

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Інженерно-фізичний факультет  
Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії

«На правах рукопису»  
УДК 621.762

«До захисту допущено»  
В. о. завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ В. І. Мазур  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

**Магістерська дисертація**  
**за освітньо-науковою програмою**  
**Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів**  
зі спеціальності 132 Матеріалознавство  
на тему: «Закономірності формування структури та властивостей зносостійких композиційних матеріалів на основі плавленого карбїду вольфраму»

Виконав: магістрант ІІ курсу, групи ФК-81мн

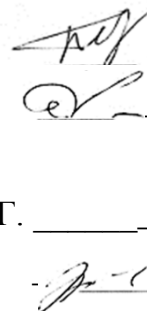
Тесля Сергій Юрійович

Науковий керівник професор, к. т. н. Степанчук А. М.

Консультант з охорони праці та безпеки

в надзвичайних ситуаціях зав. кафедри ОПЦБ, професор, д. т. н. Левченко О. Г. \_\_\_\_\_

Рецензент професор, д. т. н. Хижняк В. Г.



Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань

Магістрант 

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України**  
**“Київський політехнічний інститут” імені Ігоря Сікорського**

Факультет	Інженерно-фізичний
Кафедра	Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	132 МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО
Освітньо-наукова програма	Нанотехнології та комп’ютерний дизайн матеріалів
Вибірковий блок	Матеріалознавство композитів і покриттів

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

В. о. завідувача кафедри

Мазур В. І. \_\_\_\_\_

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ**

на магістерську дисертацію магістранту

Теслі Сергію Юрійовичу

(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема дисертації: «Закономірності формування структури та властивостей зносостійких композиційних матеріалів на основі плавленого карбїду вольфраму»
2. Науковий керівник: професор, к. т. н. Степанчук А. М.  
затверджений наказом по університету від 17.03. 2020 року № 893-с
3. Строк подання дисертації: 13.05.20
4. Вихідні дані до дисертації: предмет дослідження – формування структури та властивостей композитів самофлюсівний сплав – литий карбїд фольраму. Дослідження структури, фазового складу та трибо технічних властивостей. Об’єкт дослідження – композиції литий карбїд–самофлюсівний сплав виходячи з передбачення, що взаємодія між ними у процесі отримання виробів з них сприяє утворенню структур, в яких утворюється дисперсно зміцнююча фаза.
5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити):
  - а) літературний огляд;
    - провести аналіз сучасного стану теорії та технології створення композиційних зносостійких матеріалів;
    - сформулювати об’єкти та задачі дослідження.

- б) матеріали та методи дослідження;
- провести планування експерименту, обрати методи досліджень, та оптимальні технологічні режими отримання композицій;
  - отримати зносостійкі композиційні матеріали – самофлюсівний сплав – литий карбід вольфраму, при різному часі витримки;
  - провести аналіз впливу часу термічної обробки на мікроструктуру (морфологію зерен, розчинність);
  - методами мікродурометрії, дослідити зачення твердості отриманих композицій;
  - дослідити зносостійкість композиційних матеріалів в умовах газообразивного зношування, та тертя із закріпленим абразивом.

- в) результати дослідження та їх обговорення;
- провести аналіз та обговорення отриманих даних, з точки зору сучасних уявлень щодо отримання та експлуатації зносостійких композиційних матеріалів.

- г) розділ охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях;
- провести аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (мікроклімат, шум, випромінювання, вібрація та ін);
  - розробка інженерних рішень для безпеки праці;
  - розрахунок вентиляції приміщення;
  - заходи безпеки в умовах надзвичайної ситуації.

#### 6. Перелік графічного матеріалу:

- характеристика вихідних матеріалів;
- методики отримання та дослідження композиційних матеріалів;
- зносостійкість та твердість
- мікроструктура композитів;

#### 7. Орієнтовний перелік публікацій:

Вплив часу термічної обробки на структуру композиційних матеріалів – самофлюсівний сплав на основі нікелю – литий карбід вольфраму.




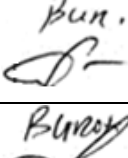
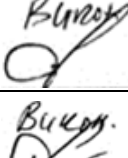
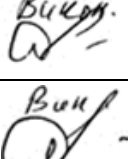
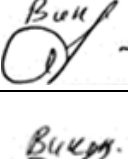

Фізико-механічні властивості композитів самофлюсівний сплав на основі нікелю – литий карбід вольфраму в умовах дії абразивного середовища

#### 8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	Зав. кафедри ОПЦБ, д. т. н. Левченко О. Г.	10.04.20	20.04.20

9. Дата видачі завдання: 03.02.2020р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

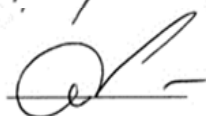
№ п/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Літературний огляд. Проведення аналізу стану проблеми отримання зносостійких композиційних матеріалів за участі самофлюсівних сплавів та твердиг тугопавлких сполук	1.03.20	Вик. 
2.	Розробка методики експерименту	19.03.20	Вик. 
3	Проведення експериментальних досліджень: отримання композитів самофлюсівний сплав – литий карбід вольфраму методом інфільтрації розплаву, при різному часі витримки. Оптимізація параметрів отримання матеріалів, шляхом підбору оптимального розміру гранул карбиду.	24.03.20	Вик. 
5	Дослідження мікроструктури композитів та їх зносостійкості	2.04.20	Вик. 
6	Обробка експериментальних даних та їх обговорення	18.04.20	Викон. 
7	Розробка розділу охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	20.04.20	Викон. 
8	Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	4.05.20	Викон. 
9	Попередній захист дисертації	14.05.20	Викон. 

Магістрант



С. Ю. Тесля

Науковий керівник дисертації



А. М. Степанчук

## Відгук

керівника магістерської роботи освітньо-кваліфікаційного рівня “магістр” виконаної на тему “ Закономірності формування структури та властивостей зносостійких композиційних матеріалів на основі плавленого карбїду вольфраму ” студентом гр. ФК-81мн Теслею Сергієм Юрійовичом

Магістерська робота виконувалась у рамках науково-дослідних робіт кафедри згідно програми № 23-ІФ. Головною метою дисертації роботи було отримання зносостійких матеріалів для роботи в умовах абразивного зношування із композицій литі карбїди–самофлюсівний сплав з підвищеними експлуатаційними характеристиками, встановлення закономірностей та фундаментальні засад отримання матеріалів з наперед заданими структурою та властивостями.

Магістерська робота повністю відповідає завданню.

При виконанні дисертації Тесля С.Ю. проявив навички працювати з літературними даними, аналізувати їх. Проявив уміння ставити та проводити експериментальні роботи. Як наслідок, він провів вибір та обґрунтування вихідних матеріалів, вивчення процесів отримання вихідних матеріалів і виготовлення матеріалів з них методом просочення розплавом самофлюсівного сплаву на основі нікелю гранул з плавленого карбїду вольфраму. Вивчення впливу температурних та кінетичних параметрів на процес формування структури та фазового складу, дослідження твердості та експлуатаційних властивостей отриманих матеріалів дозволив встановити фундаментальні засади впливу цих факторів на кінцеві властивості матеріалу.

При виконанні роботи Тесля С.Ю. проявив уміння інтерпретувати отримані результати з застосуванням сучасних уявлень теорії і практики про процеси, що досліджувались.

Отримані в роботі результати викладені в двох статтях та обговорені на 4–х міжнародних наукових конференціях.

У цілому робота виконана відповідно до вимог, має певне теоретичне та практичне значення. Вважаю, що Тесля С.Ю. заслуговує присвоєння їй звання магістра з інженерного матеріалознавства.

Керівник роботи



проф. Степанчук А. М.

## Рецензія

на магістерську дисертаційну роботу освітньо-кваліфікаційного рівня “магістр” виконаної на тему “ Закономірності формування структури та властивостей зносостійких композиційних матеріалів на основі плавленого карбиду вольфраму ” студентом гр. ФК-81мн Теслею Сергієм Юрійовичом

Дисертаційна робота, що рецензується повністю відповідає дипломному завданню.

В літературному огляді розглянуті теоретичні та технологічні основи отримання композиційних матеріалів за участю тугоплавких сполук та самофлюсівних сплавів. Викладені вимоги до властивостей зносостійких композиційних матеріалів, методи їх отримання. Розглянута фізико-хімічна сутність процесів, що супроводжують отримання зносостійких композиційних матеріалів. Як наслідок правильно зроблені висновки про методи та оптимізацію умов отримання зносостійких композиційних матеріалів на основі композицій плавлений карбід вольфраму самофлюсівний сплав, правильно визначена мета досліджень.

В роботі проведено вивчення процесів отримання вихідних матеріалів та композиційних матеріалів з них. Досліджено вплив складу матеріалу, температури і часу просочування на формування структури та фазового складу. При вивченні структури і фазового складу були застосовані сучасні методи досліджень, що дозволило отримати достовірні результати, використання яких сприяло розробці фундаментальних засад отримання матеріалів з високими експлуатаційними характеристиками – стійкість до зношування в умовах дії закріплених абразивів та газоабразивного зношування.

Отримані результати обговорені з точки зору сучасних уявлень на процеси створення композиційних матеріалів та механізми їх зношування.

В роботі отримані результати, які мають наукову і практичну значимість і можуть бути використані при подальшій розробці процесів отримання зносостійких композиційних матеріалів з наперед заданими властивостями.

В роботі також розроблений розділ охорони праці і навколишнього середовища, який виконано відповідно до вимог.

Поряд з викладеним по роботі необхідно зробити зауваження:

1. При вивченні структури отримуваних матеріалів при ідентифікації фазових складових бажано було б більш широко використати мікродюрOMETричний аналіз.

2. Слід було дати рекомендації для яких умов роботи при газообразивному зношуванні можна використовувати розроблені матеріали.

У цілому робота виконана відповідно до вимог, заслуговує оцінки “Відмінно” а Тесля С.Ю. присвоєння йому звання магістра з матеріалознавства.

Рецензент,  
Професор НТУУ “КПІ”  
д.т.н., проф.



В.Г. Хижняк

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація вміщує: стор. 109; рис. 39; табл. 15; бібл. 89

### КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ, ЛИТИЙ КАРБІД ВОЛЬФРАМУ, САМОФЛЮСІВНІ СПЛАВИ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, ІНФІЛЬТРАЦІЯ, ТЕРТЯ

Дисертація спрямована на вирішення **актуальної** задачі – розробці нових матеріалів багатофункціонального призначення, зокрема для виготовлення зносостійких матеріалів для роботи в умовах абразивного зношування.

**Робота проводилась у межах** науково-дослідних робіт кафедри згідно плану (програми) № 23-ІФ.

**Метою та задачею** дисертації роботи було отримання зносостійких матеріалів для роботи в умовах абразивного зношування із композицій литі карбід–самофлюсівний сплав з підвищеними експлуатаційними характеристиками, встановлення закономірностей та фундаментальні засад отримання матеріалів з наперед заданими структурою та властивостями. **Задачею** роботи було вибір та обґрунтування вихідних матеріалів, вивчення процесів отримання вихідних матеріалів та їх компактування, дослідження їх структури та фазового складу і, як наслідок, встановлення фундаментальних засад впливу цих факторів на кінцеві властивості матеріалу.

**Об'єктом досліджень** дисертації були композиції литий карбід–самофлюсівний сплав виходячи з передбачення, що взаємодія між ними у процесі отримання виробів з них сприяє утворенню структур, в яких утворюється дисперсно зміцнююча фаза.

**Предмет дослідження** – мікроструктура, фазовий склад та трибо технічні властивості матеріалів на основі композиції литий карбід–самофлюсівний сплав.

**Науковою новизною** одержаних результатів є встановлення закономірностей та фундаментальних засад формування властивостей композиційних матеріалів з використанням литик карбідів та самофлюсівних сплавів які мають підвищені техніко-економічні показники застосування.

**Практичне значення** полягає у тому, що отримані матеріали за оптимальних, встановлених в роботі умов, можуть бути використані для виготовлення зносостійких елементів подрібнювачекструдерів керамічних виробництв.

**Результати дисертації** опубліковані у 2-х статтях та оговорені на 3-х наукових конференціях.



## ABSTRACT

The master dissertation contains: p. 109; fig. 39; table. 18; sors. 89

### COMPOSITE MATERIALS, CAST TUNGSTEN CARBIDE, SELF-FLUXING ALLOYS, WEAR RESISTANCE, INFILTRATION, FRICTION

The dissertation is aimed at solving the **urgent problem** - the development of new multifunctional materials, in particular for the manufacture of wear - resistant materials for work in the conditions of abrasive wear.

**The work was carried out within** the research work of the department according to the plan (program) № 23-IF.

**The aim and task** of the dissertation was to obtain wear-resistant materials for work in the conditions of abrasive wear from compositions – cast carbide - self-flux alloy with high performance, to establish patterns and fundamental principles of obtaining materials with predetermined structure and properties. **The task** of the work was to select and substantiate the source materials, study the processes of obtaining raw materials and their compaction, study their structure and phase composition and, as a consequence, establish the fundamental principles of the influence of these factors on the final properties of the material.

**The object of research** of the dissertation were the compositions - cast carbide-self-flux alloy based on the assumption that the interaction between them in the process of obtaining products from them contributes to the formation of structures in which the disperse strengthening phase is formed.

**The subject of research** is the structure, phase composition and tribo technical properties of materials based on the composition of cast carbide-self-flux alloy.

**The scientific novelty** of the obtained results is the establishment of patterns and fundamental principles of forming the properties of composite materials using cast carbides and self-flux alloys that have high technical and economic performance.

**The practical significance** lies in the fact that the obtained materials under the optimal conditions established in the work can be used for the manufacture of wear-resistant elements of grinding extruders of ceramic industries.

**The results of the dissertation** are published in 2 articles and discussed at 3 scientific conferences.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД .....	11
1.1 Фізико-хімічні основи поверхневого руйнування матеріалів .....	11
1.1.1 Види зношування .....	12
1.2 Основні зносостійкі матеріали .....	18
1.2.1 Сплави на основі заліза .....	18
1.4.2 Поверхнева обробка сталей .....	24
1.4.3 Композиційні матеріали на основі тугоплавких сполук ...	27
1.4 Вплив твердості на зносостійкість .....	36
1.5 Методи отримання зносостійких матеріалів .....	38
1.5.1 Метод інфільтрації розплаву .....	38
1.5.2 Пресування та спікання композитів .....	40
1.5.3 Адитивні технології .....	43
1.6 Висновки та постановка задачі дослідження .....	44
2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА .....	46
2.1 Вихідні матеріали .....	46
2.1.1 Отримання гранул .....	46
2.1.2 Технологічні властивості гранул .....	47
2.1.3 Розрахунок наважки вихідних компонентів .....	49
2.2 Отримання композитів .....	51
2.3 Дослідження мікроструктури композитів .....	51
2.3.1 Взаємодія між компонентами .....	52
2.3.2 Вплив кривизни поверхні на ступінь розчинення .....	55
2.4 Твердість композитів .....	55
2.5 Дослідження зносостійкості із закріпленим абразивом .....	56
2.6 Зносостійкість композитів СФС–РЕЛІТ різного фракційного складу .....	59
2.7 Металографічні дослідження поверхонь тертя .....	61
2.8. Газоабразивне зношування .....	62

2.9 Дослідження кінетики розчинення гранул РЕЛІТУ .....	63
2.10 Вплив часу термообробки на зносостійкість .....	65
3 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ .....	67
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ....	78
4.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ). 78	
4.1.1 Мікроклімат.....	81
4.1.2 Рівень шуму .....	82
4.2 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці .....	83
4.2.1 Запиленість робочого середовища .....	83
4.2.2 Небезпека ураження електричним струмом .....	83
4.2.3 Виробниче випромінювання.....	84
4.2.4 Інженерні рішення під час роботи зі шліфувальним верстатом .....	84
4.3 Розрахунок інженерного рішення. Вентиляція.....	85
4.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях.....	88
4.4.1 Пожежна безпека .....	88
4.4.2 Забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях .....	90
4.5 Висновки до розділу охорони праці .....	92
ВИСНОВКИ.....	93
CONCLUSIONS .....	96
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	99
ДОДАТОК А.....	108
ДОДАТОК Б .....	109

## ВСТУП

Виробництво та експлуатація сучасного обладнання має в своєму складі величезну кількість технологічних мікропроцесів, які при тривалій дії призводять до втрати працездатності установок. Так установки можуть мати різні габарити, виконувати геть різні завдання, навіть використовуватись в різних галузях науки і техніки. Проте, вони мають декілька спільних рис, їх окремі частини, а інколи і повністю весь пристрій контактує з рухомим робим середовищем або іншою поверхнею, що переміщується. Внаслідок процесів тертя, відбувається зношування поверхневих шарів, а як наслідок вихід із ладу всього вузла. Саме за рахунок стирання робочої поверхні, а не поломок, пристрої втрачають свою працездатність [1].

