкості, яку можна отримати за рахунок мартенситу.

Зносостійкість сталей зі структурою мартенситу також залежить від твердості. У свою чергу, твердість мартенситу визначається вмістом в ньому вуглецю. Чим більше вуглецю містить мартенсит, тим вище твердість і зносостійкість, причому інтенсивність збільшення зносостійкості з ростом твердості збільшується. Максимальну зносостійкість для мартенситної структури володіє сталь У8 після гартування без відпустки. Поява в мартенситі

карбідної фази (цементит) не підвищує зносостійкість, незважаючи на збільшення твердості. Визначені закономірності абразивного зношування залізвуглецевих сплавів в стандартних умовах випробувань без нагріву показали, що зносостійкість зразків зі структурою аустеніту значно вище, ніж зносостійкість зразків, в структурі яких міститься максимальна кількість мартенситу.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Боуден Ф. Трение и смазка твердых тел. Москва : Машиностроение, 1968. 543 с.
2. Rabinowicz E. Friction and Wear of Materials. New York : John Wiley & Sons Inc., 1995. 336 p.
3. Bayer R. Mechanical Wear Fundamentals and Testing. New York : Routledge, 2004. 402 p.
4. Bull S. J. Can scratch testing be used as a model for the abrasive wear of hard coatings? *Wear*. 1999. V. 233-235. P. 412-423.
5. Fang L. Predicting three-body abrasive wear using Monte Carlo methods. *Wear*. 2014. V. 256, № 7-8. P. 685-694.
6. Richardson R. C. D. The wear of metals by hard abrasives. *Wear*. 1967. V. 10, № 4. P. 291-309.
7. Mashloosh K. M. Abrasive wear and its application to digger teeth. *Tribology International*. 1985. V. 18, № 5. P. 259-266.
8. Ткачев В. Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. Москва : Машиностроение, 1971. 264 с.
9. Боголюбов Б. Н. Долговечность землеройных и дорожных машин. Москва : Машиностроение, 1964. 224 с.
10. Ковальчук В. А. Влияние размера абразива на результаты испытаний износостойкости материалов. *Труды Красноярского проектного и научно-иссл. ин-та*. 1977. № 42. С. 60-66.
11. Тененбаум М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. Москва : Машиностроение, 1966. 332 с.
12. Torrance A. A. Modelling abrasive wear. *Wear*. 2005. V. 258, № 1-4. - P. 281-293.

13. Тылкин М. А. Повышение долговечности деталей металлургического оборудования. Москва : Металлургия, 1971. 608 с.

14. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Томск : Полиграфиздат, 1947. 542 с.

15. Сороко-Новицкая А. А. Износостойкость углеродистой стали, имеющей различную структуру. *Трение и износ в машинах*. 1959. С. 5-18.

16. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. Москва : Металлургия, 1975. 584 с.

17. Попов В. С. Применение легированного чугуна для изготовления пластин пресс-форм. *Огнеупоры*. 1964. № 8. С. 357-359.

18. Серпик Н. М. Влияние термической обработки на износостойкость стали в грунтовой массе. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1958. № 7. С. 46-50.

19. Кащеев В. Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. Москва : Машиностроение, 1978. 213 с.

20. Колесов В. Г. Износостойкость наплавочных сплавов при работе в абразивной среде. *Сварочное производство*. 1960. № 11. С. 20-24.

21. Сорокин Г. М. О природе износостойкости сталей при абразивном изнашивании. *Вестник машиностроения*. 1984. № 12. С. 25-27.