

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій

(повне найменування кафедри)

## Пояснювальна записка

до дипломного проекту

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему: “Дослідження впливу умов зношування на властивості поверхні  
тертя низьколегованих сталей”

Виконав: студент 2 курсу, групи ІФ-412м

Спеціальності 131 Прикладна механіка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма «Відновлення та підвищення  
зносостійкості деталей і конструкцій»

Осіпчук Р.Б.

(прізвище та ініціали)

Керівник д.т.н., проф. Бриков М.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

2023 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»  
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Інженерно-фізичний факультет  
Кафедра Кафедра інтегрованих технологій зварювання та моделювання  
конструкцій

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність 131 Прикладна механіка

(код і найменування)

Освітня програма «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і  
конструкцій»

(назва освітньої програми (спеціалізації))

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

Олексій КАПУСТЯН



« 14 » грудня 2023 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТА(КИ)**

Осіпчук Радомір Борисович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту “Дослідження впливу умов зношування на властивості  
поверхні тертя низьколегованих сталей”

керівник проєкту д.т.н., проф. Бриков М.М.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «14» 11 2023р. № 509

2. Строк подання студентом проєкту \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проєкту низьколегована сталь 130ГЗС2, абразивне зношування  
за різних умов експлуатації

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Абразивне зношування: типологія та класифікація 2. Властивості  
низьколегованої сталі 120ГЗС2 3. Вплив умов роботи деталей на характер та  
інтенсивність абразивного зношування 4 Вплив властивостей матеріалу на  
абразивну зносостійкість 5. Способи визначення зносостійкості для  
предикативного аналізу умов зношування та оптимального вибору сталей 6.  
Охорона праці під час виконання досліджень

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1.Залежність величини зносу від тривалості напрацювання деталей

2.Випробовування на вигин та кінетика ізотермічного перетворення сталі

120ГЗС2 3. Залежність величини зносу від розміру абразивних часток

4.Залежність величини мікротвердості та кількості аустеніту (X12Ф1) від тиску

абразивної маси 5. Залежність інтенсивності зношування та зносостійкості сталі

X12Ф1 від тиску абразиву 6. Залежність інтенсивності зношування сталі від

мікротвердості абразивних часток 7. Залежність відносної зносостійкості сталі від мікротвердості абразивних часток 8. Залежність інтенсивності зношування лемішів плугу від коеф. форми абразивних часток 9. Відносна зносостійкість сталі 120Г3С2 після гарту з 1000 °С та ізотермічної витримки 10. Розподіл мікротвердості та мікроструктура поверхні сталі 120Г3С2

#### 6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	Бриков М.М. д.т.н., проф.	03.09.23	10.09.23
2	Бриков М.М. д.т.н., проф.	10.09.23	15.10.23
3	Бриков М.М. д.т.н., проф.	16.10.23	30.10.23
4	Бриков М.М. д.т.н., проф.	02.11.23	11.10.23
5	Бриков М.М. д.т.н., проф.	12.10.23	20.11.23
6	Нестеров О.В., к.т.н, доц.	20.11.23	25.11.23
	Корнієнко О.Б., ст.викладач		

7. Дата видачі завдання «16» жовтня 2023 року.

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Абразивне зношування: типологія та класифікація	10.09.23	виконав
2	Властивості низьколегованої сталі 120Г3С2	15.10.23	виконав
3	Вплив умов роботи деталей на характер та інтенсивність абразивного зношування	30.10.23	виконав
4	Вплив властивостей матеріалу на абразивну зносостійкість	11.10.23	виконав
5	Способи визначення зносостійкості для предикативного аналізу умов зношування та оптимального вибору сталей	20.11.23	виконав
6	Охорона праці під час виконання досліджень	09.12.23	виконав

Студент

  
(підпис)

Осіпчук Р.Б.  
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту

  
(підпис)

д.т.н., проф. Бриков М.М.  
(прізвище та ініціали)

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

HRC – твердість по Рокквелу

HB – твердість по Брінелю

A3 – абразивне зношування

AЧ – абразивні частинки

ТО – термічна обробка

ХТО – хіміко-термічна обробка

$\epsilon$  – відносна зносостійкість

$M_p$  – температура початку мартенситного перетворення

$A_{cm}$  – температура переходу до однофазної області

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота складається з 71 ст., 6 розділів, 27 рисунка, 5 таблиць, 53 літературних джерел.

**ЗНОСОСТІЙКІТЬ, НИЗЬКОЛЕГОВАНА СТАЛЬ, УМОВИ ЗНОШУВАННЯ, ЗАЛИШКОВИЙ АУСТЕНІТ, МАРТЕНСИТНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ, КРИТЕРІЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ**

Об'єкт дослідження – структурно-фазові перетворення у сталі 120Г3С2 під дією умов зношування.

Мета роботи – дослідження впливу умов зношування на властивості поверхні тертя низьколегованих сталей, аналіз механізмів зношування та ранжування факторів за їх вирішальним впливом на інтенсивність деградації поверхонь, що дасть змогу приймати більш точні рішення щодо вибору сталей спираючись на їх фізико-механічні та структурні характеристики.

Метод дослідження – аналіз літературних даних, виконання експериментальних досліджень характеристик зразків, дослідження фазово-структурного стану сталей.

Результати дослідження полягають у всебічному врахуванні факторів впливу на поверхню зношування та пропозиції високовуглецеву низьколеговану сталь 120Г3С2, яка має яскраво виражену чутливість до умов зношування, використовувати як індикатор для отримання інформації щодо якісної характеристики цих умов та визначення найбільш суттєвих факторів впливу. Що у свою чергу дозволяє ефективно обирати зносостійкі матеріали, які забезпечують більший ресурс роботи деталей.

## **ABSTRACT**

The master's thesis consists of an introduction, 6 chapters, 27 figures, 5 tables, and 53 references.

**WEAR RESISTANCE, LOW-ALLOY STEEL, WEAR CONDITIONS, RESIDUAL AUSTENITE, MARTENSITIC TRANSFORMATION, WEAR RESISTANCE CRITERIA**

Object of study - structural and phase transformations in 120G3S2 steel under the influence of wear conditions.

Purpose - to study the effect of wear conditions on the properties of the friction surface of low-alloy steels, to analyze the wear mechanisms and to rank the factors by their decisive influence on the intensity of surface degradation, which will allow making more accurate decisions on the choice of steels based on their physical, mechanical and structural characteristics.

Research methods: analysis of literature data, experimental studies of the characteristics of samples, study of the phase-structural state of steels.

The results of the study are to comprehensively take into account the factors affecting the wear surface and to propose that high-carbon low-alloy steel 120G3S2, which has a pronounced sensitivity to wear conditions, be used as an indicator to obtain information on the qualitative characteristics of these conditions and to determine the most significant factors of influence. This, in turn, makes it possible to effectively select wear-resistant materials that provide a longer service life for parts.

## ЗМІСТ

Вступ.....	9
1 Абразивне зношування: типологія та класифікація.....	10
1.1 Схеми абразивного зношування.....	11
1.2 Кількісні параметри оцінки зношування.....	13
1.3 Стадійність абразивного зношування.....	15
2 Властивості низьколегованої сталі 120Г3С2.....	17
3 Вплив умов абразивного зношування.....	21
3.1 Вплив розміру абразивних часток на інтенсивність абразивного зношування сталей.....	25
3.2 Вплив змінного навантаження на зношування вуглецевої сталі... ..	30
3.3 Вплив комбінованого ударного-абразивного контакту на зношування низьколегованих сталей.....	33
3.4 Вплив твердості абразивних часток.....	35
3.5 Вплив форми абразивних часток.....	38
4. Вплив властивостей матеріалу на абразивну зносостійкість.....	40
4.1 Твердість як критерій зносостійкості низьколегованих сталей... ..	40
4.2 Вплив мікроструктури та фазового стану низьколегованих сталей на зносостійкість.....	42
5. Способи визначення зносостійкості для предикативного аналізу умов зношування та оптимального вибору сталей.....	47
5.1 Методи метрологічного контролю зносостійкості сталей.....	47
5.2 Сталь 130Г3С2 як індикатор умов абразивного зношування....	51
6. Охорона праці під час виконання досліджень.....	58
6.1 Аналіз потенційних небезпек.....	58
6.2 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці.....	60
6.3 Заходи з пожежної безпеки.....	61
6.4 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	62

Висновок.....	65
Перелік джерел посилання.....	66

## ВСТУП

Питанням абразивного зношування (АЗ) присвячена велика кількість наукових робіт. Особливо важливим є дослідження механізмів класифікації та методики вивчення АЗ, що може допомогти у вирішенні проблеми вибору найкращих матеріалів з формуванням їх відповідної структури та механічних характеристик для роботи у конкретних реальних умовах.

Через багатofакторність умов зношування донині відсутні єдині стандарти експериментальних методик попередніх досліджень, що ускладнює вибір найбільш актуального типу зносостійкого матеріалу. До того ж, будь-які лабораторні дослідження не враховують усього переліку факторів впливу у системі “матеріал-середовище.”

Враховуючи актуальність теми для прикладного застосування та значної економії ресурсів, у даній роботі пропонується вирішення питання предикативної оцінки умов та режимів зношування з використанням у якості універсальної низьколегованої сталі-індикатора 120Г3С2.

Так як неможливо побудувати адекватні та всеохоплюючі моделі зношування, пропонується застосовувати зразок-свідок достатньо чутливий до змін умов тертя в реальних умовах, і за аналізом змін в його структурі та характері пошкоджень приймати обґрунтоване рішення щодо застосування конкретних матеріалів та їх попередньої термічної обробки. Це дозволить значно скоротити час і ресурси для практичного вибору зносостійких сталей для конкретних умов роботи.

## 1 АБРАЗИВНЕ ЗНОШУВАННЯ: ТИПОЛОГІЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ

Абразивне зношування (АЗ) - це процес втрати матеріалу, що виникає в результаті тертя твердих абразивних частинок об поверхню деталей. Воно може призводити до зміни геометрії та властивостей поверхні матеріалу, а також до зменшення його ефективності та тривалості служби.

Зношування є системною реакцією матеріалу на вплив абразивними частками, тому його механізм дуже складний. Пошкодження трибологічної поверхні часто відбувається шляхом послідовних невеликих кроків, що активуються мікромеханізмами зношування. І як результат, пошкодження є кумулятивним ефектом одного або декількох мікромеханізмів, що призводить до макромасштабного пошкодження. На поверхні матеріалу в основному відбиток стирання проявляється через наявність канавок, зроблених твердими абразивними частинками або виступами вздовж напрямку ковзання. Борозенки у цьому випадку є вираженими елементами морфології поверхні та зовнішнього вигляду, проте їх відмінні геометричні особливості можуть бути пов'язані з певним мікромеханізмом, а ступінь проникнення є фактором, який дає інформацію про геометрію канавки зносу і може бути використаний для визначення домінуючого мікромеханізму в конкретному процесі.

Існують різні підходи до класифікації зношування: найбільш вживаний базується на фізичній природі основних процесів. Відповідно до цього підходу було визначено п'ять процесів зношування: стирання, адгезія, втома, ерозія та корозія.

Дослідження процесів зношування металів в абразивних середовищах є важливим напрямом досліджень для багатьох наукових колективів у світі. Для опису різних типів АЗ були розроблені різні класифікації:

- а) абразивне зношування двох і трьох тіл [1, 2];
- б) абразивне зношування під низьким та високим напруженням і викришування [3];

в) м'яке та тверде АЗ [4] та інші.

Окрім того, з метою вивчення механізмів деформації та зношування, докладно досліджено фізичні взаємодії між абразивними частинками та поверхнею, що стирається. Автори [5, 6] їх умовно упорядковують у чотири категорії:

- а) мікророзорювання;
- б) мікрорізання;
- в) мікротривома;
- г) мікротріщиноутворення.

За Крагельським [7] АЗ поділяється на три основних види: пружний контакт, пластичне відтиснення та мікрорізання. Загалом, не існує виключного впливу одного типу зношування, але провідний з них є найбільш важливим.

## 1.1 Кількісні параметри оцінки зношування

Під час стендових, лабораторних та експлуатаційних випробувань визначають кількісні параметри зношування, що необхідно для характеристики матеріалів які досліджуються. Вимірювання величини зносу здійснюють одним з методів: зважуванням, визначенням кількості продуктів зношування в мастилi, мікрометражним вимірюванням лінійного зносу, за допомогою поверхневої активації, вмонтованих датчиків або штучних баз тощо.

Найбільш поширений метод – лінійного мікровимірювання, який застосовується для визначення динаміки і характеру процесу зношування робочих поверхонь. Він заснований на визначенні величини зносу шляхом визначення лінійних розмірів деталей мікрометрами, індикаторами та ін. перед і після зношування. У цьому випадку величина зносу визначається як різниця розмірів поверхонь деталей до і після дослідження. Недоліком цього методу є:

- необхідність демонтажу досліджуваного вузла чи механізму;

- складність відтворення вимірювання в одних і тих же точках;
- недостатня точність при незначних значеннях величини зношування;
- великий вплив суб'єктивного фактору тощо.

Також застосовується метод профілографування поверхонь при якому отримують графічне зображення мікротопографічного рельєфу зношеної поверхні з використанням спецприладів – профілографів. Цифрова обробка профілограм дозволяє визначити фактичний знос поверхонь і порівняти їх до зношування.

Для визначення величини зношування застосовують вимірювання зміни розмірів попередньо нанесених штучних заглиблень на поверхню матеріалу. Цей метод називають методом штучних баз. Лунки являють собою відтисками конусного або пірамідального індентора. Найбільш застосовуваним є метод формування лунок на поверхні досліджуваного матеріалу обертовим тригранним алмазним різцем. Цей спосіб не створює напливів від тиснення і це сприяє отриманню більш точних даних процесу абразивного зношування, його величина визначається за формулою:

$$\Delta h = h - h_1 = \frac{l^2 - l_1^2}{8r} \quad (1.1)$$

де  $\Delta h$  – товщина зношеного шару (знос);  
 $h, h_1$  – відповідно глибина відбитка до і після зношування;  
 $l, l_1$  – відповідно довжина лунки до і після зношування;  
 $r$  - радіус, описаний верхівкою різця.

Для оцінки зношування поверхонь тертя використовують регламентовані визначення характеристик процесу. До них відносять: граничний та допустимий знос, інтенсивність зношування та його швидкість.

Граничний знос – проявляється при граничному стані механізму або деталі. Допустимий знос – стан, при якому механізм зберігає працездатність протягом регламентованого ресурсу роботи. Швидкість зношування

визначається як відношення величини зносу до інтервалу часу  $t$ , протягом якого він з'являється. Інтенсивність зношування – відношення величини зносу до довжини лінії тертя, протягом якого відбувалося зношування, чи до об'єму виконаної роботи.

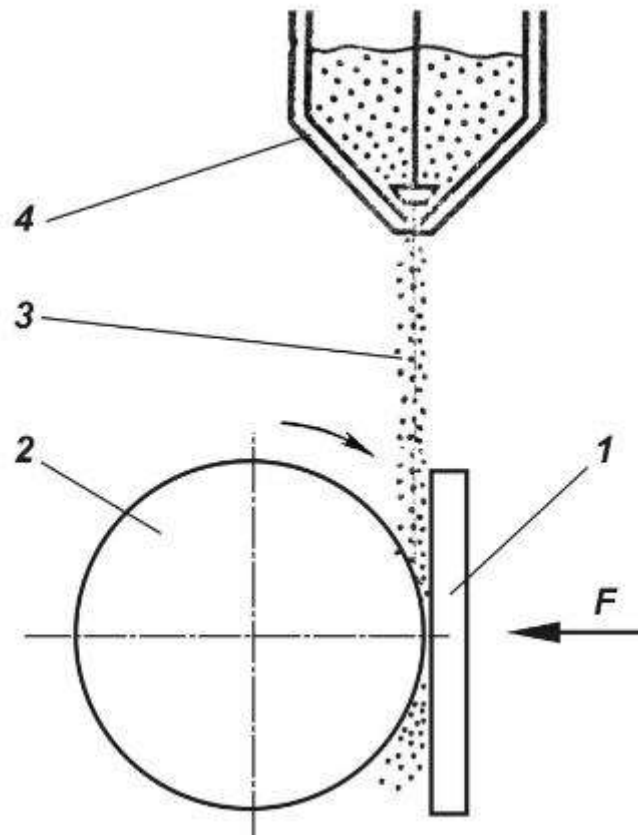
## 1.2 Схеми абразивного зношування

Знання схеми абразивного зношування, є важливим для розуміння механізмів стирання матеріалів у різних умовах експлуатації. Це дозволяє належним чином прогнозувати і враховувати фактори, що впливають на швидкість зношування та зміну властивостей матеріалів в процесі експлуатації. Розрізнення між цими двома схемами абразивного зношування може вказати на причини зносу, допомагаючи визначити ефективні методи запобігання та зменшення стирання поверхонь.

Схеми абразивного зношування можна умовно розділити на дві категорії: абразивне зношування двох тіл та трьох тіл. АЗ двох тіл виникає, коли тверді частинки прикріплюються до поверхні та спричиняють її стирання. Трьох-тільна схема зношування виникає, коли абразивні частинки знаходяться між двома поверхнями матеріалу, вільно кочучись або ковзаючи. Прикладом трьох-тільної схеми може бути стирання піском або іншими абразивними матеріалами, що потрапили між рухомими поверхнями.

Основна мета концепції двох-трьох тіл полягає в тому, щоб описати, чи абразивні частинки обмежені чи вільно перекочуються. Альтернативне тлумачення підкреслює присутність (три тіла) або відсутність (двотільна) жорсткої протилежної поверхні, що підтримує абразив. Згідно з цією точкою зору, стирання трьох частин прирівнюється до стирання з високим навантаженням (або шліфуванням) і, як правило, є більш серйозним, ніж стирання двох частин (з низьким навантаженням) [1].

Машина зображена на рисунку 1.1 – Брінелля-Хаворта є однією з найпоширеніших установок для випробувань за тритільною схемою, тобто неприкріпленим абразивом.