Традиційно для відновлення таких деталей використовують матеріали групи заліза та сплави на їх основі. Проте, екстремальні умови роботи, ударні навантаження та активна стираюча дія, не дозволяють в повній мірі задовольнити вимоги, які ставляться перед парами тертя. Наведені фактори в свою чергу ведуть до досить високих економічних втрат, зниження рентабельності, та підвищеної матеріалоемності процесу.

Для задоволення вимог, що ставляться перед парами тертя, більш доцільно звернутись до методів порошкової металургії. Завдяки комплексу різних методів та підходів, можна отримати матеріали, з високими показниками зносостійкості. Найбільш відомий та поширений матеріал в даному напрямку є твердий сплав на основі карбіду вольфраму. Такі матеріали мають високі значення твердості, зносостійкості, тріщиностійкості, модулів пружності та інше [2].

Проте використання твердих сплавів, досить сильно лімітуються, за рахунок дефіцитності та високої токсичності кобальтової зв'язки. Тому на сьогодні ведуться активні роботи по створенню матеріалів, де у якості зв'язки використовують інші металоподобних сполуки та сплави. Однак концепція використання в якості зносостійких матеріалів – матричні композити, з твердими включеннями та пластичним наповнювачем залишається постійною.

Останні дослідження в даному напрямку показують, що отримання найвищих експлуатаційних показників композиційних матеріалів матричного типу, вдається отримати при використанні в якості твердих включень – литих тугоплавких сполук, а в якості наповнювача – самофлюсівного сплаву на основі нікелю.

Однак в наявних дослідженнях не повністю розкриті фундаментальні засади щодо аналізу формування структури та впливу різних факторів на цей процес. Відсутні дані щодо впливу структурного стану на показники зносостійкості композитів, не в повній мірі розкрито сутність технології отримання. Тому дослідження процесів формування структури та властивостей композицій самофлюсівний сплав – литий карбід вольфраму є актуальною задачею.

## 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Фізико-хімічні основи поверхневого руйнування матеріалів

Сучасні виробництво передбачає величезну кількість технологічних процесів, в ході яких відбувається не лише виконання технологічних завдань, але й активне зношування робочих частин установок. Статистично більшість вузлів, різноманітних приладів, виходить з ладу не з причини руйнування, а саме внаслідок зношування робочої поверхні. Звісно, досить часто процес зношування є бажаним і контрольованим, наприклад коли йде мова про металообробку – різанням чи шліфуванням. Проте в більшості випадків мова йде саме про не контрольований знос [1]–[6]. Цілком очевидно, що для контролю зношування та боротьби з ним, потрібно розуміти, які механізми та фізико-механічні фактори лежать в основі. Зазначені питання будуть розглянуті далі.

#### 1.1.1 Зношування матеріалів та його види

Зношування – це мікроруйнування поверхневих шарів твердого тіла, в результаті руху зовнішнього середовища відносно поверхні тертя та багаторазової дії фізичних, хімічних і фізико-хімічних факторів [1]. Зношування може призвести до прямих збоїв у роботі установок, зменшити допуски та посадки з'єднань, призвести до пошкодження поверхні, що в подальшому сприятиме втраті працездатності пристрою. Характеристикою, яка описує здатність матеріалу протидіяти фізико-механічним процесам руйнування (зношування) поверхневих шарів називають зносостійкістю. Зносостійкість – це функція багатьох параметрів системи, які в свою чергу можуть взаємо виключати один одного, наприклад висока твердість та пластичність, тому однозначно описати за допомогою математичних моделей процес зношування досить складно [2].

Говорячи про зношування, варто розуміти, що це процес взаємодії двох поверхонь – поверхні тертя, та контр тіла. Такого роду взаємодія супроводжується не лише локальною деформацією, нагрівом, та мікроруйнуванням поверхневих

шарів, але й призводить до значної зміни комплексу фізико-механічних властивостей, хімічного та фазового складу, а також мікроструктури[3].

Незважаючи на велику кількість процесів, які одночасно діють під час зношування, на практиці виділяють всього 5 основні механізми зношування[3],[6]:

- адгезійне зношування;
- ерозійне зношування;
- корозійне зношування;
- поверхнева втома;
- абразивне зношування.

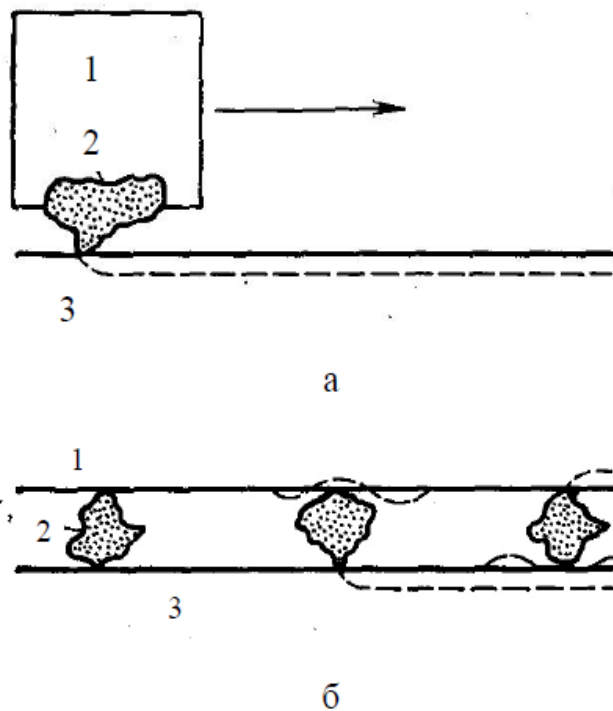
Розуміння наведених п'яти механізмів має вирішальне значення для правильного контролю кожного процесу зносу. Цей контроль можна здійснити на етапі проектування, коли можна заздалегідь розпізнати діючий механізм зношування. Цей контроль також можна здійснити згодом, коли виникає необхідність переробити трибологічну систему після несправності, спричиненої зносом. Проаналізуємо більш детально кожен з механізмів зношування.

### 1.1.1 Види зношування

В залежності від основного діючого фактору можна виділити 5 основних механізмів зношування:

а) **адгезійне зношування** – в основі процесу лежить взаємодія двох поверхонь з мінімальною шорсткістю та хвилястістю. Внаслідок ковзання продукти руйнування, з однієї поверхні починають прилипати до іншої [4];

б) **абразивне зношування** – це механічний знос в результаті, ріжучої чи дряпаючої дії твердих частинок, що знаходяться в закріпленому, напівзакріпленому чи вільному стані. В чистому вигляді цей механізм можна побачити в лабораторних умовах або ж при металообробці металів шліфуванням чи різанням (рис. 1.1). Характерним поверхневим проявом абразивного зношування слугують полоси та лунки зношування (рис. 1.2) [2];



1, 3 – контактуючі тіла; 2 – абразивна частинка

Рисунок 1.1– Механізм абразивного зношування закріпленим (а)  
і вільним (б) абразивом [4]

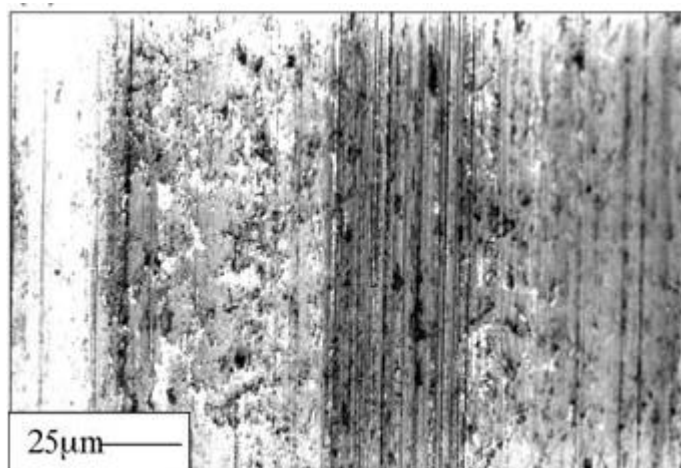


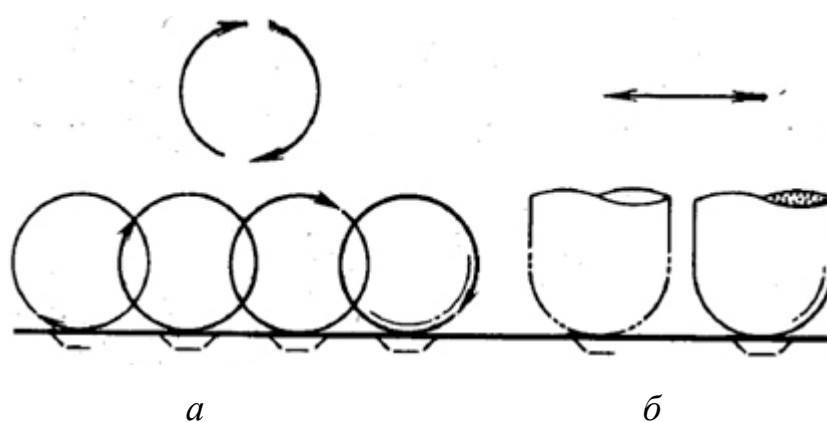
Рисунок 1.2 – Характерна мікроструктура білого чавуну після зношування [2]

в) **корозійне зношування** – виникає при взаємодії поверхонь в корозійному середовищі, де внаслідок ковзання поверхонь постійно знімаються захисні корозійні шари, що в свою чергу інтенсифікує процеси корозії в глиб матеріалу. Ко-



розійне зношування можна розглядати як прискорений механізм самої корозії, без механічного впливу корозія йшла на порядок довше [3];

г) **поверхнева втома** – виникає внаслідок зародження та поширення втомних тріщин. Тобто втомний знос відбувається, коли напруження в поверхневих та при поверхневих шарах перевищують втомну міцність матеріалу (рис 1.3). Внаслідок багаторазової дії на поверхні скупчуються дислокації, які збільшують напруження до початку зародження тріщини. Утворені тріщини зростають та переплітаються, що призводить до викришування матеріалу(рис. 1.4) [3], [4];



*a* – циклічне обертання; *б* – зворотно-поступальне коливання;

Рисунок 1.3 – Механізм зношування від втоми [4]

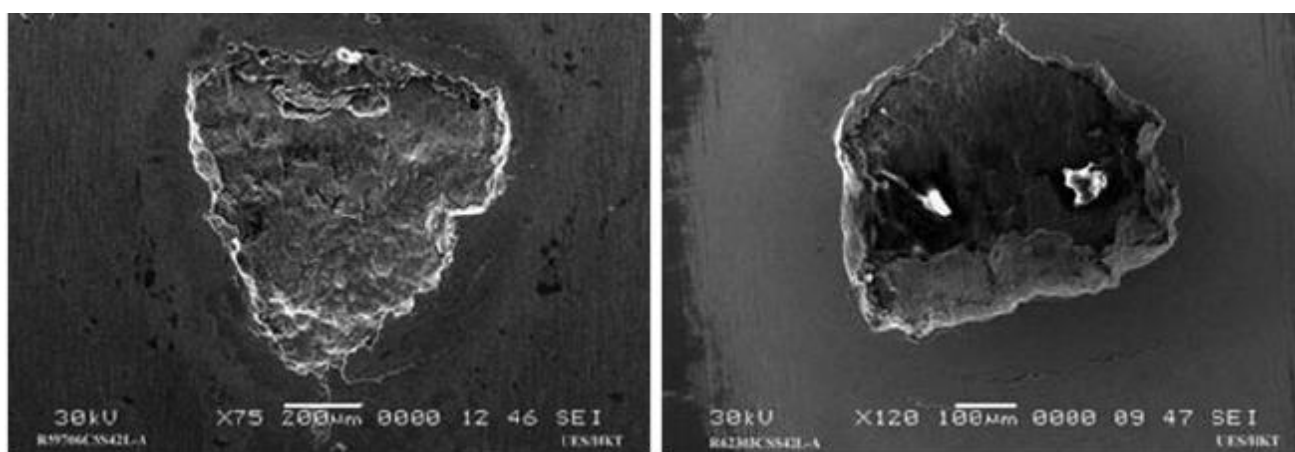


Рисунок 1.4 – Мікроструктура підшипникової сталі після втоми [7]

д) **ерозійне зношування** – руйнування поверхневих шарів відбувається внаслідок дії твердих частинок, газу чи рідини (рис. 1.5). Якщо виділити один елементарний акт дії на поверхню, то процес ерозії можна подати у такому вигляді: на поверхню, з певною швидкістю, під певним кутом, рухається частинка. Наслідок зіткнення з поверхнею відбувається її руйнування та видалення продуктів руйнування з поверхні. Атакуючими частинками можуть бути молекули газу чи рідини а також розподілені в середовищі тверді частинки [2], [3]. Структурною особливістю такого виду зношування буде наявність «фігур вивітрювання». В технології нанесення покриттів, можна зустріти в чистому вигляді даний вид зношування, за рахунок пікоструйної обробки відбувається активація та підготовка поверхні до нанесення покриттів.

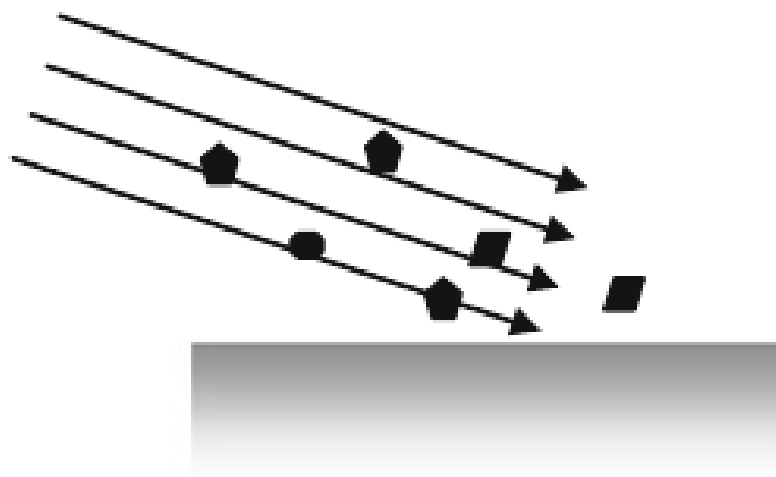


Рисунок 1.5 – Механізм ерозійного зношування [2]

Узагальнюючи наведені дані можна зробити деякі висновки:

– в переважній кількості реальних об'єктів, що працюють в умовах тертя, рідко зустрічається варіант чистого зношування, за одним із наведених механізмів, найчастіше це їх комбінація;

– однак досить широко поширеною є ситуація, коли на фоні дії всіх механізмів найбільш себе проявляє один. Як показують сучасні дослідження найчастіше проявляється – абразивний знос [1]–[6];

– кожен вид зношування має свої характерні структурні особливості (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Механізм зношування та його прояви [7]

Механізм зношування	Характерні прояви
Адгезійний	Зона сколів, отвори, перенос матеріалу
Абразивний	Подряпини, канавки, пази
Корозійний	Продукти реакції
Втомний	Тріщини, ржавчина
Ерозійний	Фігури вивітрювання

В подальшому розгляд матеріалу буде базуватись на зносостійкості в умовах абразивного зношування. Даний механізм найбільш поширений, та найбільш представлений в сучасній промисловості.

Велика кількість факторів та механізмів, що впливають на зношування, вносять певні поправки щодо розробки та експлуатації пар тертя. Розглянемо основні способи зниження зношування та основні засади конструювання трибологічних систем.

### 1.1.2. Основні засади створення пар тертя

При створенні нових матеріалів та вдосконаленні вже існуючих, важливим є встановлення вимог, які ставляться перед такими матеріалами. Що в свою чергу буде накладати суттєвий відбиток, як на технології отримання виробів, так і на виборі вихідних матеріалів. Основні підходи щодо розробки зносостійких матеріалів розглядалось великою кількістю авторів [6]–[66]. Узагальнюючи наведені данні можна виділити наступні особливості:

– на структурному рівні, матеріал повинен бути гетерофазним, складатись із твердих включень та пластичної матриці. Відповідно тверді включення будуть сприймати навантаження та стираючу дію, а пластична матриця виступатиме в ролі демпфера напружень;

- не допускаються структурні зміни в матеріалі під час тертя, його наклепування та окрихчення;
- для надання максимальної міцності, компоненти композиту повинні мати обмежену розчинність один в одному, як наслідок відбувається підвищена адгезія між частинка;
- обов'язкова відповідність між густинами та коефіцієнтами термічного розширення (к.т.р.) складових матеріалів, а також гарна змочуваність розплавом твердих включень.

Якщо узагальнити сказане, то для створення якісної пари тертя, потрібно дотримуватись двох головних умов:

- а) вводити включення з високим модулем пружності;
- б) введені включення повинні мати високу енергію активації руху дислокацій.

При створенні пар тертя, конструктори враховують велику кількість факторів, та використовують різні конструкційні підходи щодо зниження величини зносу (табл. 1.2). Однак на нашу думку, такий підхід досить обмежений і не дозволяє в широкому діапазоні керувати зносостійкістю матеріалу. Основним лімітуючим фактором такого підходу є не стільки можливості матеріалу, а в більшій мірі можливості самого пристрою.

Задовольнити поставлені вимоги досить не складно методами порошкової металургії. Отримані матеріали повинні мати високу щільність, пористість в межах 10 %. Вони можуть бути отримані подвійним пресуванням і спіканням, гарячим пресуванням, гарячою штамповкою, напиленням, наплавкою та ін. Не зважаючи на широке поширення порошкових спечених виробів, досить багато деталей виготовляють все ще методами лиття. Тому для більш ґрунтовного розуміння, процесів вибору матеріалу для роботи в умовах тертя, розглянемо види зносостійких матеріалів отриманих різними методами.

Таблиця 1.2 – Основні конструкційні прийоми підвищення зносостійкості [3]

Метод підвищення зносостійкості	Опис
Запобігання перевантаження	Перевантаження сприяє частковій генерації зносу. Внаслідок перевантаження плівки, що утворені мастилом – руйнуються.
Змащення	Змащення забезпечує створення плівки в зазорі між поверхнями тертя, що дозволяє уникнути контакту метал – метал та відповідно знизити величину зносу.
Висока твердість поверхні	Зношування твердої поверхні в порівнянні з м'якою в декілька разів менше. Досить часто робочі вали, підшипники та ін. піддають термічній обробці, тим самим збільшуючи твердість поверхні.
Обробка поверхні	Механічний знос можна зменшити за рахунок твердого шару якогось металу, наприклад, хрому.
Захист поверхні від попадання бруду, пилу та металевих частинок	Якщо бруд, пил і металеві частинки потрапляють у підшипник, вони ще більше подрібнюються. Якщо такі частинки твердіші, ніж поверхня, вона зношується та швидко пошкоджується.

## 1.2 Основні зносостійкі матеріали

### 1.2.1 Сплави на основі заліза

На сьогоднішній день, широкого використання в області зносостійких матеріалів набули сплави на основі заліза. Завдяки технології отримання, термічній та хіміко-термічній обробці, вдається отримати високі показники міцності та твердості, які дозволяють використовувати дані системи в парах тертя. Однак на фоні явних економічних переваг: дешевизна, широке розповсюдження; виникають певні технологічні обмеження. Важливо розуміти, що сталі навіть в загартованому

стані, значно поступаються по комплексу властивостей кераміці та композитам. І у вузлах з високим навантаженням, активним абразивним зношуванням, деталі, які виготовлені зі сталей, вимагають регулярної заміни. Не зважаючи на ці недоліки, сталі та чавуни до цього часу досить широко використовуються в промисловості.

Для зносостійких вузлів, рідко використовують не леговані сталі, найчастіше використовують високовуглецеві сталі леговані цілим комплексом хімічних елементів:

- підвищення міцності, окаленостійкості: хром, нікель, марганець., бор, кремній, кабальт, мідь;
- карбідоутворюючі елементи: вольфрам, молібден, ванадій, ніобій.

Для прикладу можна навести деякі леговані сталі 25X2МФА, Х23Н18, 30X13Н7С2, 08X17Н5М3,55X20Г9АН4, та чавуни[5].

Автори роботи [8] пропонують використовувати в якості зносостійкого матеріалу, для деталей в автомобільній, гірничій техніці, високо кремнієву бейнітову сталь. Така сталь має високі показники міцності, в'язкості і пластичності. Тим самим застосування висококремнієвої бейнітової сталі може зменшити втрати на знос та економічні втрати матеріалів, знизити вартість деталей та досягти ефекту економії енергії та скорочення викидів. Було поставлено завдання отримати нерівномірну структуру, за допомогою певних режимів обробки сталі, яка б включала аустеніт (пластична складова) та нижнього бейніту (тверда складова). По своїй сутності на меті було створення композиційної структури в сталі, яку вдалось отримати (рис 1.6). Дослідження зношування цих сталей показало, їх високу придатність до використання у вузлах тертя та економічну ефективність такого рішення. Дослідники, проаналізувавши структури зношування, зробили висновок, що зношування йде за механізмом абразивного стирання та руйнування за рахунок окиснення поверхні.

В роботі [9]–[10] автори мають досить подібні підходи щодо удосконалення властивостей сталей, основна концепція, полягає у розробці комплексу технологічних підходів, для отримання відповідної нерівномірної структури.

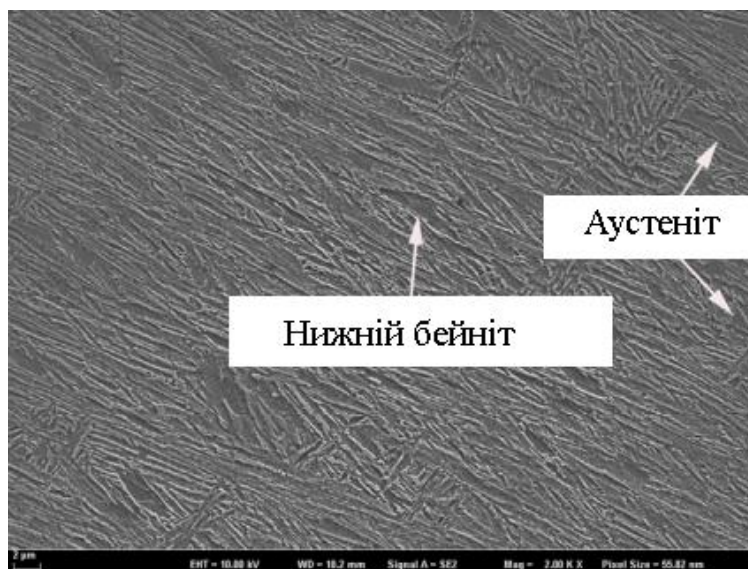


Рисунок 1.6 – Характерна мікроструктура високремистої бейнітової сталі [8]

Всі ці дослідження наводять на певний висновок, а саме на високу чутливість величини зношування в залежності від структурного стану матеріалу. Тобто рушійним фактором зносостійкості буде мікроструктура матеріалу, а також комплекс механічних властивостей фазових складових, їх топологія сили адгезії та рівномірність розподілу фаз.

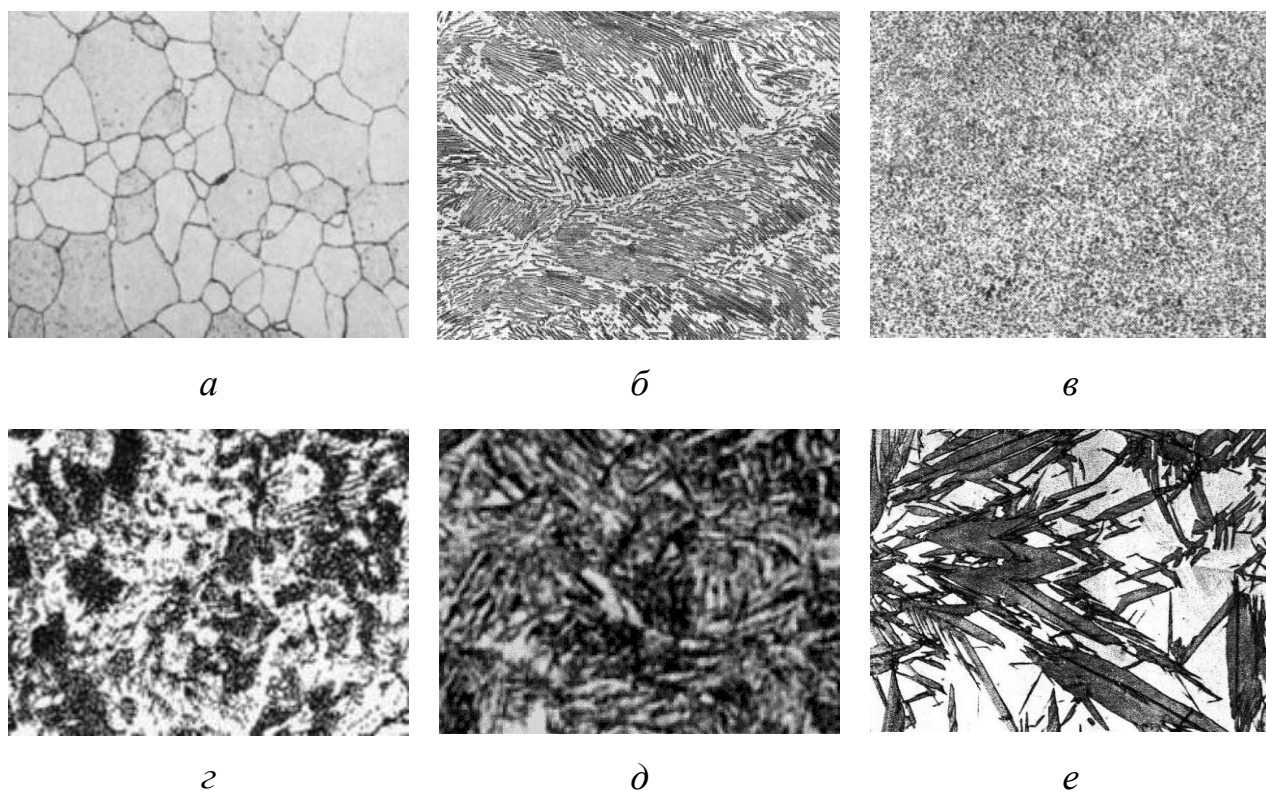
Розглядаючи сталі, можна виділити ряд (рис. 1.7) структурних рівнів (в порядку збільшення зносостійкості):

- а) феррит;
- б) перліт;
- в) тростит;
- г) мартенсит;
- д) суміш мартенситу з аустенітом;

В наведеному ряду фазових складових, найбільші значення зносостійкості будуть спостерігатись у випадку суміші мартенситу з аустенітом. За рахунок гетерофазності, вдається досягнути концентрації дії абразивного середовища на мартенситних зернах, а пластична матриця аустеніту дозволить ввловити дії напружень в околі зони тертя.

Для досягнення на порядок вищих показників зносостійкості, доцільно застосовувати сталі, з карбідоутворюючими елементами. Найбільш поширеною

в даному напрямку є швидкорізальна сталь. За рахунок складаної термічної обробки та наявності вольфраму у складі, вдається досягнути високі показники твердості та зносостійкості [13]. Отримання сталей з утворенням дисперсних включень за так званим дисперсно-зміцнюючим механізмом є досить обмеженим і не дозволяє в широкому діапазоні обирати вихідні компоненти та керувати властивостями сталі. Однак вихід можна знайти, застосовуючи методи порошкової металургії, а саме отримати порошок сталі, та дисперсний порошок зміцнюючої фази, після змішування, пресування та спікання можна отримати дисперсійно зміцнений матеріал, з високими показниками зносостійкості [34].



*a* – феррит; *б* – перліт; *в* – сорбіт; *г* – тростит; *д* – мартенсит;  
*e* – мартенсито-аустеніт

Рисунок 1.7 – Типова мікроструктура сталі

Іншим досить поширеним сплавом на основі заліза є чавун. Чавуни також досить широко застосовуються в парах тертя, за рахунок великої кількості вугле-



цю, який виступає в якості твердого мастила, вдається зменшити коефіцієнт тертя і як наслідок величину зношування. Важливим недоліком всіх чавунів, за окремим виключенням, це їх висока крихкість. Це накладає суттєві обмеження на використання даного класу матеріалів, оскільки зношування найчастіше має ударно-абразивний характер. Наведені дані, наводять на інше твердження, а саме необхідність використання високолегованих чавунів, де б введення лігатури сприяло утворення армуючих включень в матриці чавунів.

Легування чавунів найчастіше передбачає введення хрому, нікелю, молібдену. Завдяки цьому в структурі чавунів утворюються армуючі структурні складові. Якщо порівнювати структуру сталі та чавунів, то можна побачити суттєві відмінності, сталі мають структуру з рівномірно розподіленими включеннями дисперсних фаз, натомість чавуни мають локальні не однорідності, включення більш грубі, широко розповсюдженні дендрити та колони евтектик. Підвищення зносостійкості за рахунок такої структури в чавунах підтверджують автори [11]–[13], результати отриманих досліджень показують, що наявність таких структурних неоднорідностей, евтектичних включень в структурі сприяють збільшенню зносостійкості та комплексу механічних властивостей високолегованих чавунів (рис. 1.7).



Рисунок 1.8 –Мікроструктура білих зносостійких чавунів (x 360)

Можна дійти також до висновку, що не лише хім. склад в значні мірі буде визначати властивості та структуру матеріалу, але й технологія отримання. Автори роботи [14], вивчали вплив термічної обробки, на зносостійкість чавуну складу: 3,67 % C; 2,43 % Si; 0,53 % Mn; 0,035 % P; 0,007 % S; 0,062 % Mg; 0,34 % Mo; 0,19 % Cu. До обробки чавун мав перлітно-феритну структуру, типову для чавуну з геометрично правильною вузлуватою формою включень графіту. Було застосовано різні температури та час ізотермічної витримки, як середовище для гартування було обрано сольовий розчин 55 % KNO<sub>3</sub> + 45 % NaNO<sub>3</sub>. Було відповідно встановлено, що збільшення температури та часу витримки знижують зносостійкість (рис. 1.9). Нажаль автори при поясненні отриманих результатів опираються лише на значення мікротвердості та фактичних значень зношування, що не може в повній мірі описати, всі мікропроцеси, які протікають під час тертя. На нашу думку було б доцільно навести дані мікрострукторного аналізу, та рентгенофазові дослідження. Комплекс методик, дозволив би більш точно судити про природу та мехнізм дії того чи іншого фактору. Виходячи з даних роботи, можна припустити, що збільшення температури та часу витримки, сприяють утворенню крупних включень армуючих складових, які під час зношування будуть руйнуватись та видалятись із зони тертя.

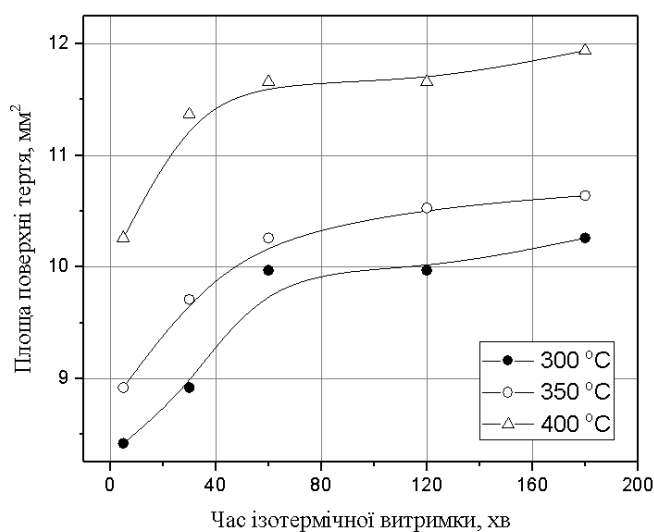


Рисунок 1.9 – Залежність величини зносу від часу ізотермічної витримки [14]

Найбільшого поширення серед всіх чавунів в якості зносостійкого матеріалу набули високохромисті чавуни. Як показано в роботі [15], завдяки вдачій комбінації матричної фази на основі заліза та включень карбідів, вдається отримати досить високі значення зносостійкості (рис. 1.10). Такі матеріали можна застосовувати в різних галузях промисловості (енергетика, металургійне виробництво, хімічна промисловість тощо).