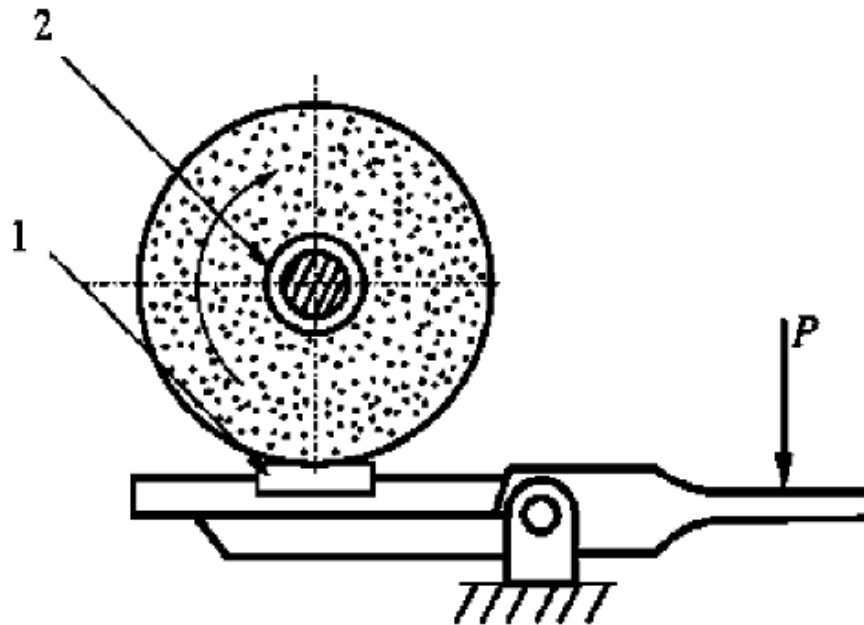


1 – досліджуваний зразок; 2 – резинове колесо; 3 – абразивні частинки;  
4 – бункер

Рисунок 1.1 – Схема машини Брінелля-Хаворта [8]

На рисунку 1.2 представлена схема установки для проведення експерименту на зношування зразків із жорстко закріпленим абразивом.

Для оцінювання втрати маси зразків за такою схемою важливими параметрами є: характеристики абразивного круга, лінійна швидкість тертя, навантаження в зоні лінійного контакту.



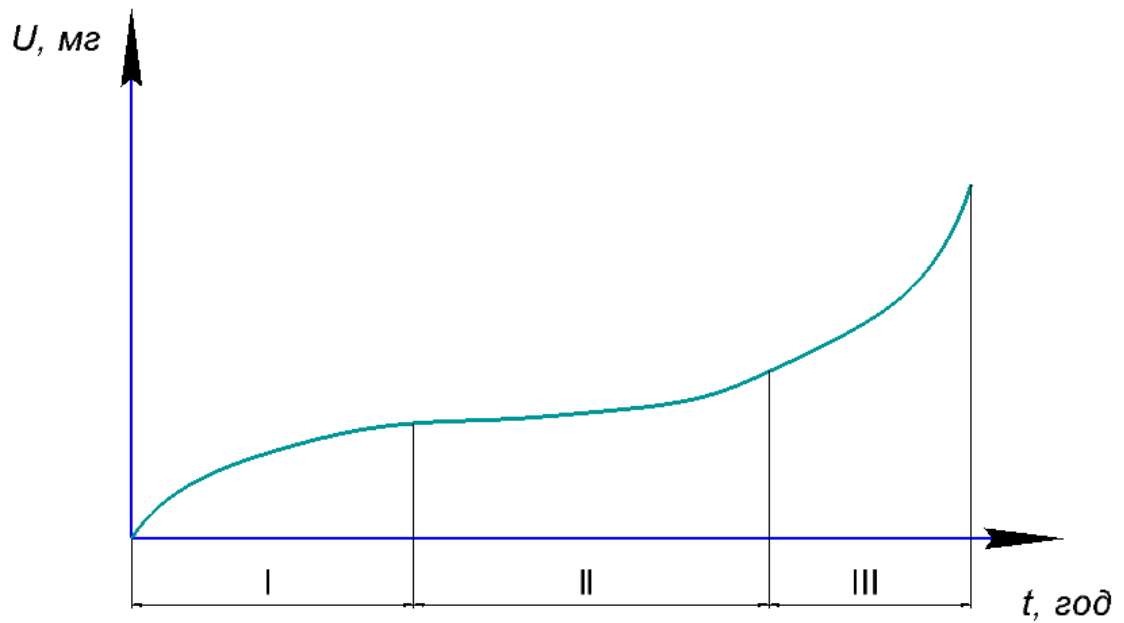
1 – зразок, 2 – абразивний круг

Рисунок 1.2 – Принципова схема установки для проведення експерименту на зношування зразків із жорстко закріпленим абразивом [9]

### 1.3 Стадійність абразивного зношування

Графік залежності зносу  $U$  від часу  $t$  має вигляд кривої що зображено на рисунку 1.3.

Як видно з рисунку 1.3 абразивне зношування має три стадії. Перша стадія характеризується припрацюванням контактуючих поверхонь, її супроводжують нестабільність параметрів тертя та висока початкова питома швидкість зношування. Це спричинено суттєвими пластичними деформаціями мікронерівностей поверхні та зміною механічних, фізичних та структурних властивостей матеріалу.



I – стадія припрацювання; II – стадія нормальної роботи; III – стадія аварійно-критичного зношування

Рисунок 1.3 – Залежність зносу від тривалості напрацювання деталей [7]

Друга стадія відповідає найтривалішому відрізку часу і характеризується номінальним режимом роботи деталі в умовах АЗ. При цьому відбувається стабілізація параметрів тертя і інтенсивність зношування незначна і постійна.

Накопичення факторів, що погіршують умови роботи деталі можуть призвести до різкого збільшення швидкості зносу і описують третю стадію на рисунку 1.3.

Можливі випадки, коли залежності зносу від часу напрацювання мають не всі стадії відповідно до наведеного вище. Це пов'язано з видом зношування, властивостей матеріалу, властивостей абразивних чаток.

## 2 ВЛАСТИВОСТІ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ 120Г3С2

Сталь 120Г3С2 використовується для виготовлення ремонтних накладок землероблювальних, кар'єрних вузлів та деталей, що працюють у важких ударно-абразивних умовах, а також в умовах гідро-абразивного зношування.

Хімічний склад високовуглецевої низьколегованої сталі 120Г3С2 наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад високовуглецевої низьколегованої сталі 120Г3С2, % [10]

C	Mn	Si	Fe
1,2	2,6	1,5	залишок

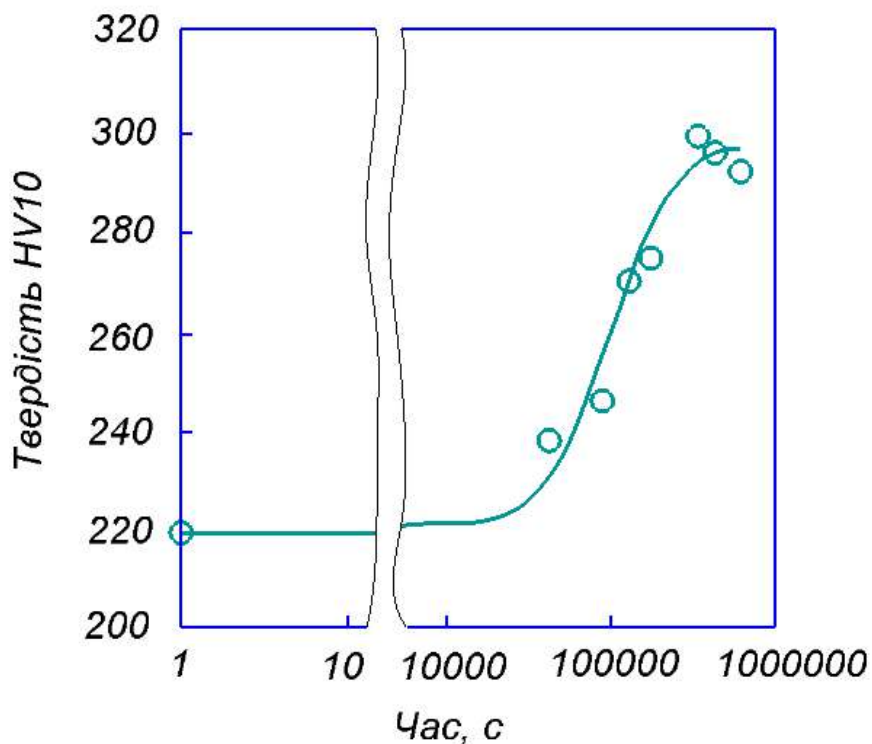
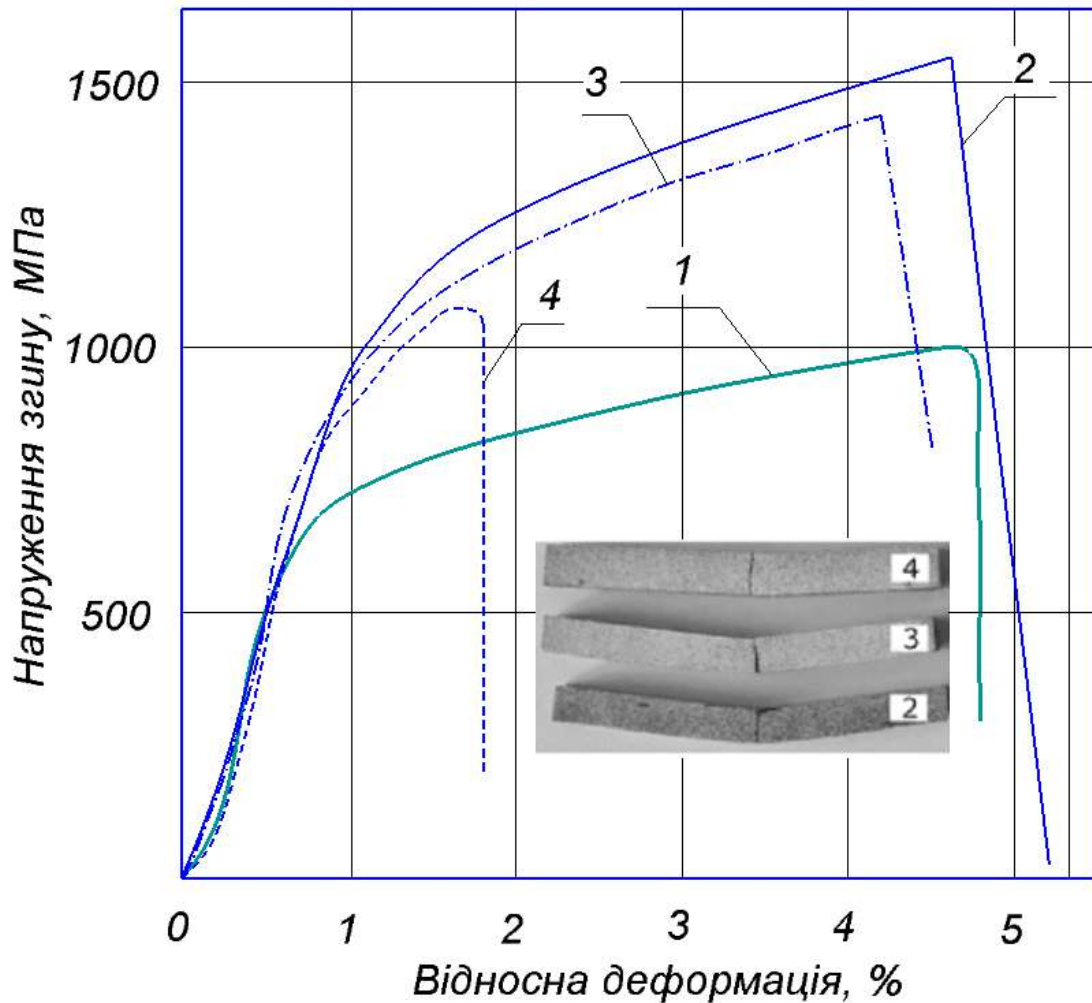


Рисунок 2.1 – Кінетика ізоотермічного перетворення аустеніту сталі №1 за температури 250°C [11]

У роботі [11] проводили експерименти на сталі 120Г3С2 з дещо коригованим хімічним складом (% мас.): № 1 – С 1,29; Mn 3,51; Si 2,18; Cr 0,18; Cu 0,05; Ni 0,1; P 0,044; S 0,005; № 2 – С 1,22; Mn 2,58; Si 2,03; Cr 0,16; Cu 0,44; Ni 0,06; P 0,029; S 0,009.

Були отримані результати механічних характеристик, що наведені на рисунку 2.1, 2.2, 2.3 відповідно.

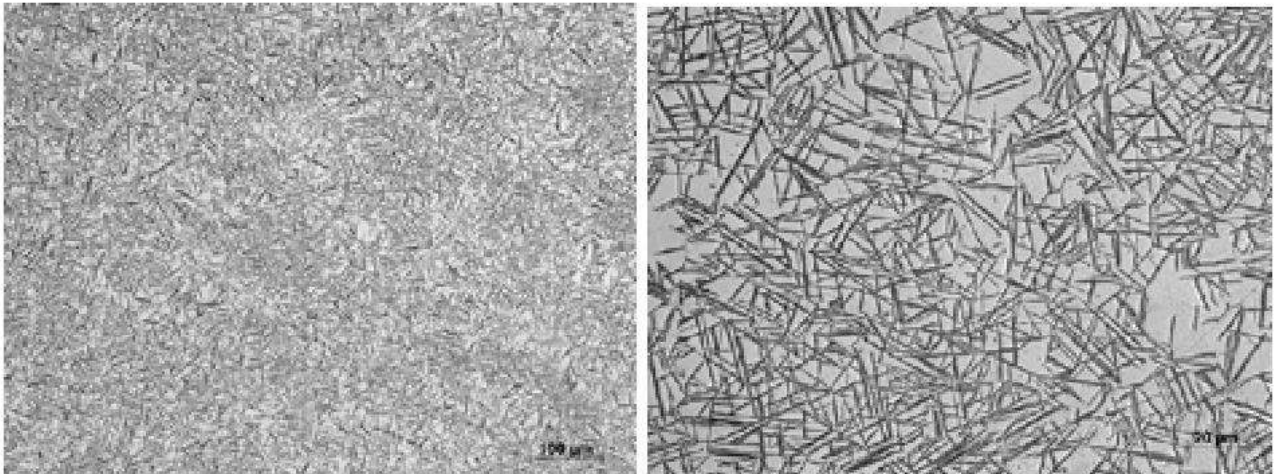


1 – загартування від 1000°C; 2 – загартування від 1000°C + витримка при 250°C 8 діб; 3 – загартування від 1000°C + витримка при 250°C 8 діб. + обробка при -80°C; 4 – гарт від 1000°C + витримка при 250°C 8 діб, + витримка при 250°C 8 діб, + обробка при -196°C

Рисунок 2.2 – Діаграма навантаження під час випробування на статичний триточковий вигин зразків сталей №1 [11]

Порівняння кривих 1 і 2 показує, що ізотермічна обробка за дослідженим режимом призводить до зміцнення в півтора раза без зміни пластичності. При цьому будь-яке охолодження в процесі експлуатації (не нижче  $-80^{\circ}\text{C}$ ) не призведе до принципової зміни властивостей матеріалу (діапазон між кривими 2 і 3). Тільки охолодження в рідкому азоті (рис. 2.2) значно окрихчує матеріал (крива 4), проте навіть у такому разі властивості залишаються на вищому рівні, ніж у разі початкового виділення мартенситу з аустеніту, що не піддавався ізотермічному перетворенню (рис. 2.2, крива 2).

На рисунку 2.3 зображено структуру зразка № 1 після загартування від  $1000^{\circ}\text{C}$  та ізотермічної витримки 8 діб за  $250^{\circ}\text{C}$ .



а)

б)

а) розмір 100 мкм, б) розмір 20 мкм

Рисунок 2.3 – Структура зразка № 1 після загартування від  $1000^{\circ}\text{C}$  та ізотермічної витримки 8 діб за  $250^{\circ}\text{C}$ . Оптичний мікроскоп

В таблиці 2.2 представлена мікротвердість поверхні тертя зразків сталі після загартування від різної температури

Таблиця 2.2 – Мікротвердість поверхні тертя зразків стали після загартування від різної температури [12]

Т, °С	Вимірювання									Середня
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
800	1018	960	1018	960	1018	857	1049	960	932	967,8
850	960	1018	1049	1049	932	906	960	932	1018	978,4
900	1189	1116	988	1049	1049	1151	1189	1110	1045	1103,6
950	1082	1116	1189	988	1049	1116	1049	1151	1082	1090,4
1000	1116	932	1313	932	1049	960	1049	1082	1116	1045,5

### 3 ВПЛИВ УМОВ АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

Аналіз зносостійкості є складним завданням через велику кількість факторів впливу. Такими факторами у реальних умовах є параметри, які суттєво можуть відрізнятися від лабораторних експериментів: мікроструктурний стан сталі та її механічні характеристики, шорсткість поверхні, дво- чи тритільна схема взаємодії, температура, вологість та наявність хімічноактивних речовин, рівень навантаження, кут атаки абразивних часток, їх закріпленість у матриці абразиву, відносна швидкість, форма та фракція, механічні характеристики часток абразиву тощо.

Взаємодія цих чинників регулює швидкість зношування матеріалу і призводить до зміни властивостей його поверхні. Розуміння результуючої цього впливу дозволяє розробляти стратегії для зменшення зношування матеріалів у різних умовах експлуатації.

Так, у праці [13] досліджено поведінку при абразивному зношуванні під низьким напруженням маловуглецевих, середньовуглецевих і високовуглецевих сталей. Вивлено, що термічна обробка значно покращує твердість, міцність на розрив і стійкість до стирання середньовуглецевих і високовуглецевих. Результати показують, що зняття матеріалу при абразивному зношуванні контролюється рядом факторів, таких як твердість, хімічний склад, мікроструктура та умови термічної обробки. Показано, що термічно оброблені сталі з високим вмістом вуглецю і низьким вмістом хрому та маловуглецева сталь, що науглецьовані, забезпечують найкращу твердість і стійкість до абразивного зносу і, таким чином, є найбільш придатними матеріалами для виготовлення сільськогосподарських інструментів.