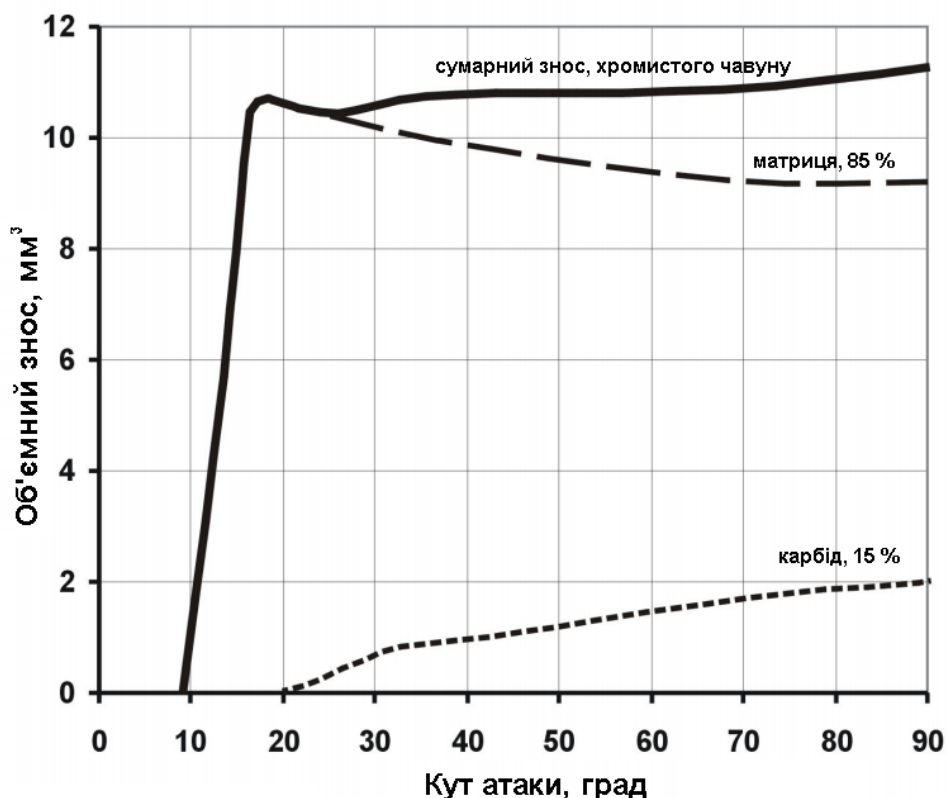


Рисунок 1.10 – Ерозійна зносостійкість високохромистого чавуну [15]

#### 1.4.2 Поверхнева обробка сталей

Поліпшення властивостей матеріалів на основі заліза (підвищити їх зносостійкість), вдається за рахунок нанесення захисних покриттів. Найбільш поширеною в практиці металургійного виробництва є хіміко-термічна обробка (ХТО) [35]. В основі процесу ХТО лежить дифузійне насичення поверхневих шарів, бором – борування, нітрогеном – азотування, вуглецем – цементация, тощо. Зрозуміло, що таки чином в приповерхневих шарах будуть утворюватись зони, зміцнення за рахунок зародження фаз боридів, нітридів чи карбідів. Такі маніпуляції дозво-

ляють в знайчній мірі підвищити показники значення твердості та зносостійкості матеріалу [35], [36].

Кожна з наведених видів обробки, має свою нішу застосування, наприклад, для умов роботи в ударно-стираючому середовищі більш придатне використання цементації чи азотування, а у вузлах, де виникає тертя між поверхнями, без введення мастила більш доцільно використовувати борування [37]. Якщо узагальнити багато річний досвід металургійного виробництва, то можна підбрати режими термічної обробки та комплексної хімікотермічної обробки, які б дозволили отримати приріст зносостійкості в порівнянні із загартованою сталю у десятки разів [38], [39].

Однак, не зважаючи на вказані переваги, все ж використання ХТО не є панацеєю, в області зносостійких матеріалів. По-перше нанесення такого покриття вимагає досить значних часових меж, оскільки зародження та ріст дифузійної зони, визначається дифузійною активністю атомів, та режимами дифузії. По-друге, навіть при багатогодинних витримках товщина шару покриття буде складати на рівні – 700 мкм, за рахунок Кнуценівського режиму дифузії, та виникнення бар'єрних ефектів, атоми не можуть дифузійним шляхом проникати на більш велику глибину. Наведені фактори, призводять і до необхідності використання досить складної технічної оснастки.

Нівелювати зазначені недоліки, можливо шляхом застосування в якості джерела матеріалу покриття – порошки. В практиці порошкової металургії найбільш широкого застосування набули методи газотермічні-методи напилення покриттів [35], [40]. Ці методи дозволяють напилювати не лише метали і сплави, але і композити, та керамічні сполуки. Тривалість процесу напилення на декілька порядків нижча, ніж при дифузійному насиченні поверхні. В загальному випадку для напилення застосовують різні матеріали (табл. 1.3).

Серед наведених матеріалів, варто виділити самофлюсівні сплави. Такі матеріали, які леговано хромом, молібденом, вуглецем, що при отриманні дозволяє отримати в матриці з нікелю чи заліза диспесні включення твердої фази [40].

Таблиця 1.3 – Основні матеріали для напилення

Група матеріалів	Представники	Опис
Чисті метали	Mo, Cr, Ni	Покриття з Mo наносяться найчастіше, слугують для захисту механізмів і деталей машин, які працюють в умовах тертя при підвищених температурах.
Інтерметалідні сплави	ПН70Ю30 (28Ni-33Al), ПН85Ю15 (12Ni-15Al), ПТ88Н12 (Ti-12.5Ni)	Покриття вказаних систем мають високу стійкість проти окиснення, корозії в агресивних середовищах, високу твердість та зносостійкість.
Самофлюси на основі Ni, Fe.	ПГ-АН9	Покриття на основі самофлюсівних сплавів мають високі показники твердості та зносостійкості, є в багатьох випадках основним матеріалом для газополуменневого напилення, оскільки не потребує захисного середовища
Композити	WC-Ni	Композити мають найвищі показники зносостійкості за рахунок наявності керамічних включень, з високою твердістю.

З іншого боку, введення таких елементів як бор та кремній, дозволяють напилювати такі матеріали на повітрі без захисного середовища. Як відомо бор та кремній мають дуже високу спорідненість до кисню, що як наслідок призводить до утворення захисного шлаку на поверхні основного металу. В практиці порошкової металургії існують два типи самофлюсівних сплавів, на основі нікелю та заліза. В наслідок більш простої технології отримання самофлюсів на основі заліза, вони є більш дешевшими. Ввести такі елементи як бор та кремній, за рахунок використання феробору та ферокремнію на багато простіше ніж здійснити аналогічні дії з нікелем. Однак не зважаючи на вартість, все ще досить поширеним і досить вивченим є самофлюс на основі нікелю. Такі покриття будуть мати високу щільність, адгезію та мінімальну пористість [41].

Підводячи проміжний підсумок, можна сказати, що для отримання найвищих показників зносостійкості варто застосовувати матеріали, з композиційною структурою. Іншим не менш важливим фактором в конструюванні композитів є вибір зв'язки. На нашу думку з позиції технології, властивостей та техніко-економічних показників, найбільш доцільно використовувати в даному напрямку самофлюсівний сплав на основі нікелю. Це дозволить отримувати одночасно зміцнену матрицю, мати просту технологію отримання та високу ефективність виробництва.

### **1.4.3 Композиційні матеріали на основі тугоплавких сполук**

Попередній аналіз показує, що досить поширені сплави на основі заліза, отримано методами класичної металургії, які передбачають отримання розплаву з подальшим литтям. Однак не зважаючи на такі технології, як лиття в кокіль та лиття під тиском, все ж досить проблематично отримати деталі складної форми, без застосування наступної механічної обробки. А як добре відомо, будь яка механічна обробка призводить до суттєвих втрат матеріалу, інколи до 80 %, що є досить економічно не вигідним [33]. Якщо питання геометрії, певними підходами вирішити, ще можливо, то отримання виробів з матеріалів, які мають високу тем-

пературу плавлення інколи не вдається взагалі, особливо якщо мова йде не про чисті метали, а про різноманітні сполуки, які під дією температури дисоціюють та випаровуються. Варто одразу, вказати на те, що дійсно велись роботи по отриманню матеріалів на основі тугоплавких карбідів в області гомогенності, плавлення в індукційні печі під тиском аргону. Однак це скоріш виключення із правила ніж загальна світова тенденція [49].

Названі недоліки очевидно можна обійти, використовуючи методи формування виробів, без прямого переплавлення. Здійснити дану вимогу можливо шляхом використання методів порошкової металургії. Таким чином за рахунок спікання можна отримати вироби з матеріалів, які іншим способом не отримати не можливо. Розглядаючи саме зносостійкі матеріали, варто акцентувати увагу, не на всі порошкові матеріали, а на композиційні матеріали з багатофазною структурою [1], [5], [22], [25].

Композиційні матеріали – це сукупність двох чи більше матеріалів, які мають властивості принципово відмінні від окремо взятих їх складових. Сьогоднішні дослідження показують, що створення композиційних матеріалів, можуть в собі поєднувати матеріали, які на перший погляд не можливо поєднати ; це і використання деревини, кераміки, органічних речовин, металів та сплавів [50]–[52]. Відповідно така полярність компонентів, дозволяють скомпонувати дуже широкий спектр властивостей матеріалів. Так ми можемо взяти дуже пластичний матеріал, з низькою твердстю, та дуже твердий, крихкий матеріал. Поєднання таких компонентів дозволить отримати матеріал, в на порядок вищими показниками загальної твердості та міцності. Створюючи різні композиції можна отримати матеріали для різноманітних вузлів, пристрої та задач.

Для задоволення вимог, які ставляться перед зносостійкими матеріалами, обов'язковою умовою є використання комбінації твердої та пластичної складових. При чому необхідно забезпечити рівномірний розподіл армуючих включень по об'єму матриці. Одразу варто визначити вихідні фактори, якими можна керувати і відповідно змінювати властивості: а саме розмір зерез, розподіл за розміром зерен, морфологія, розподіл за формою, співвідношення армуючих добавок та мат-

ричної фази. Якщо звернутись до всього багатства композиційних матеріалів, мабуть найхарактернішим представником таких матеріалів будуть тверді сплави (кермети) [34]. Твердий сплав складається в залежність від марким з різних твердих складових, найчастіше карбід вольфраму, та кобальтової чи нікелевої зв'язки. В сучасному виробництві тверді сплави знайшли своє застосування у металооброблювальній техніці, та в якості оснастки для синтезу алмазів. Тверді сплави мають високі показники твердості, міцності та зносостійкості. Проте як вже раніше зазначалось, існує досить велика проблема в застосуванні кобальтової зв'язки, через високу токсичність, та певні обмеження в країнах ЄС. Альтернативним варіантом може бути безвольфрамкові тверді сплави наоснові карбіду чи карбонітриду титану [53].

Якщо розглянути концепцію твердих сплавів, то можна дійти до висновку, що підходи в отриманні таких матеріалів, а головне їх структурні особливості, в повній мірі підходять для розробки пар тертя. В якості твердих включень варто обрати такі матеріали, які б мали високу твердість, міцність, модуль пружності та, що важливо досить добре змочуватись розплавом матричної фази. Задовільнити такі вимоги можна застосовуючи так звані фази проникнення. Однак серед широкого класу матеріалу, сприятливі властивості мають не всі. Використання нітридів, наприклад, лімітується їх низькою стійкістю при дії температури. З позиції зносостійкості найбільш перспективно використовувати карбіди перехідних металів, які мають високі показники твердості, модулів пружності, та міцності зерна [40], [43] (табл. 1.4).

Велика кількість авторів [7]–[31] підтверджують, що карбіди на відміну від інших матеріалів, мають більшу стійкість в умовах зношування. При цьому відмічається, їх висока механічна та фізико-хімічна стійкість. Карбіди в полікристалічному стані, дійсно мають високі властивості, однак їх можна підвищити додатково. В цьому напрямку проводились роботи щодо отримання литих тугоплавких сполук, плавкою витратного електроду в індукційні печі. За рахунок структурної однорідності та досконалості ґратки, відсутності домішків, мінімальній пористос-



ті, та квізімонокристалічному стану, вдається отримати максимальні значення міцності та твердості [49].

Таблиця 1.4 – Деякі властивості карбідів перехідних металів [43]

Сполука	Температура плавлення, °С	Густина, г/см <sup>3</sup>	Мікротвердість, ГПа	Модуль пружності, ГПа	К. т. р. $\alpha \cdot 10^{-6}$ , К	Теплопровідність, Вт/см*К
TiC	3260	4,92	32,0	460	7,47	0,068
ZrC	3530	6,66	26,0	413	6,73	0,116
HfC	3890	12,67	29,1	470	6,30	0,163
VC	2830	5,48	28,0	430	7,20	0,098
NbC	3700	7,82	24,0	518	6,65	0,150
TaC	3880	14,40	18,0	573	6,30	0,219
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	1895	6,74	13,0	380	11,70	0,190
Mo <sub>2</sub> C	2690	9,16	15,0	544	7,80	0,318
WC	2870	15,77	24,0	735	3,84	0,293

Висористання саме гранул з литих карбідів, дозволяють отримати найвищі показники зносостійкості. Для підтвердження даної гіпотези розглянемо міцність абразивних зерен отриманих різними методами, для карбіду титану (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – Міцність абразивна зерен карбіду титану, отриманого різними методами [36]

Зернистість, мкм	Міцність при стисненні $\times 10^{-2}$ , Н/зерно				
	Плавлений під тиском	Псевдоплавлений	Пічний синтез	Отриманий за методом СВС	Алмаз АСВ
125/100	410	321	118	71	560
250/200	780	667	150	142	900
630/500	3400	1710	294	-	-
100/800	7500	6908	-	-	-

Для вибору найбільш придатних матеріалів для роботи в умовах тертя, задамося певним орієнтиром, обравши в першому наближенні твердість визначальною властивістю зносостійкості, можна виділити групу матеріалів наведених на (рис. 1.8) [44]. Виходячи з таких умов найбільш доцільно використовувати було б карбід титану, цирконію та гафнію. Проте це не відповідає дійсності, як вже було сказано, зносостійкість це комплексна функція, і на фоні збільшення твердості буде зростати крихкість матеріалу, що негавтино буде відображатись на зносостійкості вцілому. Для досягнення відповідно максимуму властивостей, потрібно забезпечити не лише твердість керамічної складової, але й певну пластичність. Виходячи з цього можна виділити  $\text{Mo}_2\text{C}$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{NbC}$

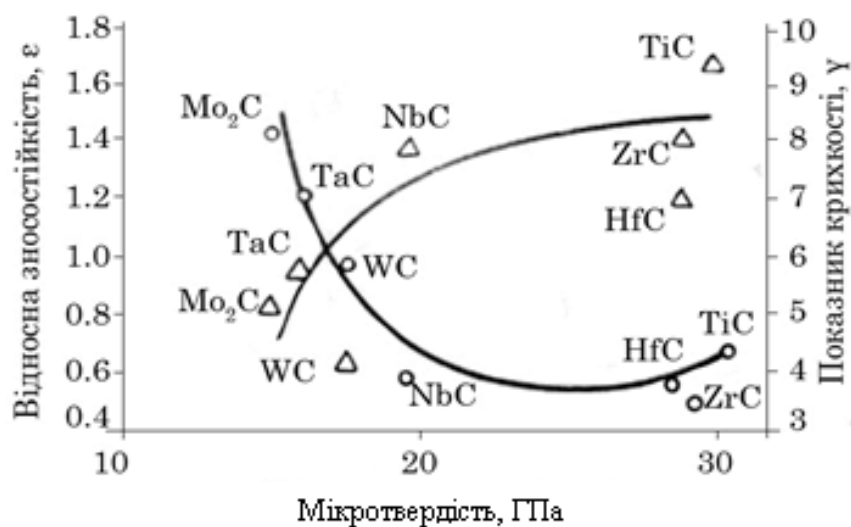


Рисунок 1.8– Залежність відносної зносостійкості, крихкості і в'язкості карбідів перехідних металів від мікротвердості [44]

Вже більше ста років, основним матеріалом, який використовується в якості зносостійких включень залишається карбід вольфраму. Унікальність даної сполуки, полягає у вдалій комбінації високих значень твердості, та наявності певної мікропластичності. І це незважаючи на дефіцитність та досить високу вартість, залишає вінець первенства за карбідом вольфраму. В трибології особливе місце займає не монокарбід вольфраму, а суміш нищого та вищого карбідів. Таку суміш вдається отримати шляхом плавлення карібуду вольфраму в печах Тамана чи за

допомогою обертового електроду [43]. За діаграмою фазових рівноваг вольфрам – вуглець (рис 1.9), де чітко видно наявність, та межі існування 2-х фаз. Відмічається, що якщо відбувається плавлення монокарбіду вольфраму, завжди при кристалізації буде присутній субкарбід  $W_2C$  [54].