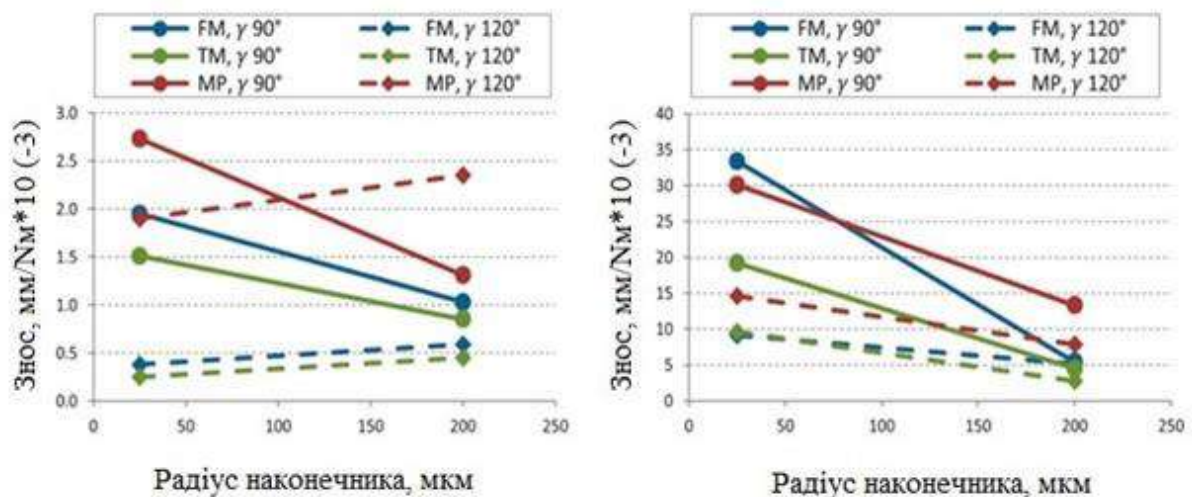
У роботі [14] представлено дослідження широкого спектру механізмів абразивного зношування низьколегованих сталей, хімічний склад яких наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад досліджуваних сталей, %

Матеріал	C	Mn	Si	P	S	Ti	Cr	Ni	B	Mo
FM	0,2	1,9	0,5	0,02	0,005	0,05	0,5	-	0,004	-
TM	0,2	1,9	0,5	0,02	0,005	0,05	0,5	-	0,004	-
MP	0,2	1,6	-	0,018	0,005	-	1,9	0,2	-	0,4

Порівняння показало, що випробувані матеріали мають однакові показники зносостійкості, проте в кожній конфігурації домінуюча змінна механізму зношування відрізнялася. Було досліджено значення і внесок параметрів випробувань, розширених властивостей матеріалу і сформованих на їх основі безрозмірних характеристик на поведінку зношування і деформацію поверхні.

З точки зору зносостійкості, загартована мартенситна сталь показала найкращі результати у всіх досліджуваних тестових системах, за нею слідує чисто мартенситний структурований матеріал. Багатофазна сталь призвела до найбільш серйозних втрат матеріалу.



а)

б)

а) для навантаження  $F_N 0,9N$ , б) для навантаження  $F_N 10,8N$ 

Рисунок 3.1 – Питома швидкість зношування досліджуваних матеріалів (FM, TM, MP) як функції радіуса наконечника ( $\mu\text{m}$ ) і кут конуса індентора ( $\gamma$ ) для різних навантажень [14]

На рисунку 3.1 представлена питома швидкість зношування, що скоригована відповідно до навантаження та відстані ковзання. За результатами випробувань найкращим матеріалом у якості зносостійкого виявився загартований мартенситний матеріал ТМ, за ним слідував чистий мартенсит FM. Зразок МР зазнав більш значних втрат матеріалу через схильність до мікрорізання. Різні показники зносу досліджуваних мартенситних і МП матеріалів можна інтерпретувати як наслідок різної твердості матеріалів.

На рисунку 3.2 наведено чутливість до абразиву для отриманих характеристик подряпин (ширина, глибина, ступінь заглиблення, площа та об'єм канавки). Фактори розташовані в послідовності зростання впливу. Абразивна чутливість - це ступінь впливу незалежних змінних (змінних випробувань, властивостей матеріалу і показників, сформованих на їх основі) на залежну змінну (наприклад, знос), яка пов'язана зі стандартизованими коефіцієнтами регресії. Таким чином, чим вище абсолютне значення відповідного стандартизованого коефіцієнта регресії, тим вище абразивна чутливість залежної змінної (знос, характеристики канавок) по відношенню до незалежної змінної.

Ефект впливу факторів	$F_N$	-	-	-	$F_N$
	$F_N$	$F_N$	$F_N$	$F_N$	$s$
	$r$	$r$	$r$	$r$	$\frac{WEH}{\sigma_M \sigma_Y}$
	$\frac{W_{ay}}{E}$	$\sigma_c$	$\gamma$	$E_c$	$r$
	Незалежна змінна	$2d$	$h$	$Dp$	$A_g$

Рисунок 3.2 – Ранжування абразивної чутливості до змінних системи дряпання з однією амплітудою [14]

Експерименти показали, що випробувані матеріали мають корелюючі показники зносостійкості, проте в кожній конфігурації домінуюча змінна механізму зношування відрізнялася. З точки зору зносостійкості, загартована мартенситна сталь показала найкращі результати у всіх досліджуваних тестових

системах, за нею слідує чистий мартенситний структурований матеріал. Багатофазна сталь призвела до найбільш серйозних втрат матеріалу.

Дослідження спрямовані на визначення оптимальних матеріалів, які забезпечують мінімальне зношування та тривалий термін служби обладнання у конкретних реальних умовах є пріоритетними інженерними завданнями. Для цього розробляється наукове підґрунтя прийняття рішень, щодо вибору сталей, їх структури, технології хіміко-термічної обробки у відповідності до режимів зношування та найбільш вагомих факторів впливу на поверхню тертя. Так, у роботі [15] досліджували низьковуглецеві сталі з різним співвідношенням та в'язкості та твердості: мартенситну сталь, мартенситну сталь термічно оброблена до нижчого бейніту, TRIP-сталь (клас міцності на розрив 700 МПа) та сталь, що пройшла загартування з розшаруванням (QP).

Сталі випробували на дроблення штифтом на диску і на зношування в шламовому барабані, в умовах абразивного та ударно-абразивного зношування з достатньо високим напруженням. Результати показали, що в обох досліджуваних умовах зношування найкраще працює мартенситна сталь бо має вищу початкову твердість. Тим не менш, перевага цієї сталі була меншою в шламонакопичувачі, ніж у випробуваннях штифтом на диску. З іншого боку, сталь TRIP показала низькі результати в випробуваннях штифтом на диску, але перевершила QP і менш бейнітні сталі в випробуваннях в шламовому котлі.

Були проведені детальні дослідження поверхневих і підповерхневих пошкоджень для вивчення реакції на зношування мікроструктурних складових сталей, щоб пояснити їх поведінку в різних умовах і виявили, що випробування на зношування на дробильно-штифтовому диску класифікує сталі відповідно до їх початкової твердості. Однак метод суспензії є більш реалістичним, якщо застосування передбачає удари на додаток до чисто абразивних умов.

На рисунку 3.3 зображено залежність величини зношування від мікротвердості та структурни складових матриці сталей.

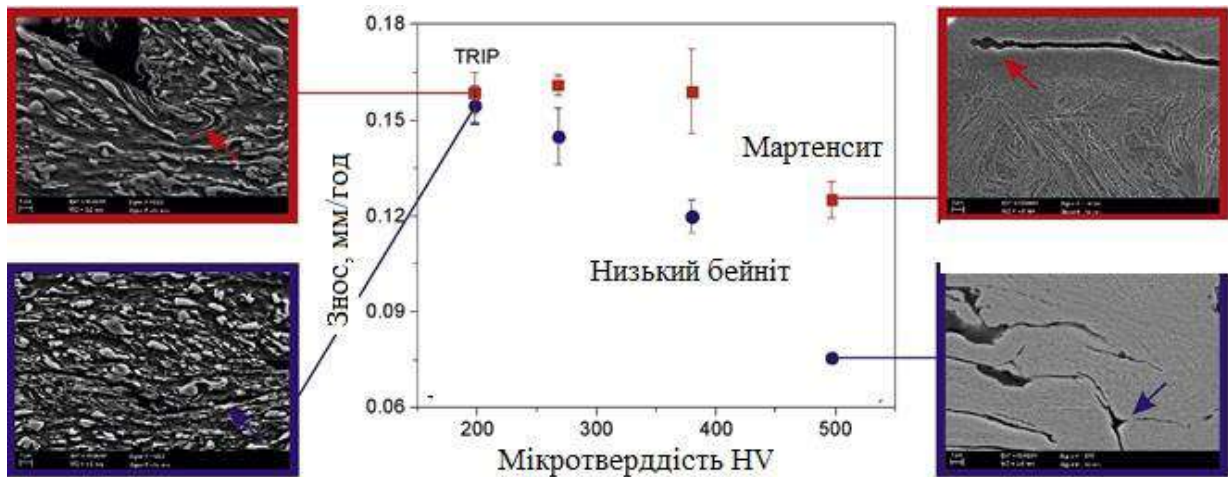


Рисунок 3.3 – Залежність величини зношування від мікротвердості та структурни складових матриці досліджуваних сталей [15]

Мартенсит виявляє більшу зносостійкість перед нижнім бейнітом в обох умовах зносу. При чистому абразивному зношуванні здатність мартенситу пластично деформуватися підвищила його зносостійкість завдяки механізму притуплення тріщин. В умовах ударного абразиву зниження ефективності мартенситу можна пояснити утворенням адіабатичних смуг зсуву. Нижній бейніт зазнає сильного зношування в умовах ударних навантажень головним чином через утворення тріщин на межі розділу карбід-матриця.

### 3.1 Вплив розміру абразивних часток на інтенсивність абразивного зношування сталей

Велика кількість досліджень була проведена для встановлення залежності швидкості АЗ від розміру абразивних частинок [16, 17].

Виявлена закономірність полягає у тому, що величина зношування зростає зі збільшенням розміру зерен, але лише до певного критичного розміру АЧ. При збільшенні розміру абразиву, збільшується швидкість зношування проте потім стабілізується на одному рівні. Визначено, що критичний розмір АЧ не залежить

від попередньої деформації зношеного матеріалу, навантаження, швидкості ковзання.

Режим зношування може переходити з режиму малоциклової втоми до режиму багатоциклової втоми при умові зменшення розміру абразиву нижче деякого нижнього критичного розміру за рахунок зменшення контактних напружень.

У роботі [17] досліджувалась що абразивна зносостійкість нетермооброблених і термооброблених сталей, отриманих в широкому діапазоні різних температур, і визначалася за допомогою штифтового абразивного верстата з п'ятьма різними шліфувальними листами. Втрату маси досліджуваного матеріалу під час абразивного зношування визначали гравіметрично. Результати для термічно необроблених сталей показують, що існує параболічна залежність між коефіцієнтом зносу і розміром абразивних частинок. Це узгоджується з аналогічними висновками в літературі. Встановлено, що існує лінійна залежність між абразивною зносостійкістю і твердістю залежно від розміру абразивних частинок. Відносна зносостійкість і твердість пов'язані лінійно для нетермооброблених сталей, і цей зв'язок не залежить від розміру абразивних частинок. Але відносна зносостійкість для термічно оброблених сталей залежить від розміру АЗ.

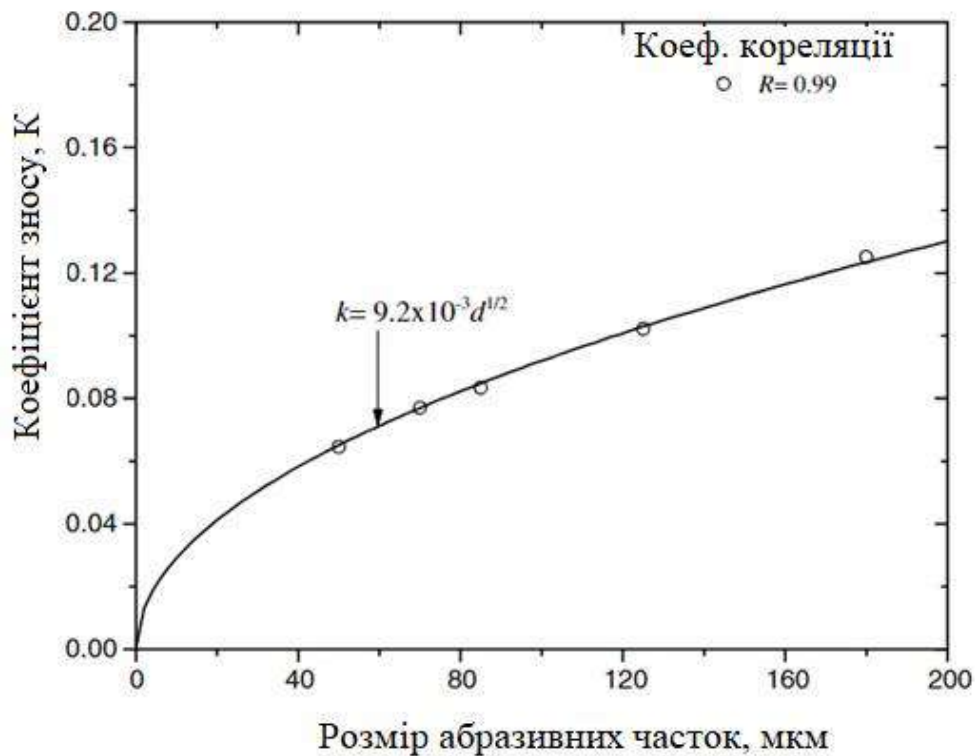


Рисунок 3.4 – Варіації коефіцієнта зношування k нетермічно оброблених сталей від розміру абразивних частинок d [17]

На рисунку 3.4 показано зміну коефіцієнтів зношування k від розміру абразиву d для нетермічно оброблених сталей. Як видно, залежність коефіцієнта зношування k від розміру абразиву d узгоджується з попередніми роботами. Однак результати показують, що хоча коефіцієнт зносу k спочатку швидко зростає зі збільшенням розміру абразивних частинок d, коефіцієнт зносу не досягає стабільного значення з точки зору критичного розміру частинок. Крім того, у міру збільшення розміру абразивних частинок нахил кривої зменшується. Співвідношення між коефіцієнтом зношування k і розміром частинок d визначається як

$$k = 9,2\sqrt{d} \quad (2.1)$$

де d – розмір частинок абразиву (м).

У роботі [18] досліджували абразивну поведінку багатьох матеріалів і зрозуміли, що забивання проміжків між більш дрібними абразивними зернами залишками зносу відповідає за ефект розміру зерна. Це зменшує кількість абразивних зерен, які контактують з поверхнею та видаляють матеріал, таким чином зменшуючи швидкість абразивного зношування.

В результаті збільшення коефіцієнта форми АЧ, як видно з рисунка 3.5 [19], інтенсифікується зношування низьколегованих сталей. Потрібно відмітити, що для сталей 65Г та 28MnB5, що застосовують для виготовлення робочих органів ґрунтообробних машин інтенсивність зношування на порядок нижча, ніж для сталі 45. Ймовірно, це пояснюється зміною механізму зношування поверхневих шарів, позаяк на поверхні сталі 45 зі збільшенням  $K_{\text{форми}}$  абразивних частинок розширюється площа, на якій спостерігається мікрорізання.

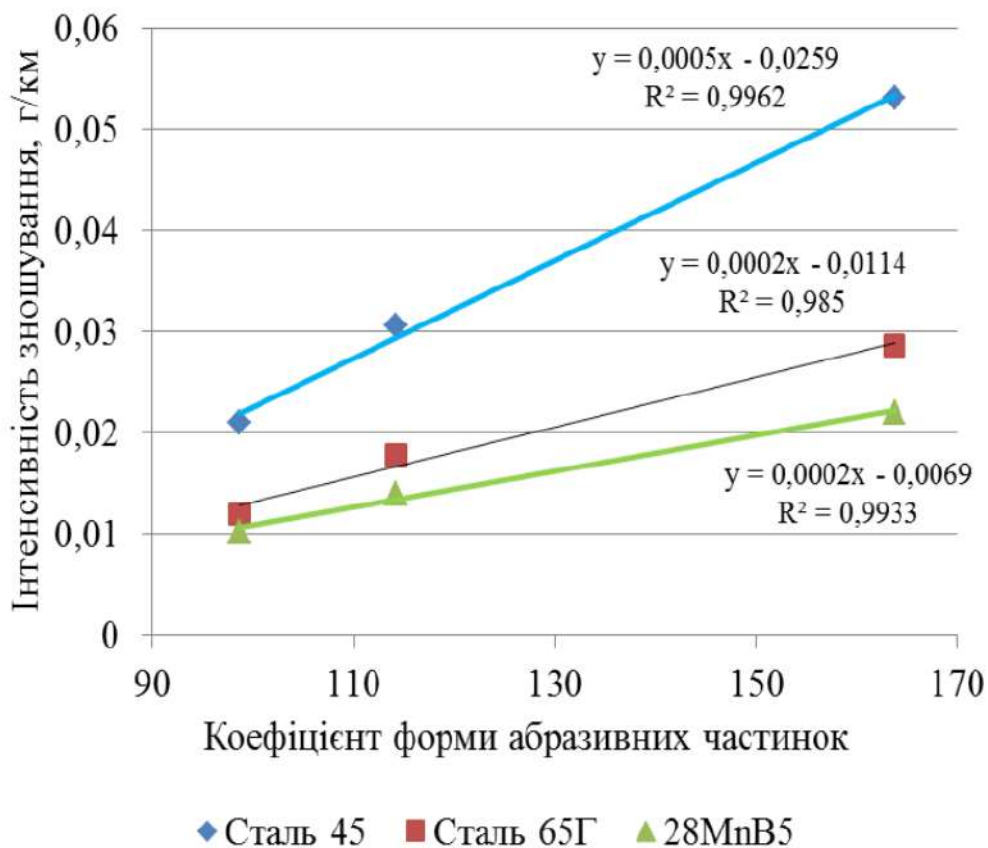


Рисунок 3.5 – Залежності впливу  $K_{\text{форми}}$  абразивних часток на інтенсивність процесу зношування [19]

Сталь 45 та 65Г загартувалися об'ємно при температурі 810...830°C і середнім відпуском із витримкою при температурі 460...480°C, для зразків зі сталі 28MnB5 проводили ступінчасту ТО з наступною дробоструменевою обробкою.

Було виявлено істотне зменшення  $K_{\text{форми}}$  для АЧ із великим коефіцієнтом форми як результат їх взаємодії з робочою поверхнею деталей.

Це пояснюється інтенсивнішою взаємодією з поверхнею матеріалу та утворенням граничних напружень завдяки незначній площі гострих граней АЧ.

Вплив розміру абразивних частинок на швидкість зношування досліджувався для дво- і трьохтільних схем взаємодії [20]. Встановлено, що швидкість зношування зростає зі збільшенням розміру частинок. Вище деякого критичного розміру швидкість зносу стає майже незалежною від подальшого збільшення розміру.

Ефект розміру є добре відомим явищем при АЗ дво- і трьохтільних схем, а також при ерозії частинок [21, 22, 23]. Ефект розміру означає, що для малих частинок швидкість зношування зростає зі збільшенням розміру частинок, що ілюструє рисунок 3.6.

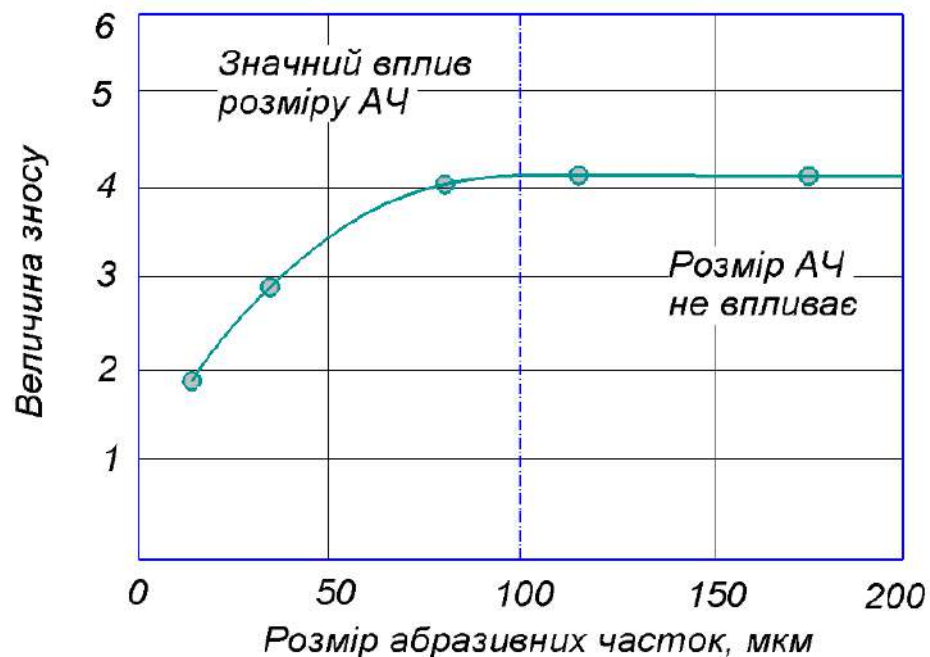


Рисунок 3.6 – Розмірний ефект при стиранні двох тіл [20]

Вище деякого критичного розміру частинок швидкість зношування стає майже незалежною від подальшого збільшення розміру і цей критичний розмір часто становить близько 100 мкм.

### 3.2 Вплив змінного навантаження на зношування вуглецевої сталі

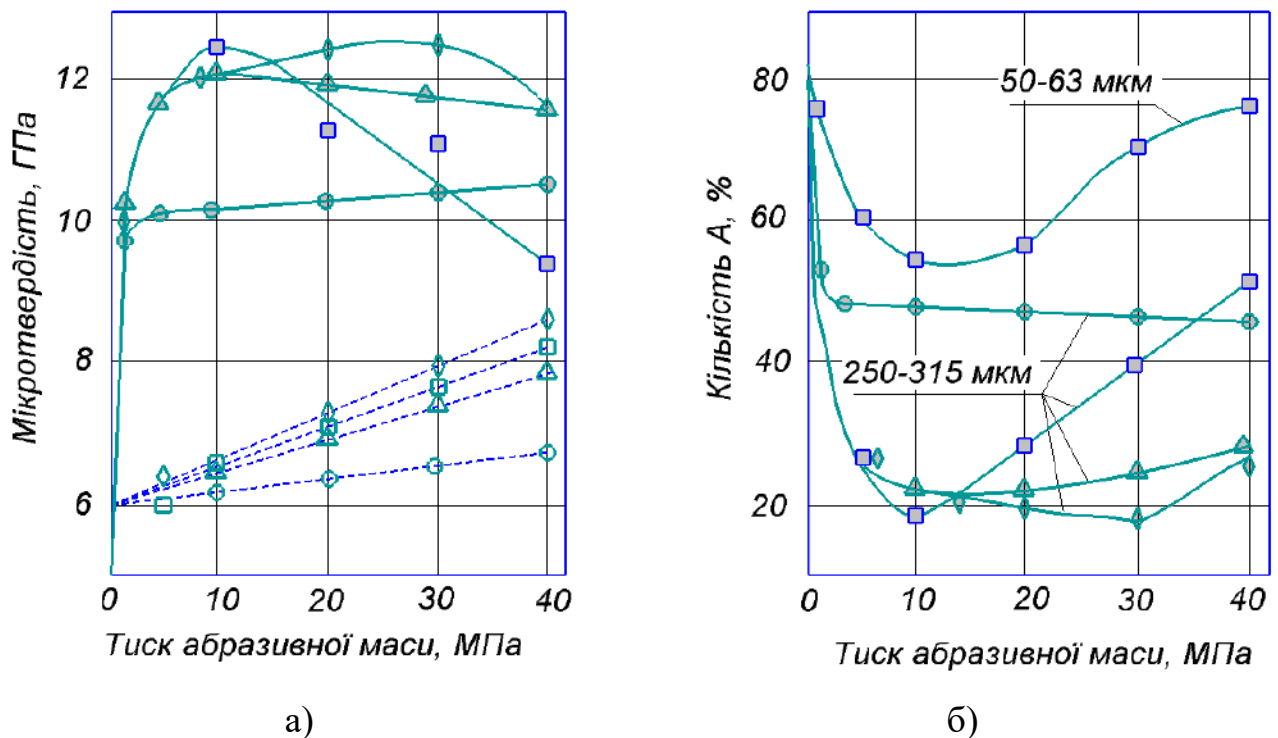
Деталі машин часто піддаються навантаженням, які змінюються у процесі роботи.

У роботі [15] проводили випробування на зношування м'якої сталі типу «штифт-на-диску» в контактi з самою собою проводили в умовах без змащення у вологому повітрі, щоб дослідити вплив змін у навантаженні на перехід між сильним і легким зношуванням. Навантаження змінювалося поетапно між низьким і високим рівнями один або два рази під час певних тестів. У випробуваннях на знос під постійним навантаженням спостерігається сильний знос при високих рівнях навантаження, а легкий знос при низьких рівнях навантаження. Після того, як на першій стадії під час легкого зношування при низькому навантаженні утворилися окислені, загартовані поверхні зношування, режим зношування змінюється на «квазі-помірне зношування» з низькою швидкістю при високому навантаженні на останньому етапі. Діапазон навантажень, де низький рівень зношування може підтримуватися при квазі-помірному зношуванні, розширюється до більш високого рівня навантаження після зміни навантаження. Після створення квазі-м'якої поверхні зносу режим зносу можна підтримувати навіть при високому навантаженні протягом дуже великої відстані ковзання.

Встановлено [24], що для сталі X12Ф1 рівень зміцнення поверхні металу у метастабільному стані, повнота  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення та інтенсивність зношування істотно залежать від тиску АЧ на поверхню, що зношується. Максимальне зміцнення (рис. 3.7, а) корелює з конкретною величиною тиску для кожного виду

абразиву, а мікротвердість поверхні досягає 10,5...12,5ГПа, тоді як у вихідному стані вона складала приблизно 6ГПа. При збільшенні тиску мікротвердість стабілізується або в незначній мірі знижується.

Висока здатність до зміцнюваності сплавів у структурі яких наявний метастабільний аустеніт пов'язана з процесом  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення у поверхневих шарах. Повнота та об'єм цього перетворення з ростом навантаження прямо характеризує ступінь зміцнення (рис. 3.7, а і 3.7, б). Встановлене зниження об'єму перетворення і зміцнення поверхні зразків при подальшому збільшенні навантаження є наслідком подрібнення початкового зернового складу абразивних матеріалів.

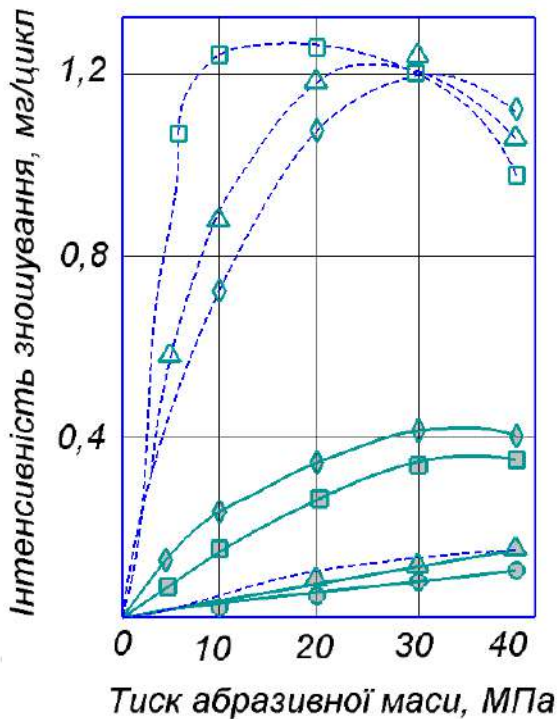


суцільні лінії – сталь у метастабільному стані, штрихові – у стабільному стані;

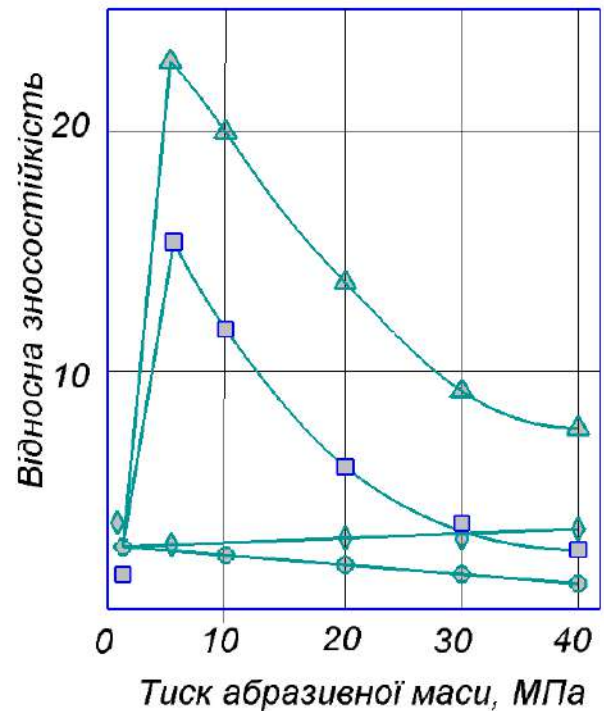
□, ■ – пісок; Δ, ▲ – шамот; ◇, – електрокорунд; ○, ● – магнезит

а) Залежність мікротвердості від тиску АЧ, б) Залежність кількості аустеніту від тиску АЧ

Рисунок 3.7 – Залежність а) мікротвердості та б) вмісту аустеніту сталі X12Ф1 від тиску абразивної маси [24]



а)



б)

суцільні лінії – сталь у метастабільному стані, штрихові – у стабільному стані;

□, ■ – пісок; Δ, ▲ – шамот; ◇, – електрокорунд; ○, ● – магнезит

а) Залежність інтенсивності зносу від тиску АЧ, б) Залежність відносної зносостійкості від тиску АЧ

Рисунок 3.8 – Залежність в) інтенсивності зношування та г) відносної зносостійкості сталі X12Φ1 від тиску абразивної маси [24]

Величина тиску абразивної маси також істотно впливає на інтенсивність зношування (рис. 3.8, а). Спочатку, за тиску до 5...10МПа,  $I_q$  зразків зі стабільною структурою зростає майже за лінійним законом. При подальшому збільшенні тиску інтенсивність зростання  $I_q$  зменшується.

Істотна відмінність у рівні зносостійкості зразків у стабільному і метастабільному стані (рис. 3.8, а) пояснюється різним ступенем їхнього зміцнення в процесі зношування. Висока мікротвердість та зносостійкість сталей з метастабільною аустенітною структурою, у поверхневих шарах яких відбувається інтенсивне  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення, є наслідком глибоких змін тонкої структури, пов'язаних із цими перетвореннями.

### 3.3 Вплив комбінованого ударного-абразивного контакту на зношування низьколегованих сталей

Ударно-абразивне зношування широко розповсюджене у багатьох галузях промисловості: збагаченні корисних копалин, переміщенні ґрунту, гірничодобувній промисловості, сільському господарстві, тому його досліджувало багато вчених [25, 26, 27].

Загальним для абразивного зношування є сильний вплив твердості частинок на результуючу швидкість зношування абразивного матеріалу: частинки з нижчою твердістю, ніж твердість абразивної поверхні, призводять до набагато нижчої швидкості зношування, ніж більш тверді частинки. Експериментально було показано, що абразивна частинка може спричинити пластичні подряпини на поверхні, лише якщо її твердість принаймні в 1,2 рази перевищує твердість абразивної поверхні [28], і, отже, твердість матеріалу може бути використана як хороший перший показник опору матеріалу до стирання. однак використання значення твердості як параметра для прогнозування зносостійкості матеріалів, що піддаються стиранню, слід використовувати з обережністю. це пов'язано з тим, що на зносостійкість матеріалу в даній трибосистемі сильно впливають параметри системи (тип середовища, абразивні частинки, температура тощо), а також інші параметри матеріалу (в'язкість, здатність до зміцнення тощо).

Було визначено [29] кореляцію з властивостями типових абразивів, що зустрічаються в гірничодобувному середовищі при двотільній схемі взаємодії. Досліджувалася мартенситна низьколегована сталь наступного складу: 0,34% С, 1,5% Cr, 1,55% Ni та 0,25% Mo. Залежність представлено на рисунку 3.9.

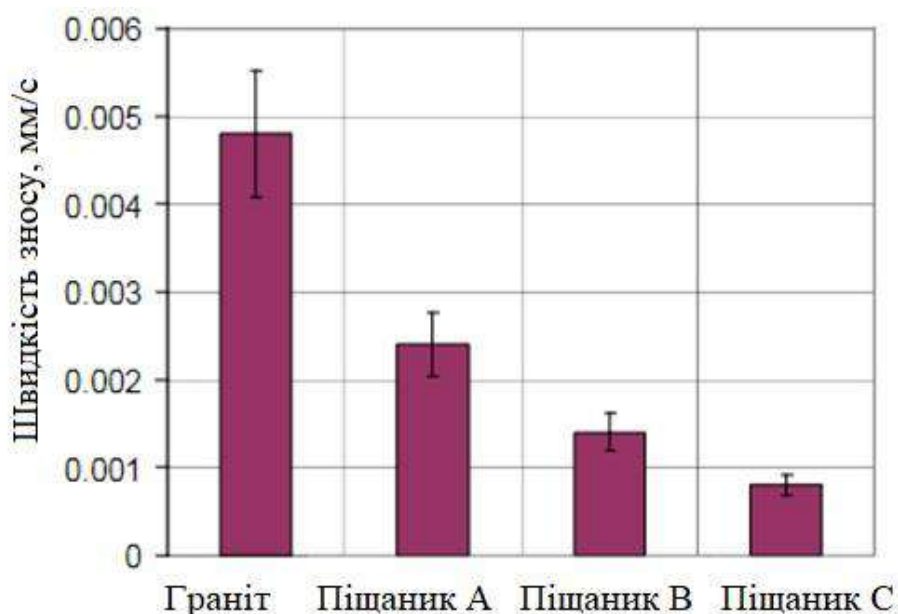


Рисунок 3.9 – Швидкість зносу при циклічному ударному стиранні з різними абразивами (граніт, піщаник А, піщаник В та піщанику С) [29]

Найвища швидкість зносу спостерігалася, коли зразки випробували з гранітом. Граніт спричиняє в 6 разів більше зношування порівняно з піщаником С, у 2,5...3 рази більше зношування порівняно з пісковиком В і в раз більше порівняно з пісковиком А, що ілюструє рисунок 3.10.

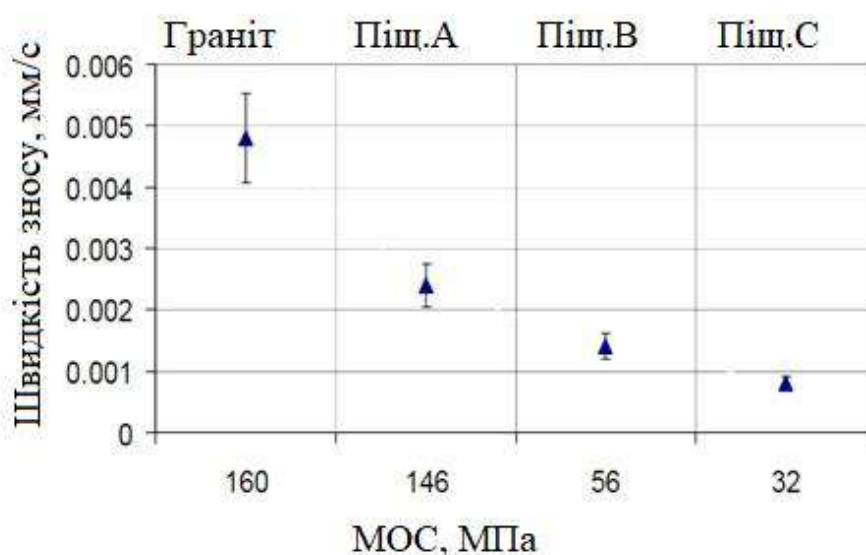


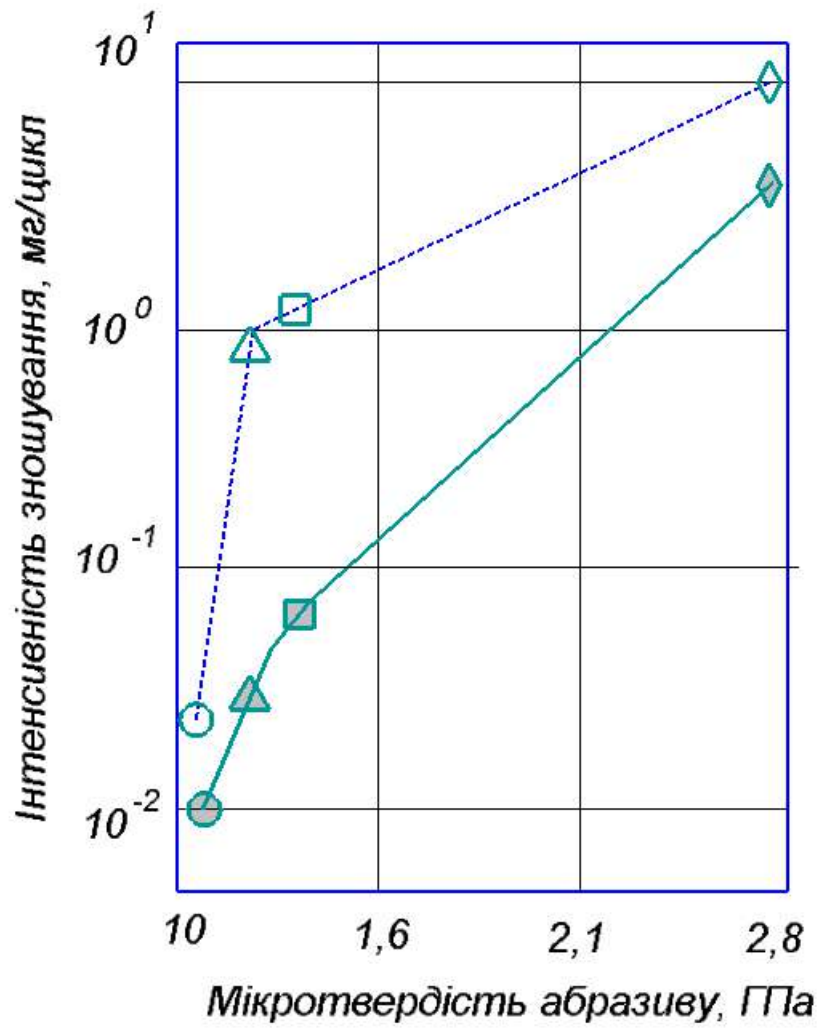
Рисунок 3.10 – Кореляція між міцністю на одноосьовий стиск (МОС) та швидкістю зносу граніту, піщанику А, піщанику В та піщанику С

Результати свідчать про значний вплив абразивних властивостей на швидкість зношування. Гірські породи з високою МОС викликають зношування через такі механізми, як різання та мікроорання, тоді як породи з проміжним значеннями МОС викликають пластичну деформацію та утворення абразивних канавок.