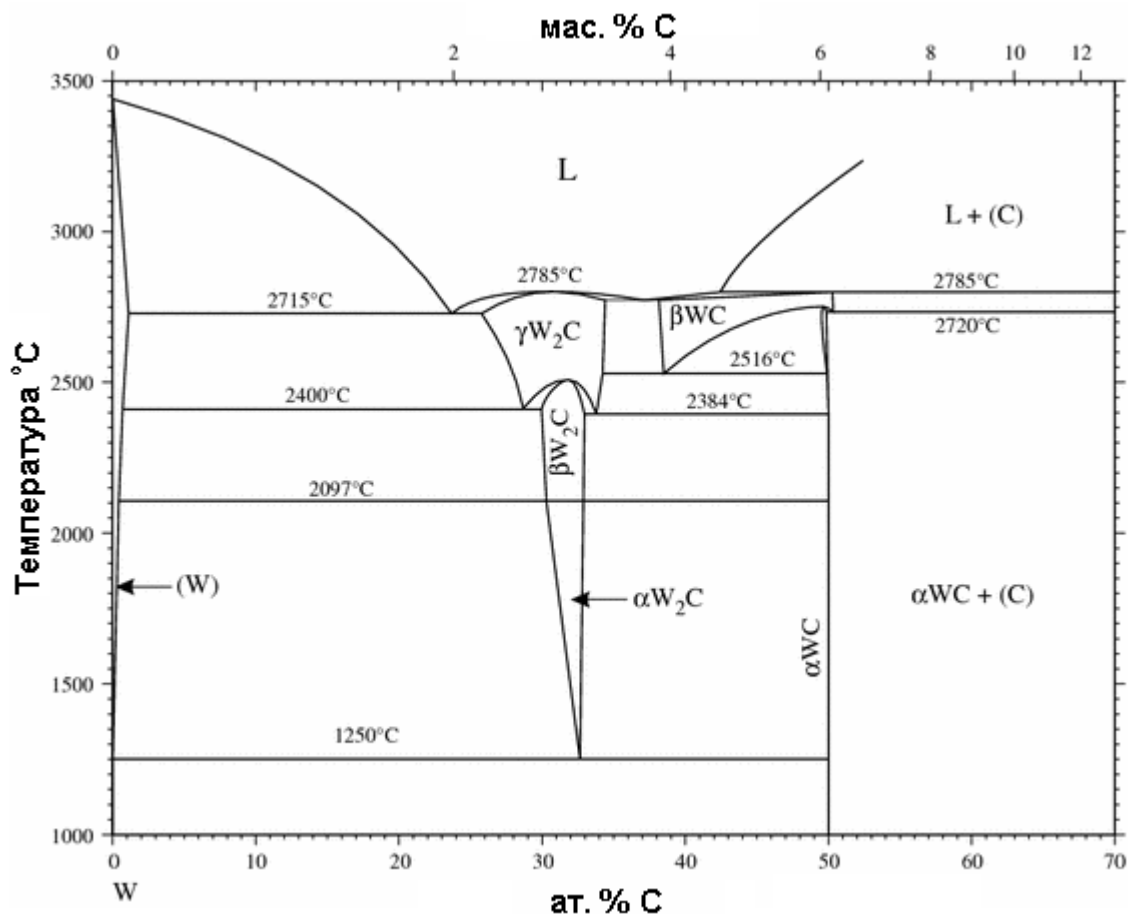


Рисунок 1.9 – Діаграма фазових рівнова W – C [54]

Автори робіт [42], [45] підтверджують висновки щодо оптимальності використання литого 2-х фазного карбіду вольфраму в якості зносостійкого матеріалу. При чому евтектична суміш  $W_2C$ -WC, буде мати на порядок вищі властивості в порівнянні з монокарбідом вольфраму. Це пояснюється досить вдалим поєднанням властивостей двох карбідів. Якщо ми виділимо один представницький елемент, приймаючи його як одне зерно, то буде бачити, що мікроструктура матеріалу складається з матриці – WC, та пластин з  $W_2C$ . Таким чином утворення композиції починається вже на мікрорівні. Твердість субкарбіду вольфраму вище, на-

томість мікропластичність переважає в монокарбіді. Таким чином в такому квазі-статичному стані, можна вважати, що ми маємо справу з композитом крихка матриця – крихкий наповнювач [45].

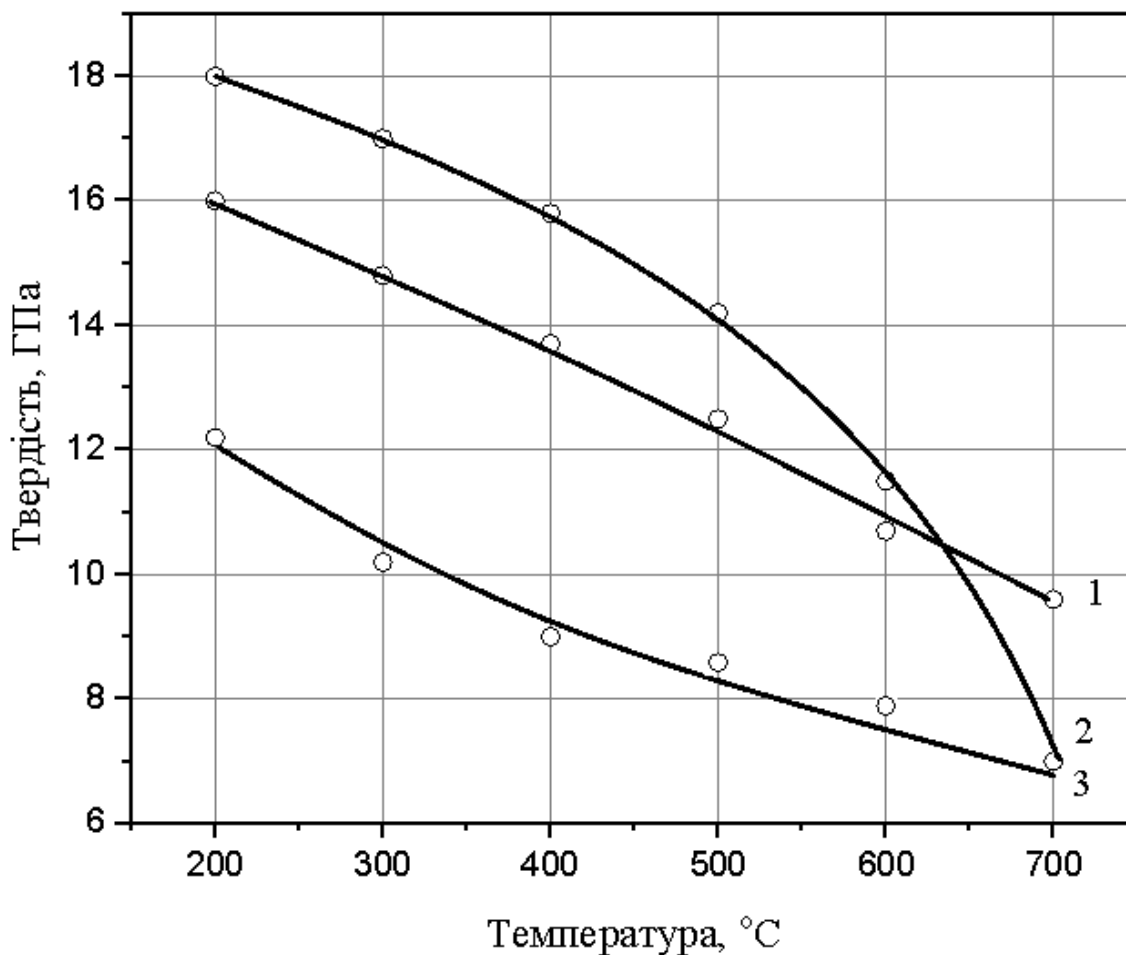
Останні дослідження вчених в області розробки безвольфрамових твердих сплавів, показують перспективність використання в якості наповнювача – карбиду ніобію. Колектив авторів з німецького інститут ВАМ, спільно із СВММ проводять дослідження щодо застосування карбиду ніобію в якості матеріалу для твердосплавного ріжучого інструменту [30], [31], [55], [56].

Стрімкий ріст заціквленості до тугоплавких сполук, який припадає на 80-ті роки минулого століття, призвів до синтезу так всеосяжного вивчення різних матеріалів, карбід ніобію не був виключенням. Однак в той період часу, свого застосування він не знайшов, його було рекомендовано використовувати в якості добавок до сталей, та як енгібітор росту зерна в твердих сплавах [53].

В роботах [30], [31] вивчались фізико-механічні засади створення керметів типу метал – карбід ніобію. Було показано, що в умовах зношування, зазначені кермети демонструють високі значення зносостійкості. Іншим важливим дослідженням, була робота авторів, над порівнянням поведінки, різців з твердих сплавів на основі карбиду вольфраму, та карбиду ніобію. Отримані данні показують, що в умовах різання, різці з карбиду ніобію мають на декілька порядків більшу стійкість та термін роботи в порівнянні з твердими сплавами на основі карбиду вольфраму. Автори аргументують це тим що, карбід ніобію має більшу температуру плавлення, твердість, що важливо твердість зберігається на достатньо високу рівні під дією температури (рис. 1.10), порівняння властивостей карбиду ніобію з карбідом вольфраму наведено в таблиці 1.6. Можна бачити, що карбід ніобію має в декілька разів меншу густину, що звісно буде відображатись на його ціні, та буде відображатись на роботі деталей. Збільшення маси в конструкціях буде призводити, до наростання інерційних сил, збільшення швидкостей та кінетики процесу. Показники твердості в карбиду ніобію дещо вищі, однак модуль пружності значно нижчий, як і модуль зсуву.

Таблиця 1.6 – Властивості карбідів вольфраму та ніобію [31]

Властивість	WC	NbC
Температура плавлення °C	3700	2870
Густина г/см <sup>3</sup>	7.82	16.63
Твердість, ГПа	22	28
Модуль пружності, ГПа	470	735
Модуль здвигу, ГПа	274	182
Коефіцієнт Пуассона	0.31	0,227



1 – WC – 6 % Co; 2 – NbC<sub>0.88</sub> – 12 % Co (SPS); 3 – NbC – 12 % Co (SPS)

Рисунок 1.10 – Гаряча твердість твердих сплавів NbC, WC [20]

За рахунок кристалічної будови та високій долі металевого зв'язку, карбід ніобію має досить хорошу провідність тепла [55]. Таким чином можна припускати, що тепло, яке буде генеруватись в зоні тертя, буде успішно відводитись, тим самим зберігаючи стійкість шарів матеріалу.

Аналізуючи залежність гарячої твердості композицій на основі карбиду вольфраму та ніобію (рис. 1.10) чітко видно, що збільшення температури призводить до зниження твердості карбиду вольфраму, та більш високих показників твердості для карбиду ніобію. Падіння твердості для WC припадає на діапазон від 500 до 700 °C, а для карбиду ніобію від 900 до 1000 °C. На що це може впливати під час тертя?! Відповідь не може бути однозначною, оскільки досить багато факторів може визначатись за рахунок збереження твердості при високих температурах. Ми припускаємо, що за рахунок високого ступеню розчинності карбиду вольфраму в металах групи заліза буде відбуватись активна взаємодія, при високих температурах, за рахунок розчинності компонентів. Це буде звісно виводи з ладу вузол тертя. Карбід ніобію має погану розчинність, тому буде відповідно збільшуватись тривалість роботи та якість оброблюваності поверхонь, говорячи про обробку різанням.

Оперуючими наведеними результатами можна припустити, що матеріали на основі карбиду ніобію будуть на порядок краще працювати в умовах тертя, в порівнянні з вже традиційними матеріалами на основі карбиду вольфраму. Однак варто зауважити, що виникає певний скептицизм в даному питанні. В зазначених роботах не наводиться пояснення чому і за яких умов відбувається експеримент. Наведення даних про стійкість різців на основі NbC, які в 10 разів мають вищу стійкість за умов різання в порівнянні з різцями на основі WC виглядає досить фантастично. Такі дані йдуть в розріз з вже проведеними дослідженнями в даному напрямку в частості доілдження окиснення карбиду ніобію. Показано [57], [58], що при температурах близько 500 °C він активно окиснюється, що фактично і обумовлює його обмежене використання. Авторами наводяться дані про те що під час окиснення карбід вольфраму утворює легкий оксид, який випаровується тим самим знижуючи окаленостійкість останнього, натомість карбід ніобію утворює

не леткі оксиди, чим і пояснюється його використання. Однак це не відповідає дійсності, основним параметром, який демонструє стійкість матеріалу при окисненні, є не летючість оксидів, а когерентність їхньої ґратки між основним металом та утвореним оксидом. В карбїду ніобію оксиди не когерентні внаслідок чого, відбувається утворення окидів ніобію, та їх миттєве розтріскування з проникненням атомів кисню в глибину матеріалу.

Композити за участі карбїдів та металевої зв'язки вивчалися у роботах [26]–[29], де в якості матричної фази використовували чистий нікель. Використання чистих металів, вимагаєв свою чергу обов'язкової прустність захисного чи інертного середовища. Це в значній мірі буде ускладнювати технологію, та обладнання. До того ж, якщо отримання матеріалів, передбачає утворення рідкої фази, потрібно досягнути температури плавлення, та перегріти розплав. Що все в комплексі відкладає суттєві обмеження на методи отримання.

Більш доцільно використовувати в якості матриці не чистий нікель, а самофлюсівний сплав на основі нікелю [18]–[29]. Що такий підхід дозволяє отримати: по-перше за рахунок температури утворення рідкої фази близько 1150 °С, немає необхідності використовувати габаритне та потужне обладнання; по-друге – як вже згадувалось, добавки кремнію та бору, будуть сприяти утворення захисного шару на поверхні основного металу; по-третє – наявність вуглецю та карбїдоутворюючих металів в складі самофлюсу, будуть сприяти додактовому зміцненню матриці дисперсними фазами карбїдів, боридів та деяких інтерметалїдів.

При конструюванні будь-яких матеріалів, дуже важливо розглядати вплив різних факторів на основні властивості матеріалу, які потрібно отримати. Розглянемо більш детально вплив різних факторів в частості твердості, на зносостійкість.

#### **1.4 Вплив твердості на зносостійкість**

Зносостійкість матеріалів це функція багатьох змінних, яка залежить від багатьох взаємо виключаючих факторів. Роботи що ведуться в напрямку теоретич-

ного обґрунтування параметрів, які впливають на зносостійкість матеріалу досить багато. Описувати процес опираючись на багатокритеріальні зачачі досить важко, тому найчастіше виділяють декілька, а то й один домінуючий фактор впливу. В робота [59]–[61] автори досліджували вплив твердості на величину зношування. В контексті сталей показано, що зносостійкість ферритних сталей може бути пов'язана з мікроструктурою, яка визначається складом і термічною обробкою, існує кореляція, між межею текучості, твердістю та структурою. Для перлітових сталей, що містять понад 10 об. % перліту – зносостійкість та об'ємна твердість, є лінійними функціями від об'єму перліту. Інтегральна твердість не є прямим показником зносостійкості ферритних матеріалів, однак на ряду зі структурою вона може визначати величину зношування. Зі збільшенням твердості зносостійкість буде також зростати.