### 3.4 Вплив твердості абразивних часток

Твердіть вихідного матеріалу має дуже значний вплив на зносостійкість деталей в умовах абразивного зношування. Багатьма авторами встановлено, що величина зношування може коливатися в значних межах в залежності від властивостей абразивного середовища. Зношування у режимі пластичного деформування характерне для середовищ з абразивами більш низької твердості, в той час як при збільшенні твердості АЧ можливість мікрорізання поверхні контакту значно зростає, що призводить до підвищення інтенсивності зношування.

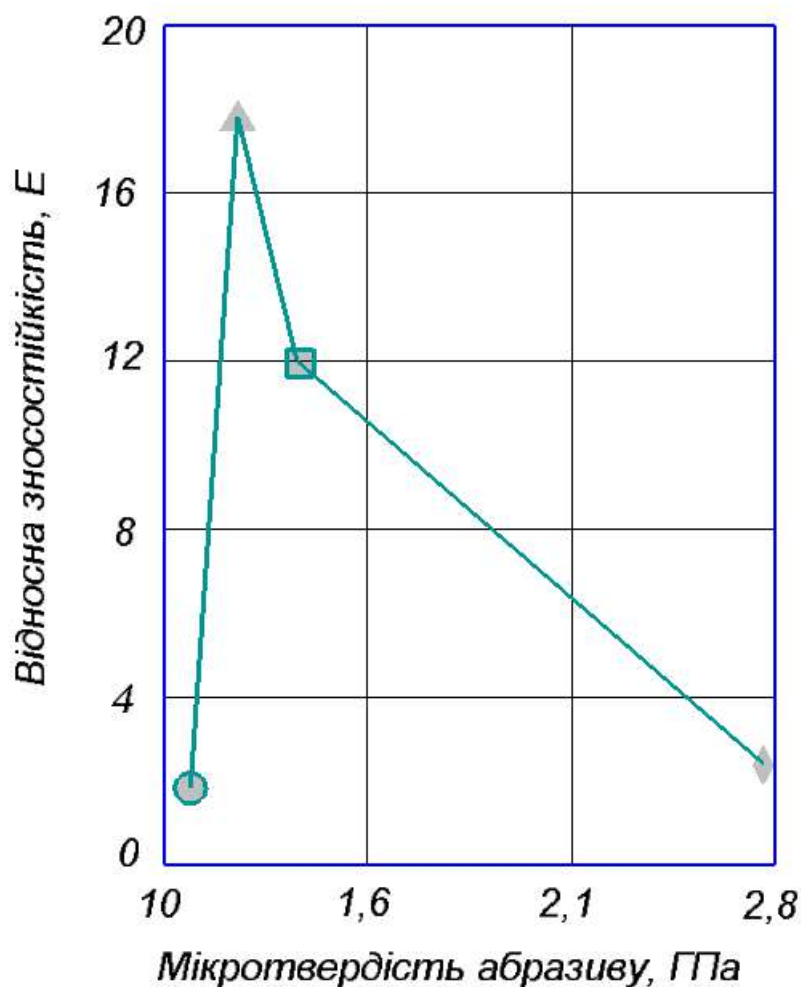
Дослідження [24] показують, що за однакової вихідної твердості сталь Х12Ф1 зі структурою метастабільного аустеніту має вищий рівень зносостійкості порівняно з цією ж сталлю, що має стабільну структуру. Величина питомого зносу зростає зі збільшенням твердості абразивних матеріалів, що видно з рисунку 3.11, 3.12)



суцільні лінії - сталь у метастабільному стані, штрихові - у стабільному стані;

□, ■ - пісок; Δ, ▲ - шамот; ◇, ◆ - електрокорунд; ○, ● - магнезит

Рисунок 3.11 – Залежність інтенсивності зношування сталі Х12Ф1 від мікротвердості абразивних матеріалів [24]



■ - пісок; ▲ - шамот; ◆ - електрокорунд; ● – магнезит

Рисунок 3.12 – Залежність відносної зносостійкості сталі X12Ф1 від мікротвердості абразивних матеріалів [24]

Електрокорунд, маючи високу твердість і міцність, хоча й викликає глибоке  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення, значне зміцнення поверхневих шарів (понад 12ГПа), набагато твердіший за зміцнену поверхню тертя ( $H_a/H_m > 2$ ). Тому він зношує сталь зі стабільною структурою тільки в 2,4 раза інтенсивніше, ніж із залишковим метастабільним аустенітом (рис. 3.12).

### 3.5 Вплив форми абразивних часток

Форма АЧ, як було показано [19] також значно впливає на процес зношування, а саме на його механізм та інтенсивність. Якщо в частинках абразивної суміші є гострі грані, то вірогідність мікрорізання збільшується.

Тененбаумом М.М. було запропоновано критерій форми АЗ для можливості оцінки часток однієї фракції [30]:

$$K_{\phi} = \frac{M(n_i)M(D_i-d_i)}{M(R_i)} \quad (3.1)$$

де  $M(n_i)$  – математичне очікування для числа вершин;

$M(R_i)$  – математичне очікування для радіусів абразивних часток;

$M(D_i-d_i)$  – математичне очікування щодо кількості вершин, що описують простір навколо контуру та вписаних у контур АЗ.

Берштейном Д. Б. запропоновано визначення коефіцієнта форми абразивних частинок за формулою [31]:

$$K_{\phi} = \frac{M(N)}{M(r) \cdot M(B/L)} \quad (3.2)$$

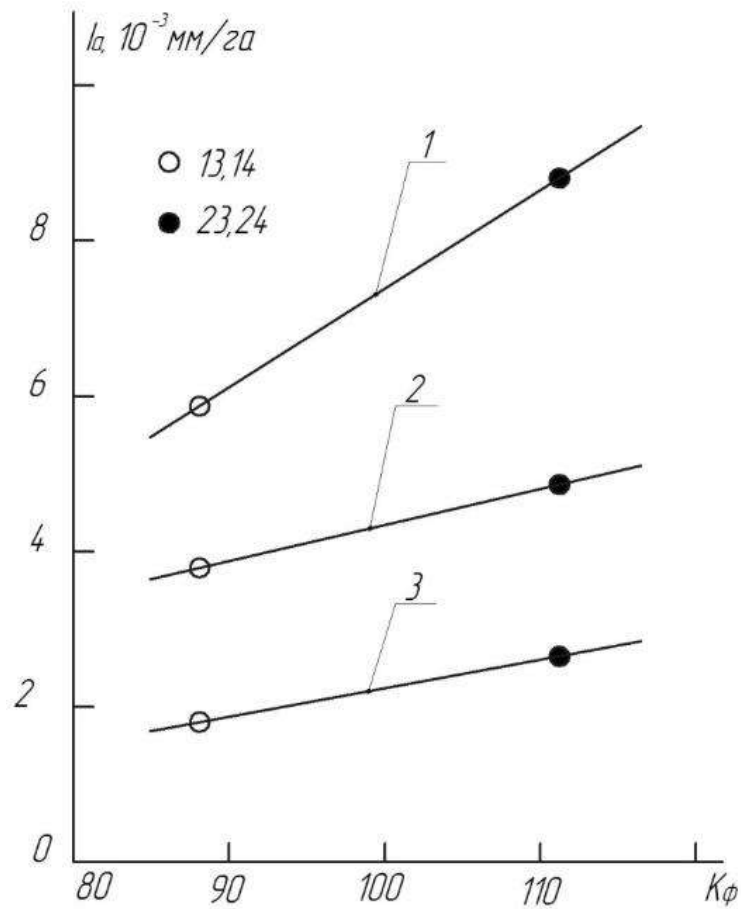
де  $N$  – кількість виступів АЧ;

$r$  – радіуси виступів АЧ;

$L$  – найбільше значення поздовжнього розміру абразиву;

$B$  – найбільше значення поперечного розміру.

Автори [19] показали, що зі збільшенням коеф. форми АЧ інтенсивність зношування ( $I_a$ ) зростає, що ілюструє рисунок 3.13.



Матеріал леміша – сталь Л-53: 1 – твердість 35-40 HRC, 2 – 45-50 HRC, 3 – лезо леміша зміцнено твердим сплавом ПГ-УС 25

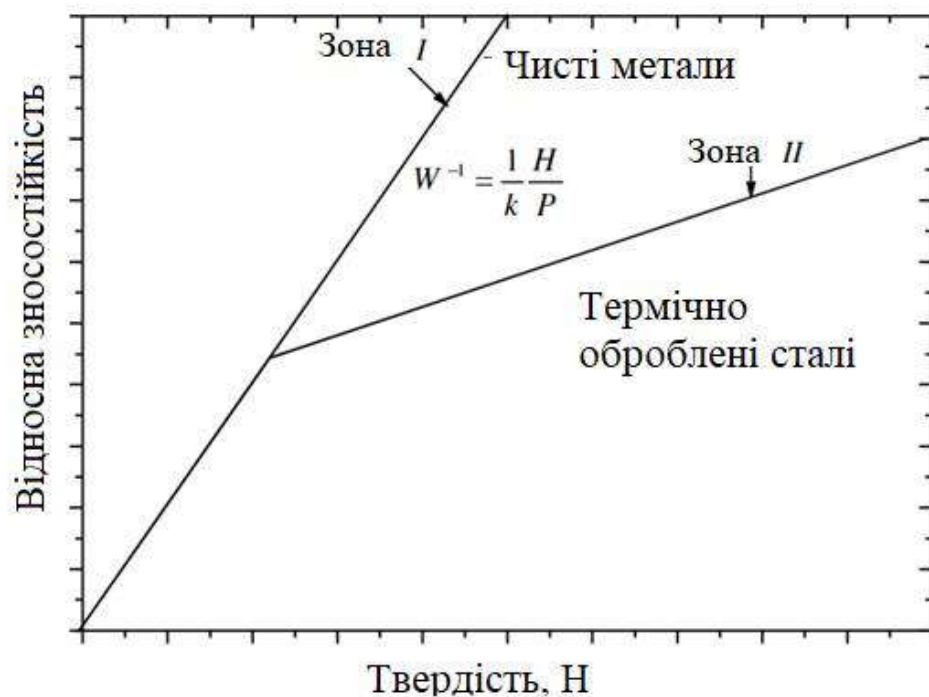
Рисунок 3.13 – Залежність інтенсивності зношування  $I_a$  лемішів плугів від коефіцієнта форми ґрунтових абразивних частинок  $K_\phi$

Зі збільшенням  $K_{\text{форми}}$  абразивних частинок зношувальна здатність ґрунту збільшується.

## 4 ВПЛИВ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛУ НА АБРАЗИВНУ ЗНОСОСТІЙКІСТЬ

### 4.1 Твердість як критерій зносостійкості низьколегованих сталей

На рисунку 4.1 представлена залежність зносостійкості від твердості сталей AISI 1010, 1030, 1040, 1050.



$W$  – лінійна щільність зношування,  $k$  – коефіцієнт зношування,  $P$  – тиск, прикладений до поверхні,  $H$  – твердість стираного матеріалу

Рисунок 4.1 – Залежність зносостійкості від твердості [32]

Для чистих металів і відпалених сталей залежність зносостійкості від твердості є лінійною, що проходить через початок координат. Ця зона позначена зоною I. Стійкість до АЗ з підвищенням твердості термічно оброблених сталей є лінійною, що не проходить через початок координат. Зона, що відповідає цьому, позначена зоною II. Зони II та I подібні до виразу адгезивного зносу Арчарда. Зміна коефіцієнта зношування  $k$  залежно від розміру абразивного зерна є основною причиною цього.

Крім того, було визначено наступне співвідношення в зоні II між відносною зносостійкістю термічно оброблених сталей і твердістю [32]:

$$\varepsilon = (\varepsilon_0 - C_0 H_0) + C_1 H \quad (4.1)$$

де  $\varepsilon_0$  – відносна зносостійкість,  
 $H_0$  – твердість відпаленої сталі,  
 $C_0, C_1$  – константи.

У роботі [33] було показано, що існує лінійна залежність між твердістю сталі (чистого металу) та її зносостійкістю. Встановлено, що сталі з різною мікроструктурою, такою як загартовані, відпущені та леговані, демонструють різний рівень зносостійкості, незважаючи на однакову твердість [34]. Випробування показують [35], що, незважаючи на загальну твердість, мікроструктура сталі має значний вплив на зносостійкість: об'ємна частка і розмір карбідів можуть бути важливими параметрами, що впливають на швидкість зношування. Результати випробувань на знос, проведених на дискових штифтах з різними сталями, які спрямовані на вивчення зносу, підтвердили, що мікроструктура впливає на зносостійкість більше, ніж об'ємна твердість.

З точки зору розробки нових матеріалів, підвищення як початкової твердості, так і зміцнення є проблемою. Твердість мартенситної структури покращується за рахунок збільшення вмісту вуглецю, але це може зробити матеріал більш чутливим до впливу гартування, що може призвести до крихкості при кімнатній температурі. Деформаційне зміцнення мартенситних матеріалів контролюється декількома морфологічними особливостями мікроструктури, такими як попередній розмір зерна аустеніту і мартенситні блоки, що залежать від легуючих елементів і параметрів процесу гарячої прокатки. Для досягнення промислових вимог часто потрібен компроміс між твердістю матеріалів і їх експлуатаційними властивостями. Висока твердість обмежує в'язкість, пластичність і оброблюваність (наприклад, здатність до різання і згинання), а

збільшення вмісту вуглецю для підвищення твердості також може негативно впливати на зварюваність матеріалу.

Під час процесів зношування часто спостерігаються значні зміни в мікроструктурі зони контакту і приповерхневої області під нею через високу інтенсивність пластичної деформації. З цієї причини важко використовувати типові параметри початкової мікроструктури для опису поведінки при зношуванні. У дослідженні [36], на основі простого правила сумішей, була розроблена нова модель "еквівалентної твердості" для опису абразивного зношування сплавів на основі заліза за схемою двох тіл. Еквівалентна твердість дорівнює сумі добутків об'ємної частки кожної фази (матриці та карбїду) на її твердість. При цьому враховувалася твердість зміцненої матриці, виміряна після випробування на зношування. Пропонується використовувати цю модель для аналізу поведінки при абразивному зношуванні, тоді як типових вихідних параметрів, таких як об'ємна твердість, мікротвердість, залишковий аустеніт і об'ємна частка карбїду, недостатньо для його аналізу.

Підсумовуючи вищесказане у розділі 4, стає очевидним, що фізико-механічні властивості матеріалу, який працює в умовах абразивного зношування сильно впливають на зносостійкість. Також критичний вплив на зносостійкість матеріалу має його структурний стан як на початку роботи так і впродовж часу.

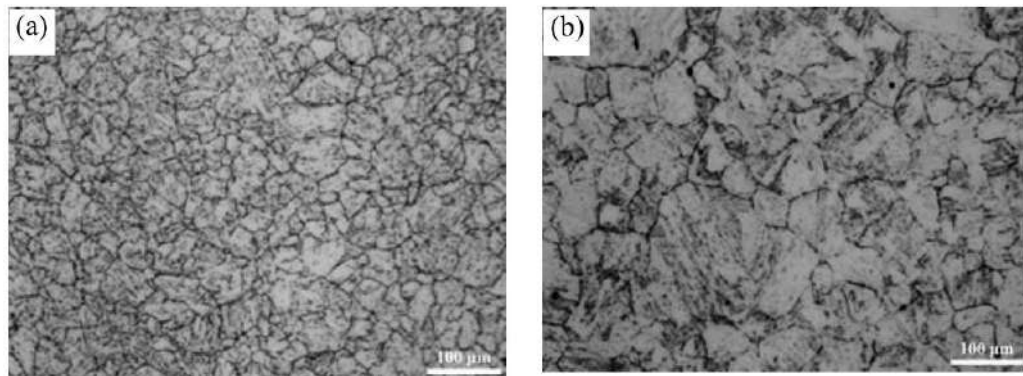
#### 4.2 Вплив мікроструктури та фазового стану низьколегованих сталей на зносостійкість

Результати для чистих металів показують, що існує лінійна залежність між зворотною втратою об'єму (тобто зносостійкістю) і твердістю металу, як було встановлено попередніми дослідниками, однак для термічно оброблених сталей виявлено нелінійну залежність [37], тобто це вказує на значний вплив мікроструктури на зносостійкість.