Для композиційних матеріалів [61], на прикладі твердих сплавів на основі карбиду вольфраму, було показано, зі збільшенням кількості кобальтової зв'язки величини зношування також збільшується, що також наводить на думку, про вплив інтегральної твердості на зносостійкість (рис. 1.11)

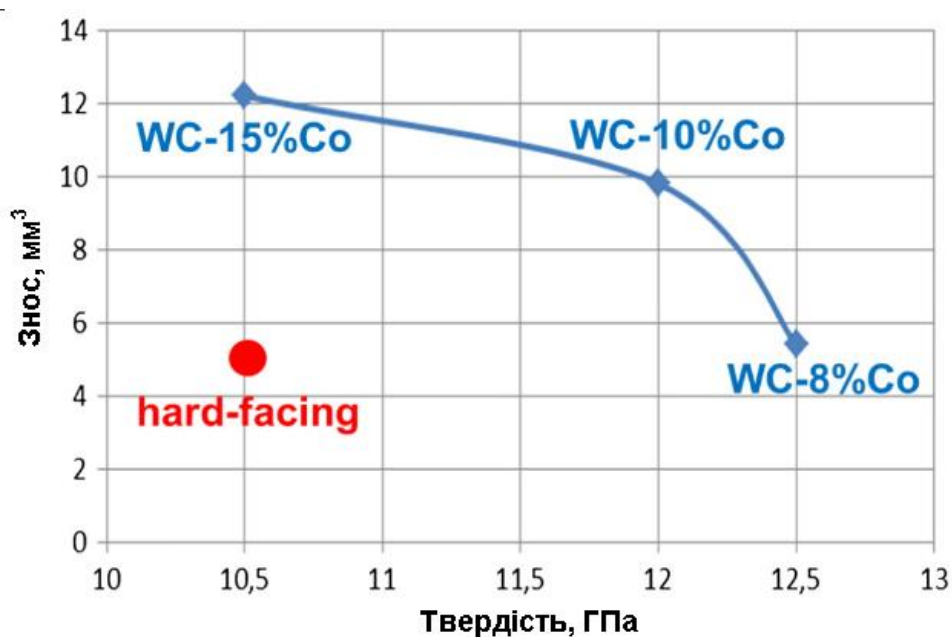


Рисунок 1.11 – Залежність величини зношування від твердості твердих сплавів [61]



Насправді процес зношування є досить складним і описати його виключно одним параметром не можливо. Досить суттєво буде впливати мікроструктура матеріалу, мікромеханічні властивості та ін. В попередніх розділах давалась оцінка використанню твердості, як параметра для вибору матеріалів. Вона може дати досить хибний шлях для вибору матеріалів. Оскільки дуже твердий матеріал, буде одночасно досить крихким, що робить його мало придатним для використання. Проте застосування такого підходу при проектуванні композитів, більш ніж виправдано, тому що будуть працювати механізми компенсації крихкості пластичною матрицею.

## **1.5 Методи отримання зносостійких матеріалів**

Сучасні дослідження отримання зносостійких композитів, ґрунтуються на різних технологіях та методах. Варто виділити декілька основних методів отримання: інфільтрація розплаву в пористу матрицю, пресування/спікання, оплавлення високоенергетичними методами [6]–[18]. Розглянемо більш детально наведені методи.

### **1.5.1 Метод інфільтрації розплаву**

При отриманні матеріалів методом просочення розплаву, обов'язковою умовою самочинного проникнення рідкої фази в капіляри пористого простору є кут змочування менше  $90^\circ$ . За таких умов, сили Лапласа, що діють на розплав будуть втягувати його в капіляри. Звісно в сучасних матеріалознавчих задачах, бувають випадки, коли матеріали, не демонструють достатньої змочуваності, для отримання деталей самовільною інфільтрацією, про те цей фактор можна обійти, застосовуючи примусове просочення під тиском. Такий метод дозволяє отримувати композиційні матеріали, з досить великим відношенням довжини до діаметру, при цьому має місце 100 % щільність виробу [16]. Як вже зазначалось раніше

найвищі показники зносостійкості демонструють композити на основі карбіду вольфраму в якості наповнювача.

Автори [16] пропонують в якості зносостійкого матеріалу, мідь–карбід вольфрамову композицію, отриману методом інфільтрації. Виготовлення композити, автори пропонують виконувати наступним чином : виготовити, зі сталі, методом механічної обробки, форму у вигляді стаканчику. В цю форму засипати гранули з карбіду вольфраму, розрахованої маси, а наступним шаром вводять мідь. Підготовану таким чином форму, розміщують в печі та проводять поступовий нагрів зі швидкістю 140 °С/год. Досягнувши температури плавлення, проводять перегрів розплаву на 100 °С до 1150 °С. При такій температурі проводять витримку на протязі 2 годин, з наступним охолодженням разом із піччю. З метою підвищення змочуваності міді, було прийнято рішення виконати легування, гляхом введення лігатур марганцю, нікелю та кремнію. Схема просочення показана на рисунку 1.12. Так як матрична фаза, кольоровий метал, який піддається додатковій термічній обробці, в частості старіння, авторами було проведено комплекс термічної обробки, з досягнення високих значень міцності, твердості та як наслідок зносостійкості. Стосовно структури отриманого матеріалу, варто було б очікувати утворення гетерофазної структури, що власне кажучи і було отримано. Взаємодії з утворенням вторинних структур, авторами не відмічається.

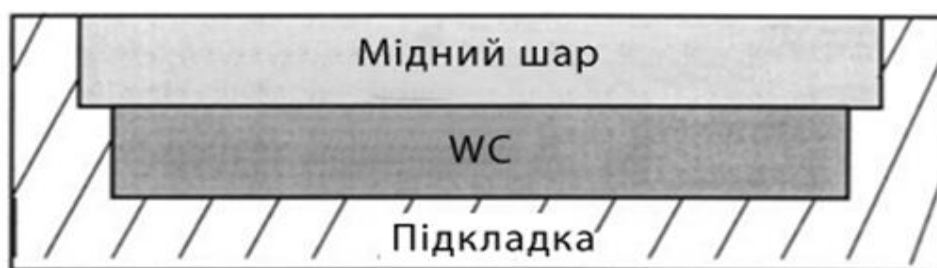
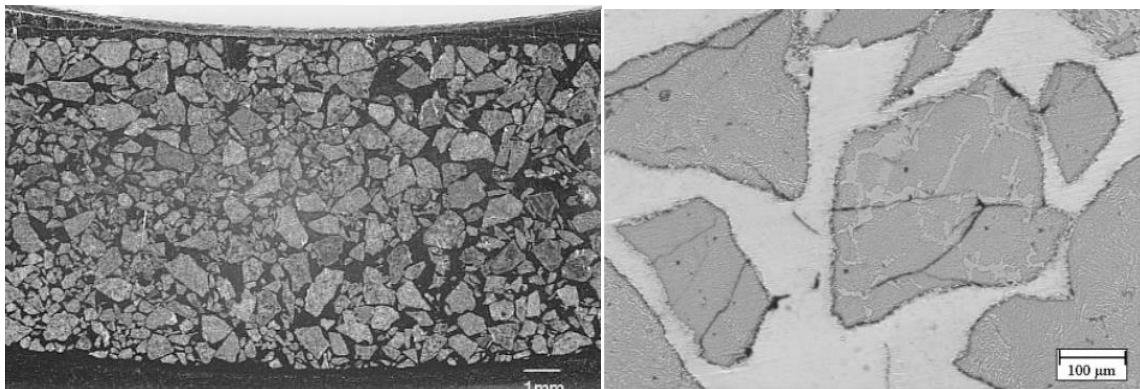


Рисунок 1.12– Схема просочення карбіду вольфраму мідним розплавом

Аналізуючи отримані дані [16], лишається все ще не висвітлені ідеї використання такого циклу технологічних операцій для отримання композиту. Досить складно зрозуміти, навіщо при достатній змочуваності відбувається витримка зра-

зків в печі близько 2 годин. При чому не відмічається суттєва зміна структури, розчинність карбіду вольффарму в матриці. Що є цілком закономірним, з погляду діаграм фазових рівноваг, де при температурі просочування, майже відсутня розчинність. Однак це ставить інше питання, а чи є доцільно використовувати на стільки інертну матрицю. Міцність счеплення між фазовими складовими, зростає за рахунок певної розчинності.



*a*

*б*

*a* – поперечний переріз отриманого покриття;

*б* – повздовжній переріз отриманого покриття

Рисунок 1.13– Мікроструктура покриття Cu–WC

### 1.5.2 Пресування та спікання композитів

Пресування та спікання являються основними операціями в області порошкової металургії, та дозволяють отримати вироби будь якої форми, з високими показниками механічних, фізичних та хімічних властивостей. Для виготовлення композитів шляхом спікання використовують на сучасно етапі, гяряче пресування, спікання у вакуумі чи електро-розрядне спікання [17], [18], [19], [62]–[66].

Автори [17], [62] проводили дослідження отримання вже згаданих матеріалів Cu–WC. Однак в основі процесу лежить не інфільтрація розплаву, а класичне спікання. Порошки міді та карбіду вольффарму, змішувались та та засипались у форму. Наступна термічна обробка, складається з 2-х спікань: 1-ше попереднє спікання за температури 450 °C, з часом витримки в 30 хв; 2-ге основне спікання

проводилось протягом 1 години за температури 1000 °С. В обох випадках було використане захисне середовище з ендогазу. Автори наводять дані, щодо механічних властивостей, структури та фазового складу. Проте не наводяться аргументи, щодо використання ускладненої технології спікання, в 2 стадії, на наш погляд це досить не виправдано. Досить не зрозуміла мета, такого підходу, пластифікатор, чи інші речовини, які б потребували відгонки не були введені в шихту.

Існують роботи по спіканню систем типу самофлюсивного плаву, так в роботах [18], [19] пропнується розробка композитів на основі сплаву NiCrBSi, з армуючими добавками твердого сплаву марки ВК-8. Формування композити передбачає змішування порошків, з органічною зв'язкою. За рахунок полімеризації, вдається отримати досить гнучкі стрічи, які формують своєрідні багатошарові пакети, так спікаються. Іншим варіантом є накладання стрічки на стільну поверхню та напікання її в якості покриття. Спікання проводилось у вакуумі, за температури 1200 °С, було передбачено поступовий нагрів з метод видалення органічної зв'язки.

Найбільш поширеним в аспекті пресування та спікання, є виготовлення композитів на основі карбиду вольфраму та металів групи заліза в якості зв'язок. В робота [63]–[66] наводяться дано щодо отримання композитів шляхом спікання виробів різними методами. Автори [63],[64] пропонують проводити отримання композитів шляхом спікання сумішей у вакуумі. Застосовувалась традиційна технологія твердих сплавів, з використанням в якості матриці кобальту, нікелю, залізо-нікелевий сплав. На першому етапі проводили подрібнення порошку, з наступним введенням 1 мас. % розчину каучуку в бензині, перемішуванням та підсушуванням у вакуумі за 70 °С протягом 2 год. Отриманий порошок, пресували за тиску 150 МПа, та спікали у вакуумі. Спікання має наступні особливості:

- спочатку проводили нагрів до температури 580 ° С зі швидкістю нагрівання 4 ° С / хв і витримується при 580 ° С протягом 80 хв при вакуум 10<sup>-1</sup> Па;

- нагрів від 580 ° С до 750 ° С зі швидкістю нагрівання 3,89 ° С / хв і тримають при 750 ° С протягом 10 хв, а потім нагрівають від 750 ° С до 1200 ° С зі

швидкістю нагрівання близько  $4,44 \text{ }^\circ\text{C} / \text{хв}$  і витримували при  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  протягом 60 хв у вакуумі  $10^{-1} \text{ Па}$ ;

– нагрітий до температури спікання (1300, 1340, 1380, 1420 і  $1460 \text{ }^\circ\text{C}$  відповідно) зі швидкістю нагрівання  $2,89 \text{ }^\circ\text{C} / \text{хв}$ . Коли температура піднялася до  $1220 \text{ }^\circ\text{C}$ , в камеру напускається аргон до тиску 500 Па;

– нарешті, піч охолола від температури спікання до кімнатної температури.

Виокнувши такі операції, очевидно, що було отримано структуру твердих сплавів, яка складається з включень карбіду вольфраму та матриці (рис. 1.14)

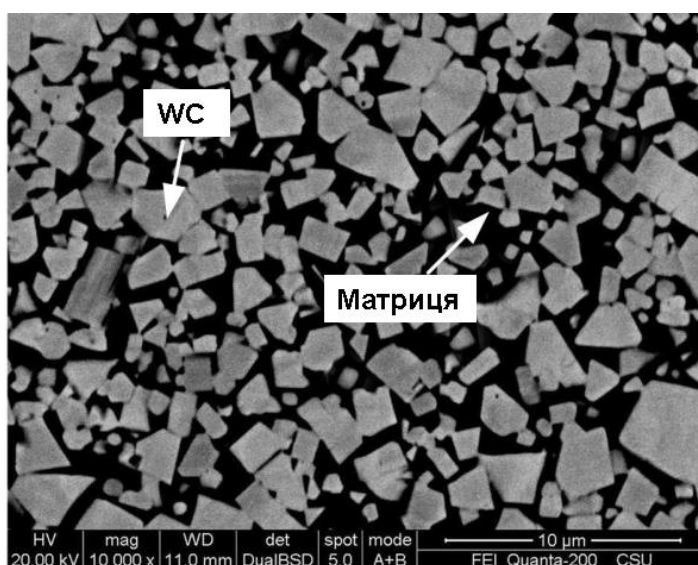


Рисунок 1.14 – Структура композитів WC–Ni(Co, Fe-Ni) [63]

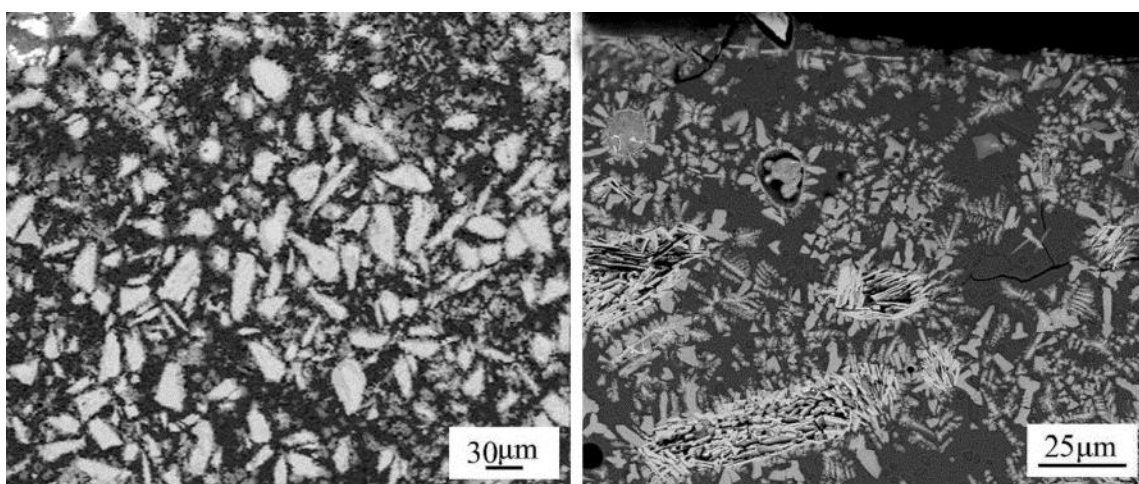
Варто звернути увагу, що автори не наводять аргументації стосовно вибору такого складного стадійного процесу і яку мету вони переслідують виконуючи спікання в 4 етапи. Якщо більш доцільно було б виконувати спікання по класичній технології твердих сплавів.

Автори [65], [66] пропонують виготовлення композитів на основі карбіду вольфраму, де в якості матриці обрано інтерметаліду на основі заліза FeAl. Виготовлення виробів пропонується проводити методами електро-розрядного спікання. Вихідні порошки змішували та подібнювались електро-іскрове спікання проводилось за тисків газу 1,33 Па, та прикладним тиском в 40 МПа за температури

1150 ° C, протягом 3 хв. На фоні інших методів, показано, що використання даної технології дозволяє зберегти дрібні зерна карбіду.

### 1.5.3 Адитивні технології

Адитивні технології, передбачають використання в якості, енергоносія, для спікання лазерний чи електронний промінь. Використання лазерного чи електронного променю в якості джерела нагріву для спроведення ущільнення, присвячено досить багато робіт [17]–[29]. В основі процесу отримання лежить пошарове напикання, чи оплавлення матеріалу, за рахунок проходження променю по заданій програмі руху. Мікроструктура покриттів отриманих лазерним оплавленням зображено на рисунку 1.15.



*a*

*б*

*a* – мікроструктура карбідів в нижній частині;

*б* – мікроструктура карбідів у верхній частині

Рисунок 1.15– Мікроструктура композиційного покриття NiCrBSi/WC  
оплавленого лазерним променем [20]

Таким чином вдається отримати, вироби з досить високими значеннями щільності та низькою термічною дією. Тому якщо порівняти з методом наплавки

неплавким вольфрамовим електродом, де присутня підвищена термічна дія, відбувається мікродеформація матеріалу [19].