Мартенсит або мартенсит з рівномірно розподіленими в ньому карбідами раніше вважався оптимальною структурою для умов АЗ, одночасно присутність аустеніту в структурі була недоцільною. Наразі встановлено, що за певних умов зношування слід формувати не чисто мартенситну, а мартенситно-аустенітну або мартенситно-аустенітно-карбідну структуру, незважаючи на їх меншу твердість. Переваги сталей з аустенітно-мартенситною або аустенітно-мартенситно-карбідною структурою полягають у кращій пластичності, здатності до релаксації мікронапруг та переддеформації під час зношування; аустеніт краще, ніж мартенсит, утримує карбіди, що знаходяться в ньому, від викришування тощо. Стабільність аустеніту залежить від концентрації вуглецю у сталі та ступеня її легування, а його стабільність тим вища, чим нижче положення точок  $M_n$  і  $M_k$ . При відповідній термічній або хіміко-термічній обробці він може бути отриманий і в робочих шарах цементованих деталей, виготовлених з низьколегованих конструкційних сталей типу 20ХГНР, 25ХМ, 30ХГТ та ін.

У роботі [38] порівнювали тертя ковзання та властивостей зношування низьколегованої зносостійкої сталі Hardox400 та NM400 при кімнатній температурі. Результати показують, що механізм зносу двох типів випробуваних сталей в основному проявляється як абразивний і втомний знос. Мартенситно-бейнітна подвійна фазова структура в Hardox400 добре поєднується між міцністю та в'язкістю, а показники зносостійкості кращі, ніж у NM400 мартенситної структури.

Результати випробувань показали, що твердість Hardox400 аналогічна твердості NM400. Вміст вуглецю в нижньому бейніті в складній фазі Hardox400 є низьким, і більшість вуглецевих елементів у матриці беруть участь у формуванні мартенситу, що робить мартенситну структуру більш твердою. У Hardox400 початковий розмір аустенітних зерен менший, а щільність меж зерен у структурі з більшими кутами є вищою, що сприяє отриманню більшої твердості матричної структури [39]. За умови коли твердість матеріалу однакова, на зносостійкість матеріалу головним чином впливає міцність матриці [40, 41].



а)

б)

а) – сталь Hardox 400, б) – сталь NM400

Рисунок 4.2 – Аустенітна морфологія сталі сталей [38]

Структура нижнього бейніту в комплексній фазі Hardox400 розподілена між мартенситом, який може ефективно пригнічувати ріст тріщин, завдяки чому міцність Hardox400 у складній фазі Hardox400 є кращою, ніж міцність NM400 у мартенситі. Матриця Hardox400 є відносно рівномірною, що збільшує площу межі зерен та зменшує швидкість росту тріщин у матриці та покращує міцність матриці [42].

Таким чином показано, що при однаковій твердості зносостійкі властивості зносостійкої сталі залежать від мікроструктури матеріалу. В умовах випробування зносостійкість при ковзанні у зносостійкої сталі Hardox400 з двофазною структурою мартенситно-бейнітного типу є кращими, ніж у NM400 зносостійкої сталі з матричною структурою мартенситу.

Як показано [43], ударно-абразивна стійкість литої сталі 35ГЛ найбільша при 0,4%С і при додатковому легуванні карбідоутворюючими елементами, найбільшу дію мають Mn, Ti, Mo, проте Cr, В відіграють другорядну роль. Підвищення ударо-абразивної стійкості в загартованому стані найбільше спостерігається для С, Mn і Ti. Це пояснюється утворенням твердих карбідів відповідних елементів за наявності достатньо міцної та пластичної металевої матриці, здатної утримувати вуглеці при складному ударно-абразивному зношуванні.

Випробування у роботі [44] на абразивне зношування були проведені на двох метастабільних аустенітних сталях (1,2% мас. С, 2% мас. Si) з різним вмістом марганцю (2,5 і 3,5% мас.), відпалених ізотермічно при 250°C.

На рисунку 4.3 представлена відносна абразивна зносостійкість сталей 120Mn2Si2 і 120Mn3Si2 після різних умов відпалу.

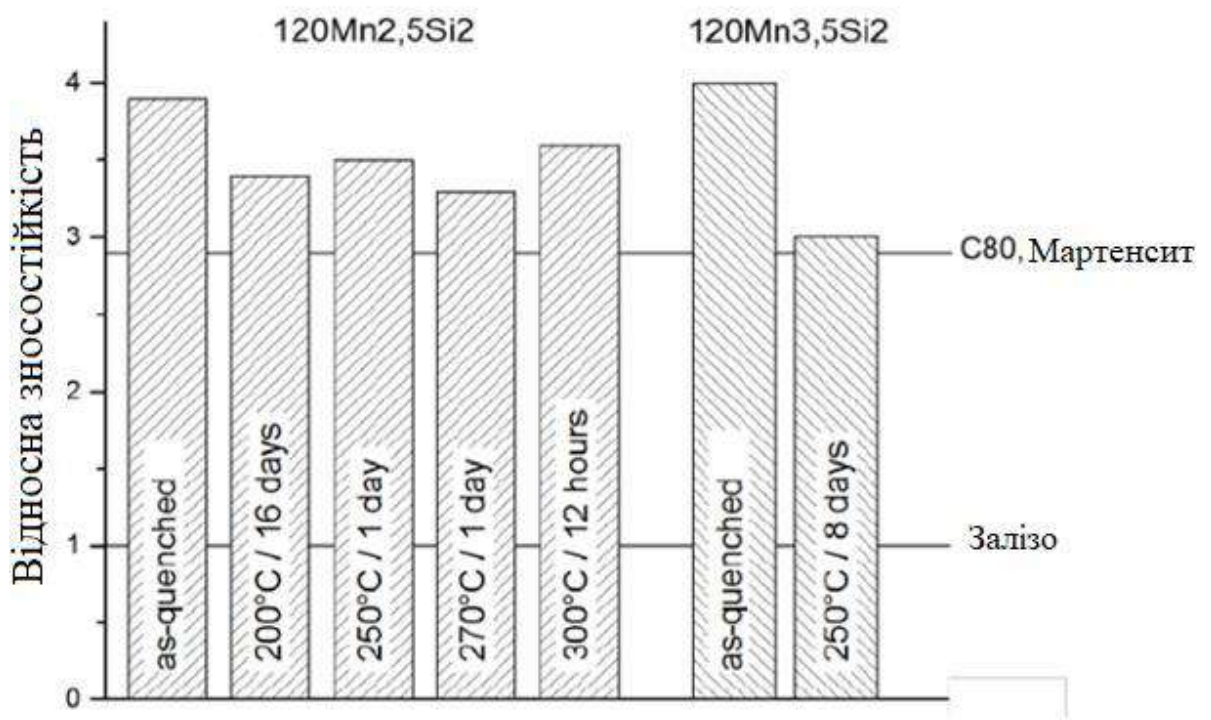
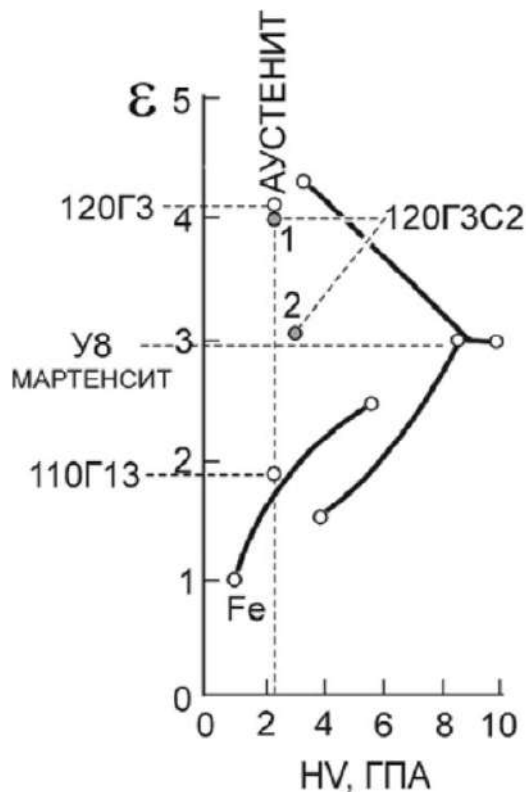


Рисунок 4.3 – Відносна абразивна зносостійкість сталей 120Mn2Si2 і 120Mn3Si2 після різних умов відпалу. Для порівняння наведено абразивну зносостійкість нелегованої інструментальної сталі з 0,8% С (обробленої до максимальної твердості) [44]

Обидві сталі демонструють дуже добру стійкість до абразивного зношування, особливо в метастабільному аустенітному стані, а також після відпуску. Результати показують, що високовуглецеві низьколеговані сталі з вмістом марганцю близько 3 % є ефективними в умовах, де важлива висока абразивна зносостійкість. Для обох сталей абразивна зносостійкість найвища в незагартованому стані. Відпал викликає лише незначне зниження абразивної зносостійкості.

На рисунку 4.4 представлена діаграма залежності відносної зносостійкості  $\epsilon$  від твердості HV.



1 – після загартування від 1000°C, 2 – з додатковою ізотермічною обробкою 8 діб. при 250°C

Рисунок 4.4 – Результати випробувань сталі після ТО на діаграмі "Відносна зносостійкість  $\epsilon$  – твердість HV" для сплавів на основі заліза [11, 45]

Випробування [11] на абразивне зношування показали (рисунок 4.4), що після загартування від 1000°C зносостійкість сталі 120ГЗС2 наближається до максимально можливої для матриці сплавів на основі заліза (рис. 4.4, точка 1). Після ізотермічної обробки зносостійкість хоча й знижується, але все одно залишається на досить високому рівні і відповідає зносостійкості невідпущеного мартенситу з концентрацією вуглецю 0,8% (рис. 4.4, точка 2).

## **5 СПОСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЛЯ ПРЕДИКАТИВНОГО АНАЛІЗУ УМОВ ЗНОШУВАННЯ ТА ОПТИМАЛЬНОГО ВИБОРУ СТАЛЕЙ**

Для прогнозування терміну служби деталей, важливо розуміти механізми їх зношування, що проявляються у процесі роботи, і якісний вплив різних параметрів. На зношування впливають як властивості матеріалу, так і властивості абразивних частинок та зовнішні умови, тобто цей процес є багатокритеріальною системою.

Актуальною є проблема невідповідності експериментальних лабораторних та польових (отриманих у реальних умовах) даних зношування. До цього моменту немає достатньо надійних модельних схем, які б враховували усі критерії для переходу від простих схем випробувань на тертя та абразивне зношування до реальних умов роботи механізмів. Велика кількість невизначених та неврахованих факторів впливу призводить до неефективного вибору матеріалів та їх початкових фізико-механічних властивостей.

Чинники, які впливають на характер та інтенсивність зношування також впливають і залежать один від одного, а характеристики зносу є комплексним результатом взаємодії цих факторів. Отже, будь-яка невелика зміна одного чинника може спричинити зміну характеру зношування (ступеня зносу, форми зносу).

### **5.1 Методи метрологічного контролю зносостійкості сталей**

Значна кількість вимірюваних параметрів якості деталей при зношуванні потребує обґрунтованого підходу при виборі найбільш ефективних та економічних способів їх визначення. Хоча методи неруйнівного контролю

набули широкого використання, важливо зауважити, що універсального методу, який здатен виявляти весь перелік необхідних показників, не існує. Таким чином, кожен конкретний метод досліджень спрямований на розв'язання обмеженого кола завдань [46].

На сьогоднішній день, відсутність єдиної узагальненої методики вимірювань, яка дозволяє оцінювати відносину зносостійкість сталей за узгодженими методологічними принципами, ускладнює ефективне застосування накопиченого досвіду різних авторів у питаннях вирішення підвищення зносостійкості деталей [47].

Потреба отримання достовірних даних під час проведення дослідів обумовлює необхідність вирішення питань єдиних прийнятих методик та метрологічного забезпечення вимірювань відносної зносостійкості сталей. Можливість забезпечення коректної порівняльності результатів експериментів також є нагальною.

Для проведення випробувань на зносостійкість сталей в даний час використовуються лабораторні та натурні методи. Натурні методи мають значну перевагу у достовірності, бо випробування деталей здійснюються безпосередньо в реальних умовах. Результати отримані при цьому оцінюють за зміною службових характеристик деталей або пар тертя, за зміною їх розмірів та непрямыми методами, що вказують на критичні рівні зношування.

Зазвичай розмір зносу визначають, проводячи вимір втрати лінійних і масових параметрів деталей після випробування. Також широко використовується метод штучних баз – вимірювання зміни величини заглиблення, яке попередньо вирізане на поверхні тертя за допомогою діамантового різця.

Але через значну тривалість та ціну практичного впровадження натурних випробувань і через необхідність демонтажу деталей машин для встановлення величини зносу спонукали до застосування на практиці лабораторних методів. Їх класифікація наведена на рисунку 5.1.

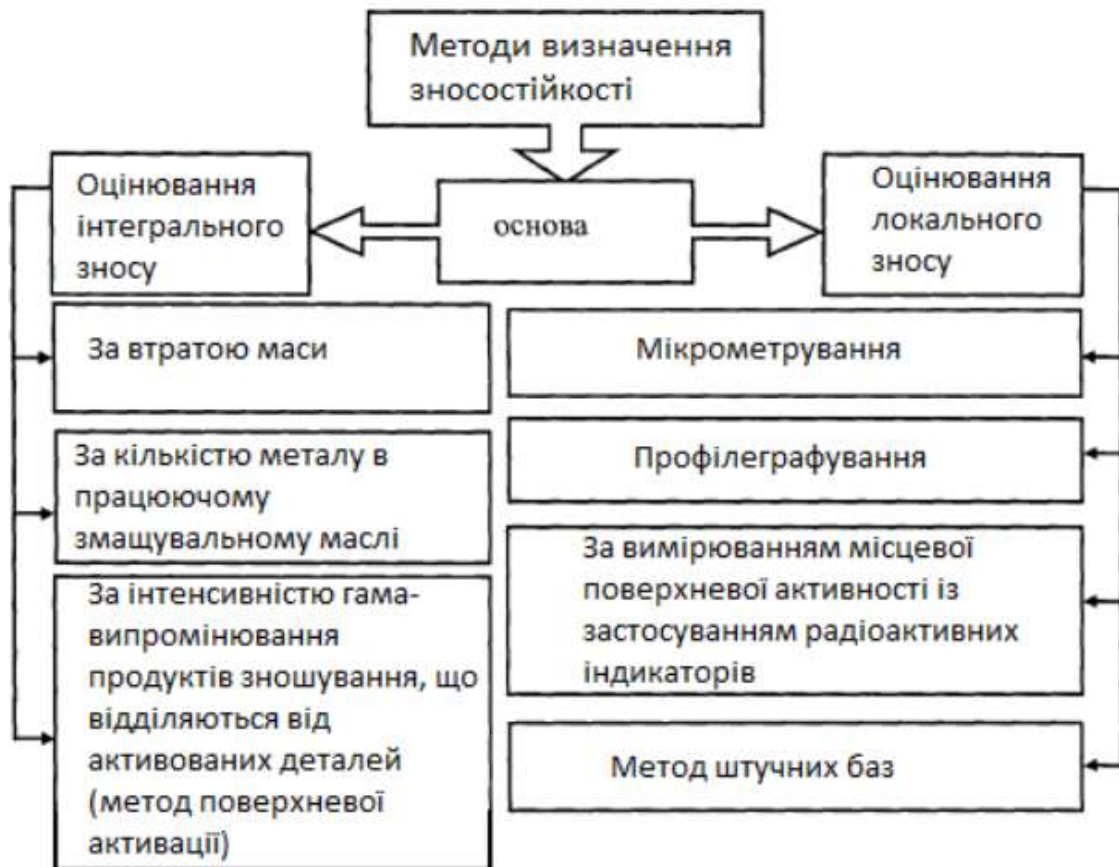


Рисунок 5.1 – Класифікація методів визначення зносостійкості [48]

Методи випробувань на зносостійкість в основному полягають у оцінюванні інтенсивності зношування досліджуваного матеріалу з абразивами, що обираються у відповідності до поставлених задач. Втрата лінійних розмірів деталей при цьому найбільш точно характеризує процес АЗ.

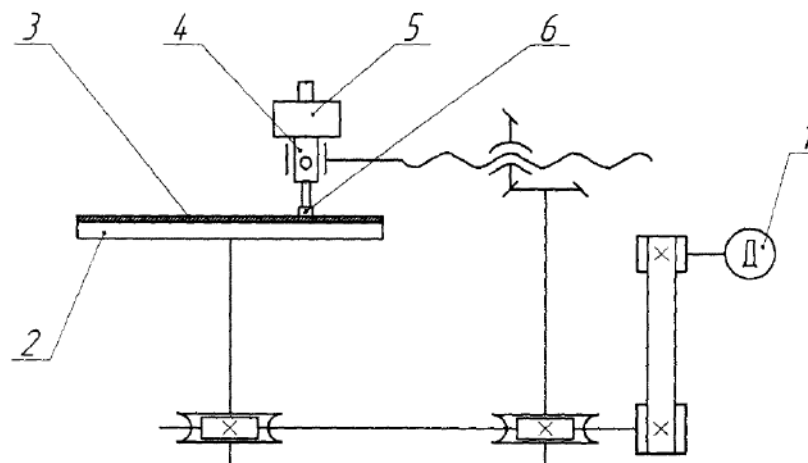
Значна кількість методів випробувань на зношування, різні умови їх проведення, велика кількість устаткування і способів вимірів, призводить до того що результати оцінки зносостійкості, що отримані різними дослідниками, не завжди можливо порівняти та оцінити і основною причиною цьому виступає відсутність метрологічних характеристик в нормативах на методики вимірів зносостійкості. Саме тому питання про метрологічне забезпечення методик вимірів зносостійкості в умовах абразивного зношування є одним з ключових для стандартизації цих досліджень [48].

У роботі [49] пропонується порівнювати результати польових випробувань з результатами лабораторних випробувань на стирання вибраних

низьколегованих бористих сталей сухим піщано-гумовим колесом. Зношування сталей оцінювали за втратою ваги, а механізми їх зношування досліджували за допомогою скануючої електронної мікроскопії. Двома переважними механізмами абразивного зношування для низьколегованих сталей з добавками бору були мікрорізання та мікророзорювання. Найвищий і найнижчий опір абразивному зносу спостерігався в тих самих класах матеріалу як у польових випробуваннях, так і у лабораторних випробуваннях. Вказується, що результати, отримані під час лабораторних випробувань на знос гуми колеса, можуть бути використані на основі порівняння абразивної зносостійкості матеріалів з подібною структурою і цьому випадку такі тести можуть замінити дорогі та трудомісткі польові тести.