Не зважаючи на досить поширеність використання адитивних технологій, варто розуміти глибоку проблематику процесу. При отриманні деталей простої форми та не великого перерізу по висоті, не виникає суттєвих проблем. Проте, якщо деталь ускладнюється, з'являються отвори та переходи по висоті, виникають певні проблеми, пов'язані з температурним градієнтом та нерівномірністю усадки виробу. З іншого боку, промінь нагріває виключно локальну ділянку зразків, це є його перевагою і відночас недоліком, оскільки це не дає можливості проводити витримку при певній температурі. Якщо ціль отримати щільний виріб, то дійсно можна з легкістю в більшості випадків спробувати використовувати адитивні технології, долаючи градієнт температур нагрівом через підкладку, та обертання на роликах. Але, якщо ціль отримати матеріал, з певними структурними особливостями, які можуть бути отримані лише при температурних та часових витримках, даний спосіб отримання є непридатним.

## **1.6 Висновки та постановка задачі дослідження**

Аналіз літературних даних, дозволяє зробити висновок, що отримання зносостійких композиційних матеріалів на основі литого карбиду вольфраму, методами порошкової металургії, в значній мірі залежить від вибору вихідних матеріалів, методів отримання кінцевих виробів, фізико-механічних процесів, які протікають під час технологічних операцій. Тому розробка технологічних та теоретичних засад отримання композиційних матеріалів за участю литих тугоплавких сполук, потребує уточнення та вдосконалення, вивчення рушійних сил процесу формування структури та підбіру оптимальних режимів отримання матеріалів.

Варто зазначити, що найвищі фізико-механічні властивості, демонструють композиційні матеріали, які поєднують в собі комбінацію, пластичної матриці та гранул тугоплавких карбідів. Добре відомо, що серед карбідів, найвищі показники твердості та зносостійкості демонструє карбід вольфраму, за рахунок поєднання

високої твердості та мікропластичності. При виборі матричної фази, варто також звернути увагу, на технологію отримання, а саме обирати такий матеріал, який би дозволив не використовувати вакуум чи захисний газ і водночас забезпечував необхідний комплекс властивостей. В даному відношенні перспективно використовувати самофлюсівні сплави на основі нікелю. Як відомо самофлюсівні сплави, за рахунок утворення армуючих включень, є вже зносостійким матеріалом, до того ж наявність в складі бору та кремнію, дозволяють проводити процес отримання матеріалів на повітрі.

З метою отримання високощільних композитів, із заданими властивостями, необхідно досить ретельно віднестись до технології їх отримання. В контексті використання самофлюсівних сплавів, досить складно отримати високу щільність традиційними методами. Внаслідок високої змочуваності, самофлюсівний сплав миттєво змочує поверхню та закриває закриті пори, що як наслідок негативно позначається на властивостях матеріалу. Отримати високу щільність вдається відповідно або у вакуумі, або ж при отриманні матеріалів за рахунок інфільтрації. З погляду техніко-економічних показників, найбільш доцільно використовувати саме інфільтрацію пористого каркасу.

Узагальнюючи вище наведені дані, в роботі поставлено завдання, дослідити процеси формування структури композицій самофлюсівний сплав на основі нікелю – литий карбід вольфраму, встановити основні рушійні сили, та закономірності. Дослідити поведінку матеріалів в умовах газоабразивного зношування та в парі із закріпленим абразивом. Визначити оптимальні технологічні режими для отримання зносостійких композиційних матеріалів, з найвищими показниками зносостійкості.



## 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

### 2.1 Вихідні матеріали

З метою отримання високих властивостей зносостійкості в якості вихідних матеріалів було використано самофлюсівний сплав на основі нікелю, марки АН9, хімічний склад та твердість якого наведено в таблиці 2.1, та гранули твердих тугоплавких сполук (ТТС) – литого карбиду вольфраму та карбиду ніобію (табл. 2.2).

Таблиця 2.1 – Характеристики самофлюсівного сплаву АН9

Розмір порошку	Хімічний склад	Твердість, HRC
100 мкм	Ni – основа; Cu - 6%; C – 0,85%; Si – 2,2%; Cr – 8%; В – 2,9%; Fe – 5%; P – 0,6%	48 – 49

Таблиця 2.2 – Характеристика литих карбідів

Матеріал	Чистота	Фази	Твердість, HRA	Стан
Карбід ніобію	99,9%	NbC	74	Виливки
Карбід вольфраму		WC-W <sub>2</sub> C	77	

#### 2.1.1 Отримання гранул

Виливки тугоплавких карбідів було отримано методом плавки з використанням витратного електроду, який виготовлено з порошоків сполуки яку необхідно отримати. Процес плавлення проводили в електродуговій печі, під тиском аргону. Тиск газу обирається виходячи з імовірності пригнічення випаровування компонентів сполук в наслідок їх денатурації [47], [49].

Швидкість охолодження від температури попереднього підігріву кристалізатора до 2500 °С регулювали в межах від 35 до 50 °С/хв. за рахунок її поступово-

го зменшення. Тиск газу у робочій камері печі під час плавлення змінювали у межах від 1,0 до 9,0 МПа [49].

Дослідження взаємозв'язку між структурою отриманих виливків з їх складом, дало можливість визначити оптимальні умови отримання (табл. 2.3). Отримані виливки подрібнювались механічно в ступах Абіха та за допомогою щоківних дробарок.

Таблиця 2.3 – Оптимальні режими отримання плавлених тугоплавких сполук [49]

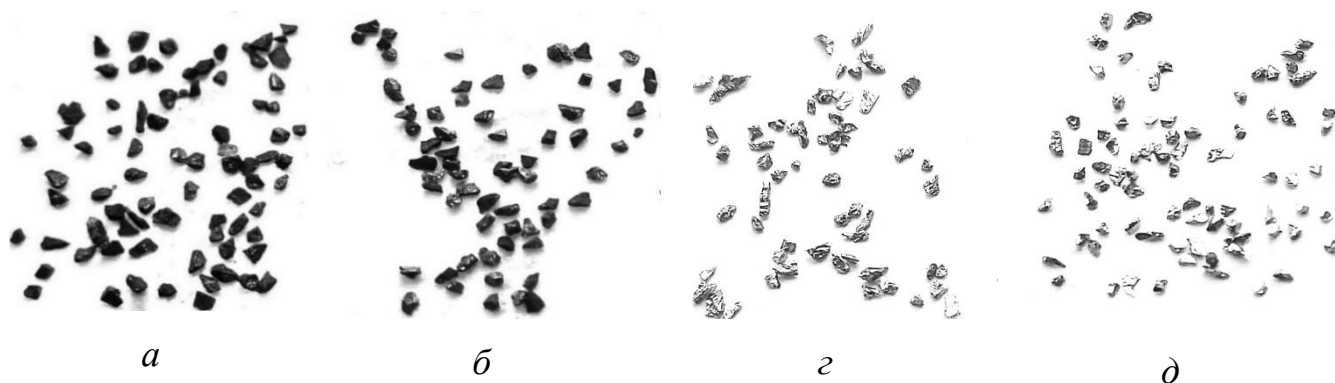
Сполука	Густина струму , А/см <sup>2</sup>	Тиск газу в робочій камері, МПа	Швидкість охолодження розплаву, °С/хв.
TiC	120 – 130	5,5– 6,0	35 – 40
ZrC	140 – 160	6,0 – 6,5	35 – 40
VC	160 – 180	6,0 – 7,0	40 – 50
NbC	190 – 200	7,0 – 8,0	40 – 50
TiC-WC	180 – 220	7,5 – 9,0	40 – 45
TiC-TiB <sub>2</sub>	180 – 220	7,5 – 8,0	40 – 45

### 2.1.2 Технологічні властивості гранул

Для отримання високощільних композиційних матеріалів важливе значення мають технолонічні властивості вихідних компонентів. Було визначено насипну щільність, пористість каркасу, яку утворюють вільно засипані гранули, та характерену форму частинок.

Реологія частинок ТТС визначалась шляхом зйомки їх загального вигляду на цифровий носій. Результати наведено на рисунку 2.1. З рисунку 2.1 можна по-

бачити, що характерним для гранул отриманих механічним подрібненням є скальчата форма.



*a, в* – 515 мкм; *б, д* – 357 мкм;

Рисунок 2.1 – Гранули реліту (*a, б*) та карбиду ніобію (*в, г*) різних фракцій

Використовуючи стандартну методику визначення насипної щільності було отримано насипну щільність гранул ТТС. Вимірні значення насипної щільності дозволили провести розрахунки по визначенню пористості каркасу вільно насипаних гранул. Отримані технологічні властивості наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Насипна щільність, відносна насипна щільність та пористість каркасу з ТТС реліту та карбиду ніобію

Матеріал	Середній розмір гранул, мкм	Насипна щільність, г/см <sup>3</sup>	Відносна насипна щільність	Пористість каркасу
РЕЛІТ	515	11,9	0,75	0,24
	357	10,74	0,68	0,31
	257	10,21	0,64	0,35
	150	9,91	0,62	0,37
Карбід ніобію	515	5,15	0,32	0,34
	357	4,63	0,29	0,40
	257	4,52	0,28	0,42

	150	4,32	0,27	0,44
--	-----	------	------	------

### 2.1.3 Розрахунок наважки вихідних компонентів

Отримання композитів методом просоченням відкладає певний відбиток на технологію. Для досягнення сто відсоткової щільності композитів, відносна кількість зв'язки повинна відповідати об'єму пор, які утворюють вільно засипані гранули. Очевидно, що кількість зв'язки на пряму залежить від технологічних властивостей вихідних гранул і для кожного матеріалу її кількість буде різною.

Об'єм пустот (пор)  $V_2$  визначали за формулою:

$$V_2 = \frac{V_1 f}{1-f}, \quad (2.1)$$

де  $V_1$  – об'єм гранул в заготівці;

$f$  – пористість порошкового тіла (заготівки).

Об'єм гранул визначається за відомим значенням ваги гранул в заготівці ( $G$ ) та густини гранул ( $\gamma_k$ ) за формулою:

$$V_1 = \frac{G}{\gamma_k}. \quad (2.2)$$

Пористість:

$$f = \left(1 - \frac{\gamma_{\Pi}}{\gamma_k}\right) = (1 - \theta), \quad (2.3)$$

де  $\gamma_{\Pi}$  – щільність пористого матеріалу (у нашому випадку насипна щільність гранул);

$\theta$  – відносна щільність.

Пористість може бути параметром для характеристики порошкових тіл, а також для визначення об'єму пор ( $V_2$ ) та об'єму пористого тіла ( $V_{\Pi}$ ). Зазначені величини мають важливе значення при теоретичному аналізі фізичних процесів.

$$V_{\Pi} = V_1 + V_2, \quad (2.4)$$

де  $V_1$  – об'єм частинок порошку в пористому тілі.

Як показують літературні дані [43], при отриманні композитів методом просочення ТТС, розрахунок варто вести з урахуванням заповнення пор на 105 % (рис. 2.2). Отриманні значення наважки наведено в таблиці 2.5.

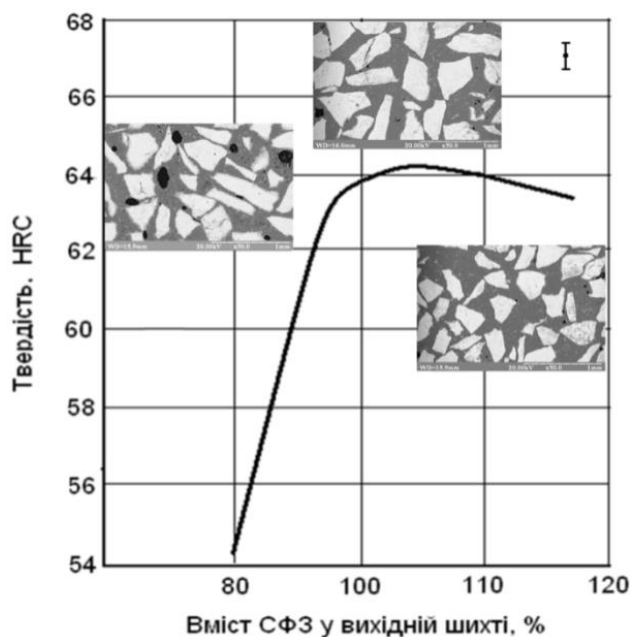


Рисунок 2.2 – Залежність твердості HRC, від вмісту СФЗ у вихідній шихті [67]

Таблиця 2.5 – Наважка вихідних матеріалів

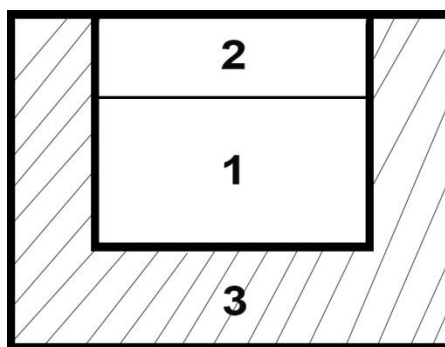
Гранули	Маса гранул, г	Маса СФС, г	Гранули	Маса гранул, г	Маса СФС, г
РЕЛІТ	11	1,886	Карбід ніобію	4	1,424
		2,253			1,851
		2,331			2,046
		2,472			2,156

## 2.2 Отримання композитів

Отримання композиційних матеріалів проводили за наступних умов:

- середовище – повітря;
- температура – 1250 °С;
- час витримки – 5 хв.

Композиційні матеріали отримувались згідно схеми (рис. 2.3). При досягненні температури плавлення самофлюсівний сплав (2), під дією сил Лапласа, починає заповнювати поровий простір, який сформовано вільно засипаними гранулами карбіду (3). Таким чином металева зв'язка, формує міцний хімічний зв'язок між вихідними компонентами, та зв'язує їх між собою.



1 – шар ТТС; 2 – СФС; 3 – сталеві підкладка

Рисунок 2.3 – Схема просочення гранул розплавом СФС

## 2.3 Дослідження мікроструктури композитів

Для встановлення взаємозв'язку між структурним станом матеріалів, та їх кінцевими властивостями використовують засоби металографічного аналізу. Найбільш поширеною методикою підготовки мікрошліфів для аналізу є метод механічного полірування. В основі методу лежить процес пошарового вирівнювання дослідної поверхні, за рахунок обробки абразивами різної зернистості.

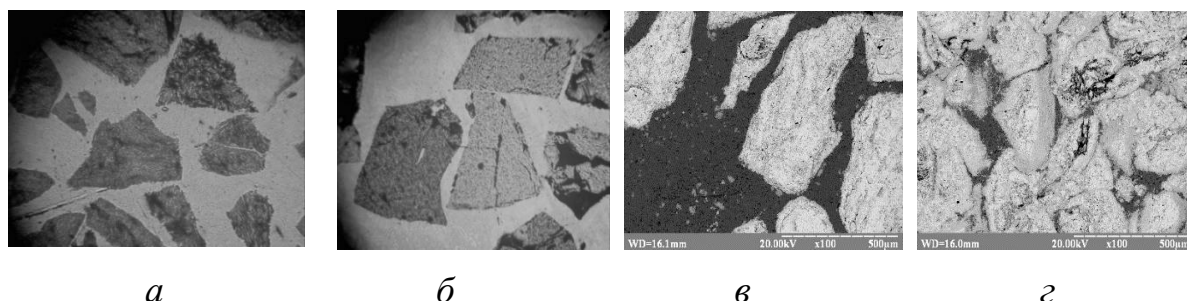
Вибрану частину зразка для дослідження готують наступним чином:

- а) шліфування обраної поверхні, з використанням різнозернистих абразивів;

б) полірування – дана операція має на меті отримання дзеркальної поверхні з мінімальною шорсткістю та без мікродфектів. Полірування проводять на фетрі з використанням водних суспензій коронду, карбокоронуд. Іноді для дуже твердих матеріалів фінальне полірування проводять з використанням алмазних паст. Після полірування зразки промивають, обезжирюють спиртом, та просушують;

в) інколи застосовують травлення, для надання контрасту межі зерен. Реагенти травлення підбирають в залежності від матеріалу. Найбільш поширеним є спосіб хімічного травлення розчинами лугів чи кислот. Після травлення зразки промивають для видалення залишків хімічних реагентів, та продуктів взаємодії, сушать;

Після полірування (травлення) зразки досліджувались за допомогою оптичного мікроскопу «НЕОРНОТ», та растрового мікроскопу РЕМ-106. Електронний мікроскоп додатково обладнано енергодисперсійним аналізатором, що дозволяє проводити дослідження розподілу хімічних елементів. Отриманні мікроструктури зразків наведено на рисунку 2.4.