Американським товариством випробувань і матеріалів (ASTM) розроблено стандартний метод випробувань ASTM G65 для вимірювання зносу з використанням пристрою з сухим піском або гумовим колесом. Він включає лабораторні процедури для визначення стійкості металевих матеріалів до зношування від подряпин. Метою цього методу випробувань є отримання даних, які будуть відтворювано ранжувати матеріали відповідно до їхньої стійкості до подряпин за заданого набору умов. Суть методу полягає у тому, що гумове колесо притискається до плоского зразка, а вільний абразив певного гранулометричного складу подається між зразком і колесом. В залежності від величини фракції абразиву, маси (об'єму) абразиву, що подається в зону контакту, швидкості обертання фрикційного колеса та зусилля притиску зразка оцінюють інтенсивність зношування. При такому режимі випробувань інтенсивність руйнування матеріалу не є максимальною, оскільки більшість абразивних частинок лише пластично деформують поверхню, що зношується. Видалення мікрооб'ємів відбувається тільки після багаторазової взаємодії ділянки поверхні з абразивними зернами. Однак існує ймовірність шарування зразків малої твердості, що взагалі виключає можливість проведення випробувань [50].

Науковцями Бабічевим М.А. та Хрущовим М.М. розроблено метод випробувань на машині Х4-Б, кінематична схема якої наведена на рисунку 5.2 [51]. Але ця методика має недолік у вигляді змінної лінійної швидкості ковзання зразка по абразиву: в той час як частота обертання диска  $1\text{ c}^{-1}$ , лінійна швидкість зразка збільшується до  $700\text{ мм/с}$  на зовнішньому радіусі диска. Це призводить до постійного збільшення температури поверхні тертя зразка і зміни умов зношування.



1 – електродвигун; 2 – обертовий диск; 3 – абразивна шкурка, 4 – затискний патрон, 5 – вантаж; 6 – дослідний зразок

Рисунок 5.2 – Кінематична схема машини тертя для випробування на зношування [51]

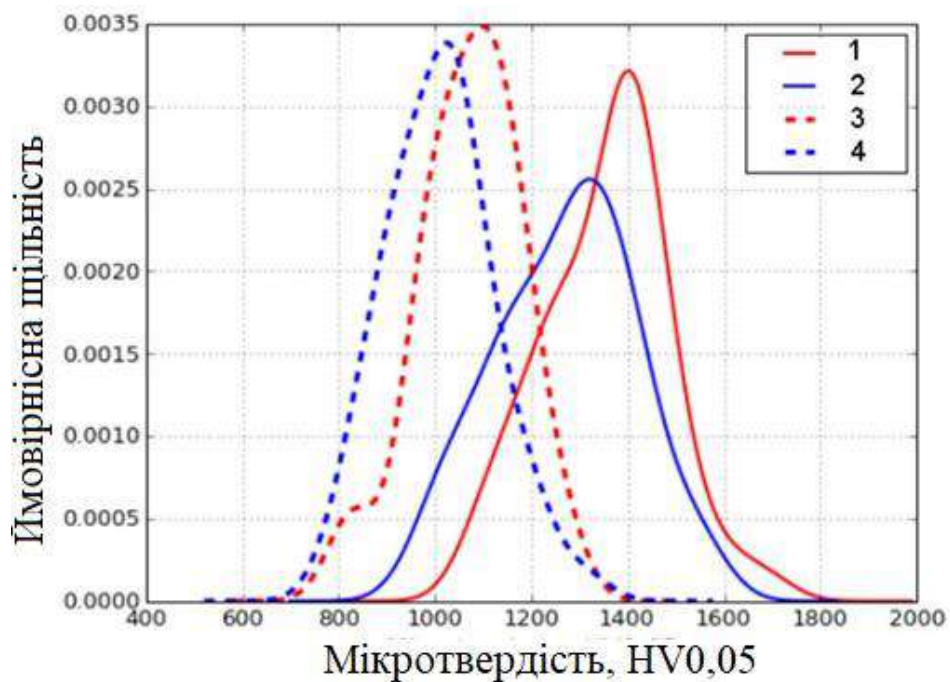
## 5.2 Сталь 130Г3С2 як індикатор умов абразивного зношування

За певних зовнішніх факторів, наприклад, величини навантаження, структура матриці матеріалу може зазнавати якісних змін. Цю здатність пропонується використати для визначення режимів зношування в конкретних реальних умовах і, як результат, отримати можливість визначати фактори, які найбільше впливають на матеріал. У свою чергу це дозволить ефективно добирати відповідні зносостійкі матеріали та їх попередню термічну обробку (що

формує необхідну мікроструктуру для даних умов) для використання в промисловості.

Автори [52] провели дослідження сталі 120Г3С2 (1,21% мас. С, 2,56% мас. Мп, 1,59% мас. Si), загартовуючи її при температурах 900 і 1000°С, що призвело до утворення мікроструктур, які містили 60 і 94% збереженого аустеніту відповідно. Зразки випробовували на абразивне зношування на двотілових і тритілових абразивних випробувальних машинах.

Виявлено, що найвища мікротвердість зношеної досліджуваної поверхні (близько 1400 HV<sub>0,05</sub>) була досягнута на зразках, загартованих з 900°С після абразивного стирання трьома тілами. Мікротвердість зразків після абразивної обробки двома тілами була помітно меншою, з максимальним значенням близько 1200 HV<sub>0,05</sub>. Ця різниця корелює з дослідженнями мікроструктури та результатами рентгеноструктурного аналізу.



1 – В900; 2 – В1000; 3 – А900; 4 – А1000

Рисунок 5.3 – Розподіл мікротвердості зношеної поверхні для зразків, зношених в режимах А і В [52]

Помітно, що мікротвердість зношеної поверхні всіх зразків вища, ніж у багатьох промислових зносостійких наплавленнях [53], і на тому ж рівні або вище, ніж у покриттів, виготовлених плазмою карбїду хрому.

Мартенсит, який утворюється з нестабільного залишкового аустенїту в процесі абразивного зношування досягає мікротвердості на рівні 1000...1100 HV0,05 (як отримані на зразках А-режиму). Рїзниця в поверхневїй мікротвердості між зношеними поверхнями зразків А-режиму та зразків В-режиму може бути пояснена рїзним тиском у рїзних режимах зношування. Тиск у режимі зносу В вищий, ніж у режимі зносу А. Це є причиною вїдмїнності фазового складу зношеної поверхні (див. табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Змїна  $\Delta FWHM$  (повна ширина на половинї максимального параметра) та вмісту  $\gamma$ -фази в зношених зразках по вїдношенню загартованого стану [52]

Позначення зразка	$\Delta FWHM$				Кількість фракції % $\gamma$ – фази		
	$(200)\alpha$		$(200)\gamma$		Загартована	Зношена поверхня	$\Delta\%$ $\gamma$ – фази
	Абс., %	Вїдн., %	Абс., %	Вїдн., %			
В1000	1,86	139	1,68	560	93,6	10,2	83,7
А1000	0,93	69	0,71	237		19,7	74,2
В900	1,94	145	-	-	60,1	4,3	55,8
А900	0,3	22	-	-		12,5	47,6

З таблиці 5.1 видно, що чим менше аустенїту на зношенїй поверхнї, тим вища твердість. З результатів випробувань на абразивне зношування, що наведені в таблиці 5.2, видно, що абсолютні значення швидкості зношування в режимі зношування трьох тїл (зразки В900 і В1000) на два порядки бїльшї, ніж в режимі зношування двох тїл (зразки А900 і А1000).

Таблиця 5.2 – Результати випробувань на абразивне зношування

Позначення зразка	Шлях зношування, м	Втрата маси, мг	Швидкість зносу
A900	96	47,6	0,5
A1000	96	56,9	0,59
B900	8	215,4	26,9
B1000	8	198,7	24,8

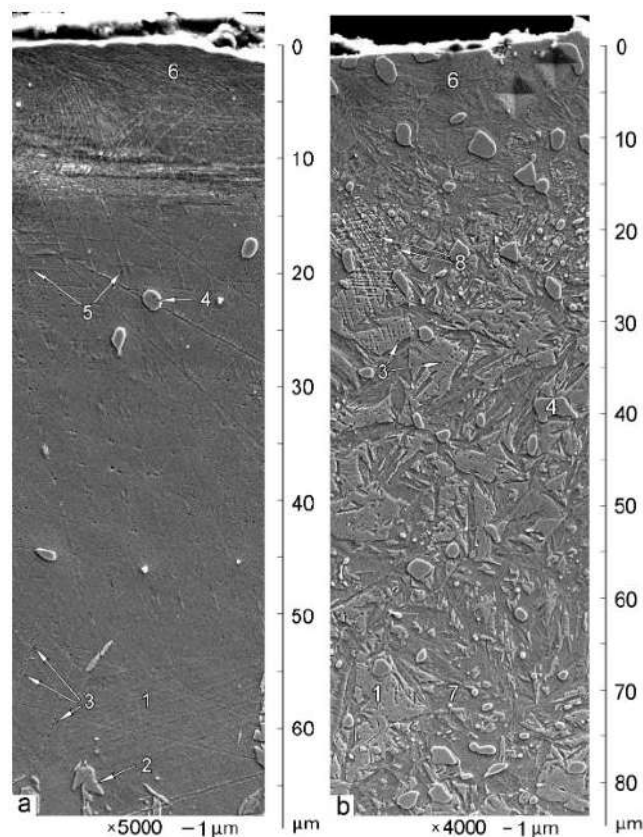
Це можна пояснити різницею в тиску і зернистості абразиву, що застосовуються в кожному з режимів. Тиск в режимі В приблизно втричі вищий, ніж в режимі А (тобто 5МПа і приблизно 1,6МПа відповідно). Крім того, зернистість в режимі В становить 0,6...1,0мм проти 0,09мм в режимі А.

Після гартування від 1000°C температура  $M_s$  дещо нижча, ніж після гартування від 900°C. Отже, аустеніт, загартований при 1000°C, є більш стійким до механічно індукованого перетворення, ніж загартований при 900°C. Очевидно, різниця в стабільності аустеніту є основною причиною вищої швидкості зношування зразка, загартованого при 1000°C, в режимі А. Тиск в режимі А відносно низький, і його недостатньо для максимального перетворення аустеніту, загартованого при 1000°C, на мартенсит. Чим вища стабільність аустеніту, тим нижчий ступінь перетворення і тим більша втрата маси.

Для того, щоб зрозуміти причини різної поведінки нестабільного аустеніту в різних умовах абразивного зношування, було проведено дослідження мікроструктури приповерхневих ділянок, вимірювання мікротвердості та рентгеноструктурний аналіз зношених поверхонь.

Оскільки залишковий аустеніт нестабільний, він може зазнавати локального мартенситного перетворення на самій поверхні мікрошліфа під час шліфування та полірування зразка. Це призводить до утворення тонких пластинок поверхневого мартенситу. Тому локальні ділянки поверхневого мартенситу (2) спостерігаються на SEM-зображенні. Ланцюги травлення (3) спостерігаються в аустеніті (див. рис. 5.4а). Чим менше глибина, тим більше

витравлень з'являється. Вони розташовані вздовж перетину площин ковзання. Це є свідченням великої пластичної деформації внаслідок абразивного зношування. Деяка фаза (5) – ймовірно, це деформаційний мартенсит. Цей мартенсит проявляється на глибині приблизно 30 мкм. Чим менше глибина, тим більше мартенситу з'являється вздовж площин ковзання. зона 6 певної мікроструктури, подібної до сітки, з'являється на самій поверхні, приблизно до 10 мкм на глибину.



а)

б)

а) – загартування від 1000°C; б) загартування від 900°C; 1 – аустеніт; 2 – мартенсит полірування; 3 – ямки травлення; 4 – карбіди; 5 – ймовірно трансформаційний мартенсит по площинах ковзання; 6 – поверхнева зона, утворена абразивним зношуванням; 7 – загартований мартенсит; 8 – зона граничної пластичної деформації аустеніту. Відбитки у верхньому правому куті на зображенні (б) не використовувалися для розрахунку мікротвердості

Рисунок 5.4 – Мікроструктура приповерхневих зон сталі 120Г3С2 після загартування та зношування в режимі В [52]

Абразивне стирання трьома тілами призвело до утворення значно глибшого деформованого шару. Отримані результати обговорюються в світлі можливих відмінностей в умовах абразивного зношування та різної стабільності збереженого аустеніту після гартування від різних температур. Таким чином показано, що структура метастабільного аустеніту може бути використана як індикатор умов зношування, оскільки чутливість такого аустеніту до фазових перетворень сильно залежить від умов зношування, і навіть невеликі зміни останніх призводять до значних відмінностей у властивостях зношеної поверхні.

У дослідженні [12] бло показано вплив температури загартування на зношування сталі 120Г3С2, яке ілюструє рисунок 5.5.

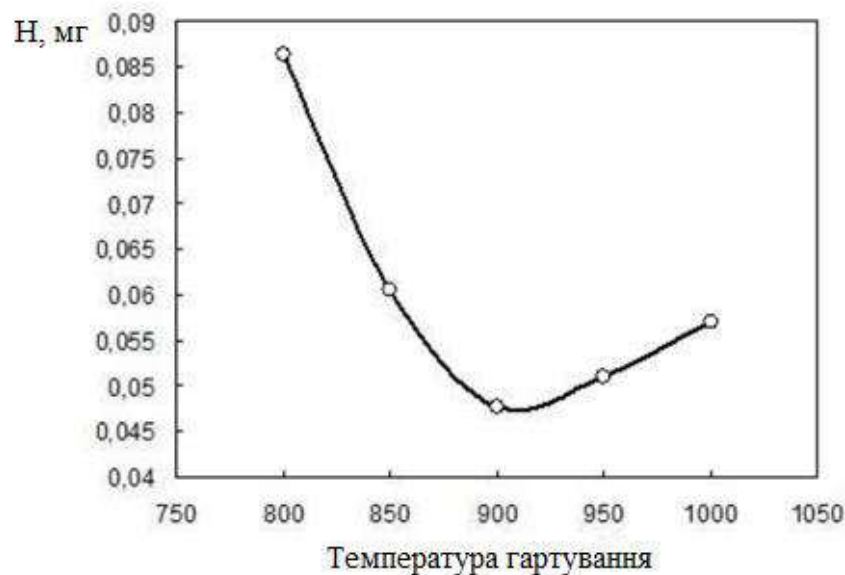


Рисунок 5.5 – Вплив температури гартування на знос сталі 120Г3С2 [12]

Чим менше аустеніту залишається на поверхні після зносу, тим важчі умови зносу. Це може бути корисним для експрес-оцінки умов зносу на практиці.

Для цього виготовляють зразки-свідки зі сталі 120Г3С2 з високим вмістом залишкового аустеніту, що проходять експрес тестування в реальних абразивних умовах зношування. За результатами дослідження кількісного і якісного мартенситного перетворення приходять до висновку щодо фактичних режимів абразивного зносу. На основі цього приймається рішення щодо вибору

застосовуваних сталей та їх структурно-фазового складу для забезпечення найефективнішої роботи деталей.

## **6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ДОСЛІДЖЕНЬ**

У цьому розділі проведено аналіз основних негативних та потенційно небезпечних факторів, які можуть становити загрозу для організму, а також визначені умови, що можуть призвести до травмування під час виконання робіт. Запроваджені заходи спрямовані на усунення цих факторів і забезпечення організованих та безпечних дій у надзвичайних ситуаціях під час проведення досліджень.

### **6.1 Аналіз потенційних небезпек при дослідженнях**

Аналіз потенційних небезпек включає в себе розгляд різноманітних факторів, які можуть призвести до травм та загроз для безпеки та здоров'я працівників. Серед цих факторів можна виділити:

Оцінка можливих ризиків включає аналіз різноманітних чинників, які можуть призвести до травм і становити загрозу для безпеки та здоров'я працівників, серед чинників можна виділити:

а) недостатня якість професійної підготовки фахівців може викликати порушення технологічного процесу та сприяти виникненню травм;

б) неналежна організація робочих місць може призводити до створення умов, що сприяють травмуванню працівників;

в) пошкодження внаслідок механічних впливів під час підготовки та зварювання виробів;

г) збільшення ризику ураження електричним струмом може бути викликане порушеннями правил електробезпеки, відсутністю захисного заземлення або його порушенням, а також наявністю відкритих електричних

з'єднань. Це потенційно може призвести до травм електрострумом і, у виняткових випадках, навіть призвести до смертельних наслідків;

є) ризик отруєння газами та аерозолями, що утворюються під час хімічних технологічних операцій при підвищеній загазованості токсичними газами, які є в складі технологічного процесу;

ж) підвищена температура матеріалів або поверхні устаткування, а також збільшений рівень теплового випромінювання можуть призводити до перегрівання та можливих опіків, особливо при порушенні технологічного процесу та недотриманні правил техніки безпеки.

з) низькі якісні показники атмосферного середовища на робочих ділянках;

л) можливість виникнення загоряння через порушення вимог пожежної безпеки;

м) шкідливий вплив електромагнітних випромінювань під час індукційного гартування;

н) інші можливі ризики, пов'язані з умовами праці в надзвичайних ситуаціях.

Норми небезпечних і шкідливих виробничих факторів у робочій зоні не повинні перевищувати встановлені значення:

а) показники важкості праці повинні бути не вищі II класу (допустимі) згідно з "Гігієнічною класифікацією праці" № z0472-14;

б) інтенсивність інфрачервоного випромінювання та температура нагрітої поверхні устаткування повинні зберігатися на рівнях, які не перевищують відповідно  $140 \text{ Вт/м}^2$  і  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

в) рівні шуму та звукового тиску на робочому місці під час термічної обробки та ХТО повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.037-99;

г) процедура захисного заземлення і занулення повинна відповідати визначеним у стандарті вимогам;

д) концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони повинна залишатися в межах встановлених гранично допустимих концентрацій (ГДК).

## 6.2 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці

Заходи, спрямовані на забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці, розробляються відповідно до вимог, визначених у "Гігієнічній класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу", що були затверджені Міністерством охорони здоров'я України 06.05.2014 року під № 472/25249.

На виробничих ділянках термічних цехів рекомендується обладнати санітарні пости, що мають оснащені аптечки з медикаментами та іншими засобами для надання працівникам першої (долікарської) допомоги у разі нещасних випадків. На внутрішній стороні дверцят аптечки слід розмістити інформацію щодо застосування медикаментів за їх призначенням.

Побутові приміщення рекомендується розташовувати в прибудові до виробничого будинку або в окремому будинку, який може бути з'єднаний з виробничим будинком теплим переходом. Також допускається розміщення побутових приміщень у основному корпусі, але при цьому важливо, щоб вони були ізольовані від виробничих приміщень за допомогою тамбура або коридору з виходом на зовнішню територію.

Працівникам гарячих ділянок цеху рекомендується забезпечуватися підсоленою газованою водою з вмістом 0,5 % повареної солі у кількості 4...5 літрів на людину в зміну, а також іншими напоями.

Системи питного водопостачання мають бути підтримані в чистоті, обладнані зливальними раковинами або спеціальними приймачами для води.

Установка пристроїв питного водопостачання заборонена на ділянках ціанування, рідинного азотування і свинцевих ванн.

Виробничні приміщення термічних цехів, де проводяться роботи зі шкідливими речовинами, такими як кислоти, луки та інші, повинні бути оснащені душами і фонтанчиками для промивання очей і шкіри. Ці засоби

повинні розташовуватися в таких місцях, які забезпечують їх використання не пізніше, ніж через 6...12 секунд після ураження.

Вентилі, які регулюють температуру і подавання води в душові кабінні, повинні бути розташовані в місцях, що унеможливають опіки гарячою водою під час користування душем. Рекомендується встановлювати вентилі та змішувальні пристрої ззовні кабінні або поруч із входом в неї.

### 6.3 Заходи з пожежної безпеки

Розташувати на робочому місці основні засоби для пожежогасіння. Щодня здійснювати прибирання робочого місця після завершення робіт, видаляючи сміття та горючі матеріали.

Здійснення зварювальних та інших вогневих робіт дозволяється лише після вжиття заходів, спрямованих на попередження можливості загорання (вимкнення обладнання, видалення всіх горючих матеріалів з робочого місця, захист конструкцій та обладнання, забезпечення первинними засобами пожежогасіння).

При проведенні електрозварювальних робіт необхідно використовувати електрозварювальні апарати, що пройшли вчасну перевірку та випробування. Заземлення електрозварювального обладнання має відповідати вимогам розділу 8 Правил влаштування електроустановок (ПУЕ).

Підключення та відключення електрозварювального обладнання до/від електромережі має виконувати персонал електроцеху. Під час перерв у роботі та після закінчення робочої зміни електрозварювальні апарати слід відключати від електромережі. Після завершення робіт всі апарати та обладнання слід прибрати в спеціально призначені приміщення.

Виконання тимчасових зварювальних та інших вогневих робіт має відповідати вимогам НАПБ В.01.034-2005/111 "Правила пожежної безпеки у

компаніях на підприємствах та в організаціях енергетичної галузі України". Керівник робіт повинен забезпечити перевірку місця виконання тимчасових вогневих робіт протягом 2 годин після їх завершення.

#### 6.4 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях

На виробництві можуть виникати різні надзвичайні ситуації, включаючи:

1. Пожежа. Може виникнути через несправність обладнання, недотримання пожежних правил, недбалість або запальні матеріали.
2. Вибух. Може статися внаслідок неправильного зберігання чи використання вибухонебезпечних речовин або за невідповідних умов роботи.
3. Аварія машин чи обладнання. Можливість зламу, виходу з ладу або несправності обладнання, що може призвести до травмування працівників чи шкоди для виробництва.
4. Наслідки натуральних катастроф. Виробництва, розташовані в зоні можливих землетрусів, повеней, ураганів або інших стихійних лих, можуть бути під загрозою.
7. Транспортні аварії. Якщо на підприємстві є автотранспорт, можливість аварійних ситуацій на дорозі, включаючи зіткнення або зсуви.

Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях охоплюють комплекс заходів, спрямованих на попередження та ефективне реагування на небезпечні ситуації, що можуть стати причиною загрози життю, здоров'ю та майну людей. Ці заходи включають планування, тренування, обладнання та налагодження системи спостереження та комунікації, а також організацію евакуації та надання першої допомоги постраждалим. Крім того, важливо забезпечити належний рівень обізнаності та навичок з роботи з пожежною технікою та засобами колективного та індивідуального захисту, а також проводити регулярні перевірки та оновлення систем безпеки. Особлива увага

приділяється також реагуванню на надзвичайні ситуації, пов'язані з екологічними катастрофами, аварійними розливами небезпечних речовин та іншими серйозними загрозами довкіллю та здоров'ю людей.

З метою запобігання виникненню, ліквідації НС на підприємстві, слід дотримуватися наступних рекомендацій:

1. Розробити та впровадити систему управління безпекою праці, зокрема створити політику безпеки та процедури її дотримання.

2. Проводити регулярні перевірки устаткування, машин та іншого обладнання з метою виявлення технічних несправностей та їх своєчасного усунення.

3. Проводити періодичні навчання та тренінги для працівників з питань безпеки та профілактики надзвичайних ситуацій.

4. Забезпечити виконання вимог пожежної безпеки, включаючи наявність пожежних пристроїв, дверей аварійного виходу, евакуаційних планів, проведення навчань з евакуації тощо.

5. Дотримуватися правил зберігання та використання хімічних речовин, включаючи їх герметичне упакування та знакування, установлення витяжної вентиляції, носіння індивідуальних засобів захисту та ін.

6. Забезпечити наявність необхідного оснащення для надання першої медичної допомоги та негайного реагування в разі виникнення надзвичайних ситуацій.

7. Проведення аудиту безпеки. Виконується комплексна перевірка системи управління безпекою праці на підприємстві з метою виявлення недоліків, невідповідностей та можливостей для покращення.

8. Співпрацювати з відповідними органами державного контролю та нагляду з питань безпеки праці для забезпечення виконання вимог законодавства.

Виявлення можливостей виникнення аварій слід проводити на основі експертного аналізу із залученням фахівців з безпеки праці та інженерів з певної

галузі виробництва. Основні кроки виявлення можливостей виникнення аварій на виробництві включають:

1. Огляд і аналіз устаткування та обладнання: проводиться огляд технологічних процесів, механізмів та елементів обладнання з метою виявлення можливих дефектів, слабких місць, зносу або погіршення якості.

2. Оцінка робочих умов: проводиться аналіз робочих місць, їх організації та умов праці з метою виявлення потенційно небезпечних факторів, таких як шкідливі хімічні речовини, висока температура, недостатня провітрюваність тощо.

3. Вивчення історичних даних та статистики: аналізується інформація про попередні аварії, інциденти та порушення виробничої безпеки з метою виявлення шаблонів та тенденцій, а також встановлення причин та наслідків попередніх надзвичайних ситуацій.

4. Розгляд технічних документацій та нормативних вимог: аналізуються технічні характеристики устаткування, правила його експлуатації та інструкції з безпеки для виявлення можливих вразливостей, недоліків або недосягнення нормативних вимог.

## ВИСНОВКИ

У роботі проаналізовано багатофакторний вплив умов зношування на властивості поверхні тертя низьколегованих сталей, що є актуальним при розробці алгоритмів предикативної оцінки зносостійкості деталей та вузлів і прийнятті рішень щодо їх застосувань.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що пропонується низьколеговану сталь 120Г3С2, яка має яскраво виражену чутливість до умов зношування, використовувати як індикатор для отримання інформації щодо багатокритеріальних умов зношування і визначення найбільш суттєвих факторів впливу. Визначення структурних змін у зразках-свідках допоможе якісно охарактеризувати умови зношування і ефективно обирати зносостійкі матеріали, що забезпечать більший ресурс роботи деталей.

Практична цінність результатів роботи полягає в тому, що використання запропонованої методики дозволяє економити фінансові ресурси, оскільки такий підхід не потребує суттєвих капіталовкладень та витрат робочого часу: сталь 120Г3С2 є одним із найдоступніших матеріалів, а експериментальні дослідження займають відносно небагато часу.

Використання зразків-свідків з цієї сталі є технологічним та практичним способом, який рекомендується впроваджувати там де необхідно відносно швидко та з мінімальними витратами приймати рішення щодо вибору зносостійких матеріалів.

Подальші дослідження залишкового аустеніту як чутливої структури для диференціювання стану зносу матеріалів допоможуть уточнити та визначити сфери практичного застосування цього феномену.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. J.D. Gates, Two-body and three-body abrasion: a critical discussion, *Wear* №214. 1998, 139–146.
2. A.R. Lansdown, A.L. Price, *Materials to Resist Wear: A Guide to their Selection and Use*, Pergamon Press, New York, 1986.
3. M.A. Moore, Abrasive wear, in: D.A. Rigney (Ed.), *Fundamentals of Friction and Wear of Materials*, American Society for Metals, 1981.
4. I.M. Hutchings, *Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials*, Edward Arnold, 1992
5. K.-H. Zum Gahr, *Microstructure and Wear of Materials*, Tribology Series, Vol.10, Elsevier, Amsterdam, 1987.
6. J.H. Tylcack, Abrasive wear, *ASM Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology*, Vol. 18, ASM International, 1992.
7. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. М.: Машиностроение, 1977. 525 с.
8. Брыков М. Н. Разработка и применение материаловедческих основ повышения износостойкости железоуглеродистых сплавов при абразивном изнашивании: дис. д-ра техн. наук: 05.02.01/ Запорож. Нац. Техн. Ун-т. Запорожье, 2008. 280
9. Похмурська Г.В. Ударно-абразивне зношування поверхневих шарів, наплавлених порошковими дротами системи FE-CR-V-C / Науковий вісник НЛТУ України. 2015. Вип. 25.3. С.130
10. Влияние изотермической обработки на микроструктуру закалённой на аустенит высокоуглеродистой низколегированной стали / Калинин Ю. А., Петришинец И., Ефременко В. Г., Капустян А. Е., Брыков М. Н. // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету: зб. наук. пр. / М-во освіти і науки України, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т ; редкол.: А. Г. Батракова (гол. ред.) та ін. Харків, 2020. Вип. 88, т. 1. С. 58–66.

11. Хессе О., Капустян А. Е., Ефременко В. Г., Бережный С. П., Брыков М. Н. Изотермическая обработка высокоуглеродистого кремнийсодержащего аустенита // Нові матеріали і технології в металургії та машинобуд. 2014. № 2. С. 61-66.
12. Хессе О., Ефременко В. Г., Шимицу К., Брыков М. Н., Капустян А. Е. Износостойкость обезуглероженного слоя высокоуглеродистой низколегированной стали в экстремальных условиях трения // Наукові нотатки. 2017. Вип. 58. С. 301-307
13. M.Kumar and R. C Gupta (Centre of Advanced Study, Dept. of Metallurgical Engineering, Institute of Technology, Banaras Hindu University, Vaanasi. Abrasive Wear Characteristics of Carbon and Low Alloy Steels for Better Performance of Farm Implements [J]. J Mater Sci Technol, 1995, 11(2):91-96.
14. Kalácska Á., Székely L., Keresztes R.Z., Gábora A., Mankovits T., Baets P. Abrasive Sensitivity of Martensitic and a Multi-Phase Steels under Different Abrasive Conditions. Materials 2021, 14, <https://doi.org/10.3390/ma14061343>
15. Gourab Saha, Kati Valtonen, Ari Saastamoinen, Pasi Peura, Veli-Tapani Kuokkala, Impact-abrasive and abrasive wear behavior of low carbon steels with a range of hardness-toughness properties, Wear, Volumes 450–451, 2020, 203263, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203263>
16. Modi O. P., Pandit P., Mondal D. P. et al. High-stress abrasive wear response of 0.2% carbon dual phase steel: Effects of microstructural features and experimental conditions. Materials Science and Engineering: A. 2007. V. 458, № 1-2. P. 303-311.
17. Sevim I. Effect of abrasive particle size on wear resistance in steels. Materials & Design. 2006. V. 27, № 3. P. 173-181.
18. Avient WE, Goddard J, Wilman H. An experimental study of friction and wear during abrasion of metals. Proc R Soc (London) Ser A 1960; 256: 159–79
19. Борак К. В. Уплив коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунту на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин, НаукПраці ВНТУ, вип. 1, Квіт 2020.

20. Rickard Gåhlin, Staffan Jacobson, The particle size effect in abrasion studied by controlled abrasive surfaces, *Wear*, Volume 224, Issue 1, 1999, P. 118-125, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00344-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00344-5)
21. J. Larsen-Badse, *Wear*, № 11. 1968 213–222.
22. T. Hisakado, H. Suda, T. Tsukui, *Wear* 155 1992 297–307.
23. T.Chandrasekaran, Kishore, *Materials Science and Technology* 8 Ž.1992 P. 722
24. Брыков М.Н., Ефременко В.Г., Ефременко А.В. Износостойкость сталей и чугунов при абразивном изнашивании: Научное издание / М.Н. Брыков, В.Г. Ефременко, А.В. Ефременко. Херсон: Гринь Д.С., 2014. 364 с.
25. J.H. Tylcak, Abrasive wear, *ASM Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology*, Vol. 18, ASM International, 1992.
- 26.17. D.L. Olson, C.E. Cross, Friction and wear in the mining and mineral industries, *ASM Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology*, Vol.18, ASM International, 1992.
27. Ann Sundström, José Rendón, Mikael Olsson, Wear behaviour of some low alloyed steels under combined impact/abrasion contact conditions, *Wear*, Volume 250, Issues 1–12, 2001, Pages 744-754, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00712-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00712-8)
28. I.M. Hutchings, *Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials*, Edward Arnold, 1992
29. Petrica, Marcela & Peinsitt, Thomas & Badisch, Ewald. (2014). Characterization of Impact Abrasive Wear Produced by Different Rocks. *Key Engineering Materials*. 604. 47-50. 10.4028/www.scientific.net/KEM.604.47.
30. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию М.:Машиностроение, 1976. 271 с
31. Макрогеометрия и изнашивающая способность почвенных абразивных частиц / Д. Б. Бернштейн, Н. И. Кисетова, Е. М. Соркина [та ін.] // *Трение и износ*. 1992. Том 13, № 2. С.333–339.
32. Nakkirigawa K, Li ZZ. The effect of hardness on the transition of abrasive wear mechanism steels. *Wear Mater* 1987: 585–93

- 33.K. Hokkirigawa, K. Kato, An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear, *Tribology International*, Volume 21, Issue 1, 1988, Pages 51-57, ISSN 0301-679X, [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(88\)90128-4](https://doi.org/10.1016/0301-679X(88)90128-4)
34. Minal Shah, Subhankar Das Bakshi, Three-body abrasive wear of carbide-free bainite, martensite and bainite-martensite structure of similar hardness, *Wear*, Volumes 402–403, 2018, Pages 207-215, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.02.020>
35. Céline Trevisiol, Abdeljalil Jourani, Salima Bouvier, Effect of hardness, microstructure, normal load and abrasive size on friction and on wear behaviour of 35NCD16 steel, *Wear*, Volumes 388–389, 2017, Pages 101-111, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.05.008>
36. Kassim S Al-Rubaie, Equivalent hardness concept and two-body abrasion of iron-base alloys, *Wear*, Volume 243, Issues 1–2, 2000, Pages 92-100, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00425-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00425-7)
37. P.J. Mutton, J.D. Watson, Some effects of microstructure on the abrasion resistance of metals, *Wear*, Volume 48, Issue 2, 1978, Pages 385-398, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(78\)90234-X](https://doi.org/10.1016/0043-1648(78)90234-X)
38. Ying Chao Pei et al 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 727 012002 DOI 10.1088/1757-899X/727/1/012002
39. Binbin W, Zhiquan W , Xuelin W, et al. (2019) Relationship between high angle grain boundaries and hardness after  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformation[J]. *Materials Science and Technology*, vol.35, NO.15,1803-1814
40. Ojala N, Valtonen K, Heino V, et al. (2014) Effects of composition and microstructure on the abrasive wear performance of quenched wear resistant steels[J]. *Wear*,317(1-2):225-232.
41. Trevisiol C, Jourani A, Bouvier S. (2018) Effect of microstructures with the same chemical composition and similar hardness levels on tribological behavior of a low alloy steel[J]. *Tribology International*.

42. Valtonen K, Ojala N, Haiko A, et al. (2019) Comparison of various high-stress wear conditions and wear performance of martensitic steels[J]. *Wear*, (3-13): 426-427.
43. Bratkovskii, E. & Shapovalov, A. & Dema, R.R.. (2019). Decreasing the Impact–Abrasive Wear of Steel. *Russian Engineering Research*. 39. 480-484. 10.3103/S1068798X19060091.
44. Hesse, O & Liefeyth, Jens & Kunert, M & Kapustyan, A & Brykov, Michael & Efremenko, Vasily. (2016). Abrasive Wear Resistance of High-Carbon Low-Alloy Steels After Isothermal Transformation of Metastable Austenite
45. Принципи создания мелющих тел повышенной износостойкости. Часть 1. Износостойкость сталей на основе железа при абразивном изнашивании / [А. Д. Коваль, В. Г. Ефременко, М. Н. Брыков и др.] // *Трение и износ*. 2012. Т. 33, № 1. С. 52–61
46. Медведєва Н. А. Сучасний стан нормативної бази щодо здійснення контролю якості поверхонь деталей машин // *Стандартизація. Сертифікація. Якість*. 2017. № 3. С. 82-90.
47. Зенкін М.А., Несхозієвський А.В. Створення нормативно-технічної бази для здійснення контролю якості зміцнюючих покриттів // *Технологія і техніка друкарства. Збірник наукових праць*. Випуск 3 (37) К.: ВПІ НТУУ «КПІ». 2012. С.27 - 35.
48. Зенкін М. А., Долженко А. В. Сучасні методи метрологічного забезпечення контролю зносостійкості зміцнюючих покриттів // *Вісник Інженерної академії України*. 2014. Вип. 2. С. 289-292
49. Beata Bialobrzaska, Piotr Kostencki, Abrasive wear characteristics of selected low-alloy boron steels as measured in both field experiments and laboratory tests, *Wear*, Volumes 328–329, 2015, Pages 149-159, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.003>.
50. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Термічні методи підвищення строку служби вузлів тертя» для студентів освітньої програми «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і

конструкцій» всіх форм навчання / Укл. Бриков М.М. Запоріжжя: НУ«Запорізька політехніка», 2021. 33 с.

51. Хрущов М. М., Бабичев М. А. Исследования изнашивания металлов. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - 352 с.
52. Brykov M.N., Akrytova T.O., Osipov M.J., Petryshynets I., Puchy V., Efremenko V.G., Shimizu K., Kunert M., Hesse O. Abrasive Wear of High-Carbon Low-Alloyed Austenite Steel: Microhardness, Microstructure and X-ray Characteristics of Worn Surface. *Materials* 2021, 14, 6159. <https://doi.org/10.3390/ma14206159>
53. Falat L., Džupon M., Tavodová M., Hnilica R., Ćiripová L.; Homolová, V. Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Various Alloy Hardfacings for Application on Heavy-Duty Chipper Tools in Forestry Shredding and Mulching Operations. *Materials* 2019, 12, 2212