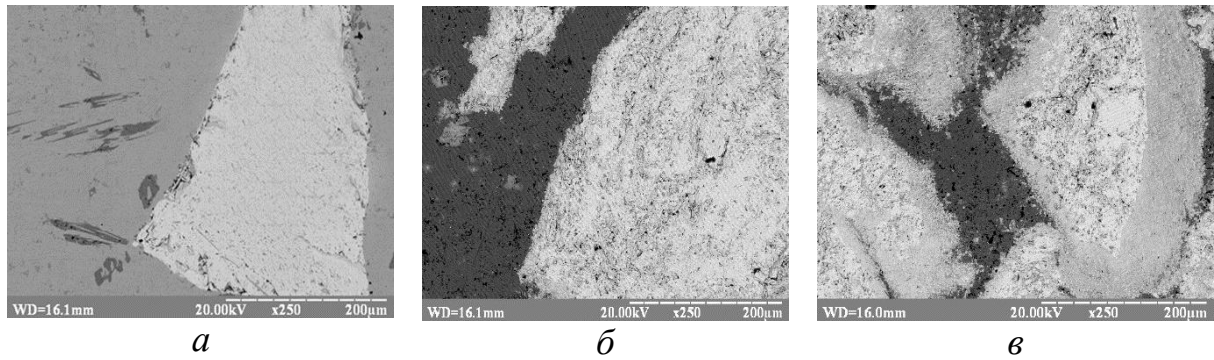


*a* – РЕЛІТ(-063+04); *б* – карбід ніобію(-063+04); *в* – РЕЛІТ (-04+0315);  
*г* – РЕЛІТ (-0315+02)

Рисунок 2.4 – Мікроструктура композиційних покриттів (x100)

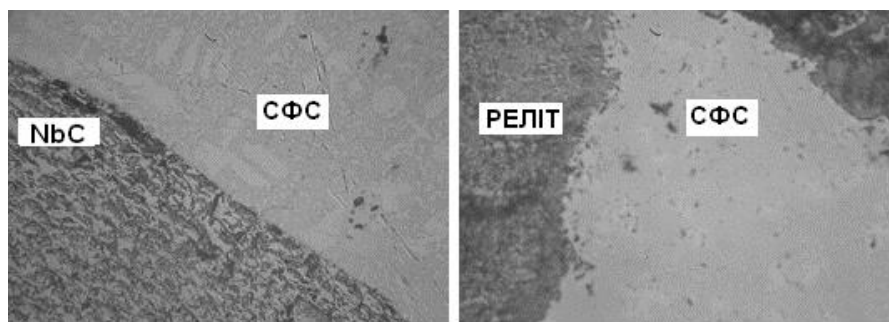
### 2.3.1 Взаємодія між компонентами

При отриманні матеріалів в присутності рідкої фази, як відомо, досить часто має місце певна взаємодія між компонентами. В системі СФС-МеС також присутня взаємодія (рис. 2.5, 2.6).



*a* – карбід ніобію; *б, в* – реліт

Рисунок 2.5 – Взаємодія між компонентами



*a*

*б*

*a* – NbC – СФС; *б* – реліт– СФС

Рисунок 2.6 – Мікроструктура на межі поділу фаз (x400)

Утворюються характерні структури взаємодії тугоплавких зерен із розплавом СФС (рис. 2.6, 2.8).

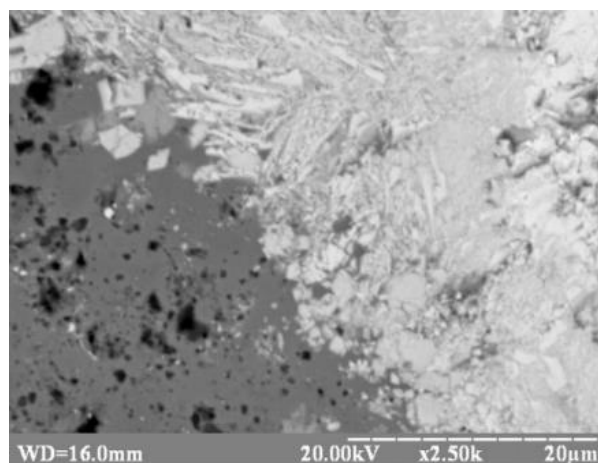
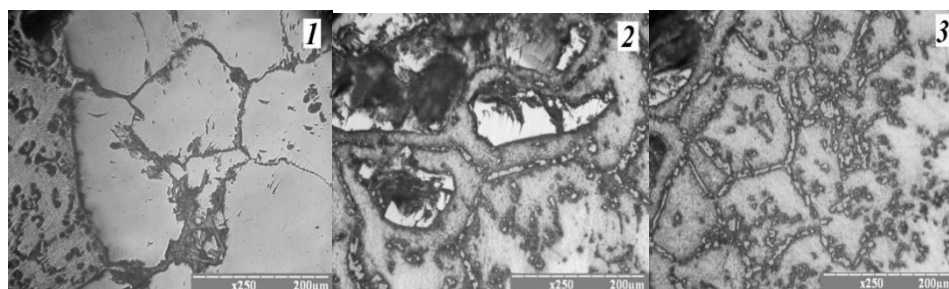


Рисунок 2.7 – Взаємодія в системі СФН–РЕЛІТ





1 – 5; 2 – 15; 3– 45

Рисунок 2.8 – Типові структури зони взаємодії твердих тугоплавких сполук з розплавами нікелю та заліза у залежності від часу взаємодії (хв.) [68]

З метою встановлення припущення про міграцію розплаву СФС в тіло зерна карбідів було проведено EDS аналіз, результати наведені на рисунку 2.9 та в таблиці 2.7.

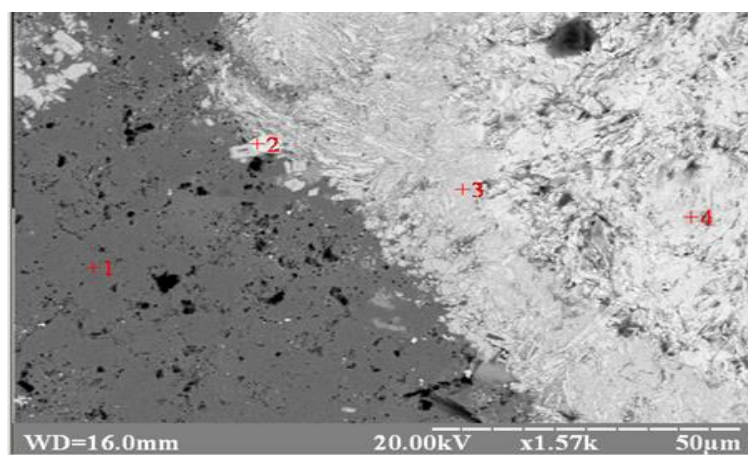


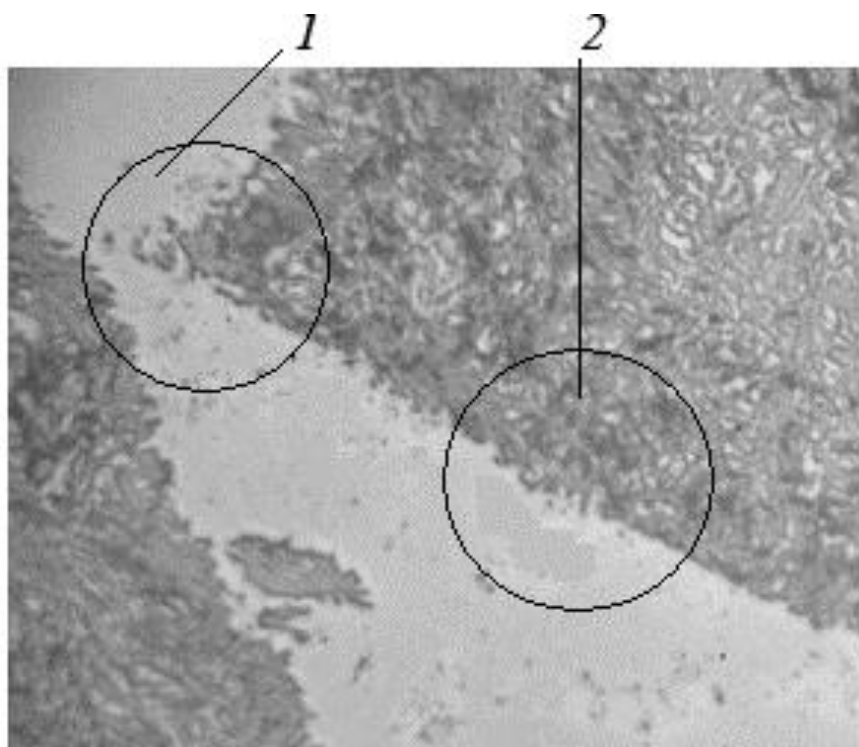
Рисунок 2.9 – EDS аналіз міграції розплаву

Таблиця 2.7 – EDS аналіз міграції розплаву в карбід

Точка	Вміст елементів, %					
	Cr	Fe	Ni	W	Si	Mn
1	1,04	0,32	98,30	-	0,25	0,09
2	1,88	0,23	13,01	84,59	–	0,29
3	2,43	–	5,47	91,8	–	0,3
4	0,16	0,08	0,7	99,71	–	0,06

### 2.3.2 Вплив кривизни поверхні на ступінь розчинення

Аналізуючи отримані структури можна помітити певну закономірність між ступенем розчинення гранул та кривизни поверхні (рис. 2.10). Зі збільшенням кривизни поверхні відбувається більш інтенсивне розчинення гранул карбідів.



1 – розчинення на малих кутах; 2 – розчинення на великих кутах

Рисунок 2.10 – Мікротруктура на межі поділу фаз біля поверхонь карбідів з різною кривизною (x400)

### 2.4 Твердість композитів

В роботі проводилось дослідження твердості композицій за методом Роквелла. В основі методу лежить вдавлювання у поверхню алмазного конусу (шкали А, С, D) рисунок 2.11, або сталевого сферичного наконечника (шкали В, Е, F, G, Н, К) під дією послідовних навантажень попереднього  $P_0$  і основного  $P_1$  і визначенні глибини впровадження наконечника після зняття основного зусилля ( $P_1$ )[71].

Товщина зразка, має бути в 10 разів більша ніж глибина проникнення наконечника після зняття основного зусилля ( $F_1$ ). Шорсткість поверхні  $R_a$  повинна бути не більше 2,5 мкм [72].

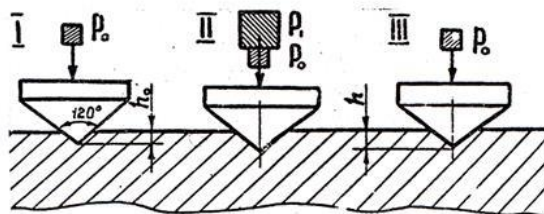
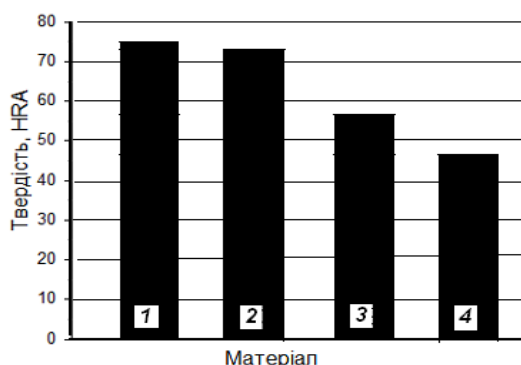


Рисунок 2.11 – Схема проведення вимірювання твердості при застосуванні алмазного конусного наконечника

Отримані значення наведені на рисунку 2.12. Аналіз отриманих результатів показує, що вона змінюється залежно від складу композиції і розміру гранул.



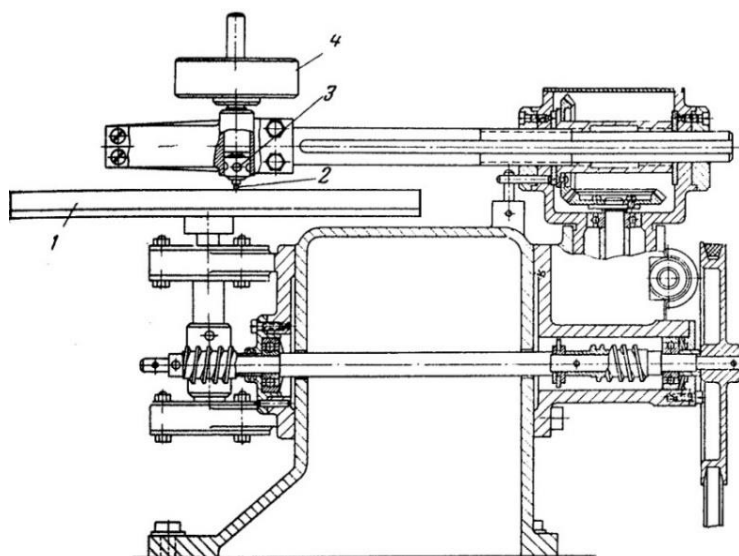
1 – РЕЛІТ (-0315+02); 2 – РЕЛІТ (-04+0315); 3 – РЕЛІТ (-063+04);  
4 – карбід ніобію (-063+04)

Рисунок 2.12 – Твердість композиційних покриттів

## 2.5 Дослідження зносостійкості із закріпленням абразивом

З метою встановлення експлуатаційних характеристик отриманих матеріалів було проведено дослідження зносостійкості в парі із закріпленням абразивом.

Дослідження зносостійкості проводились на установці марки ЗЕ881М виробництва заводу шліфувальних станків «Нерес» (рис. 2.13).



1 – абразивний круг; 2 – досліджуваний зразок; 3 – тримач зразка;  
4 – вантаж

Рисунок 2.13 – Схема установки для випробування матеріалів зношування при терті по закріпленому абразиву

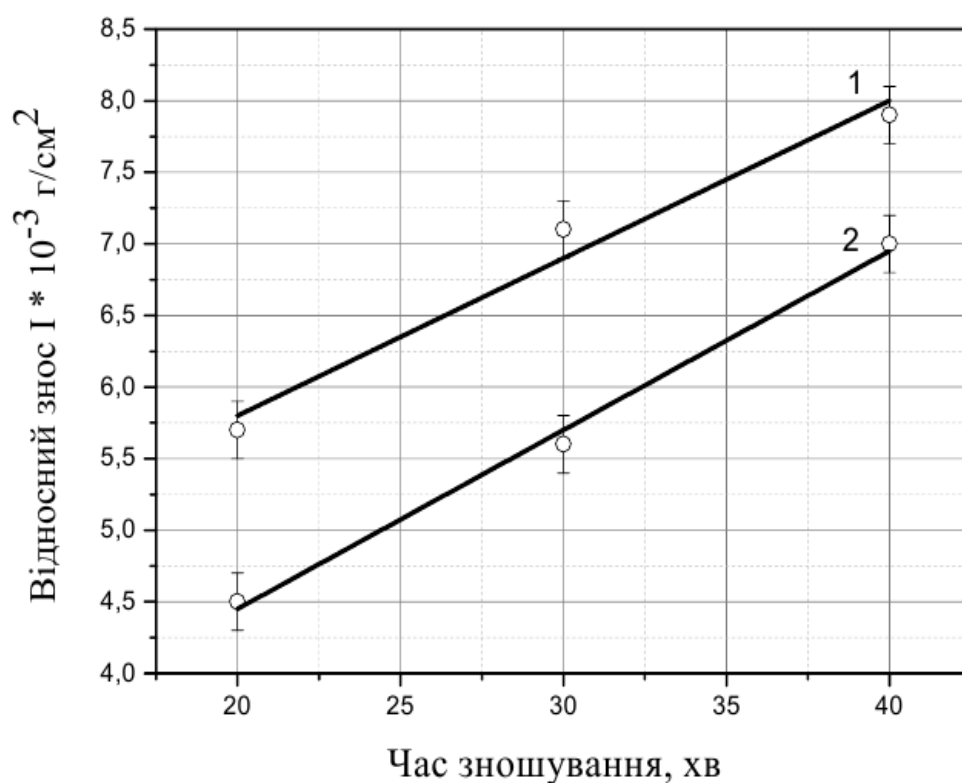
Випробування отриманих композитів, на зносостійкість в парі із закріпленним абразивом проводились за стандартною методикою [73]. Зношування здійснювалось за рахунок обертання абразивного диску із заданими параметрами швидкості обертання, та навантаження на зразок. Перед початком відліку втрати маси, зразки піддаються припрацюванню для отримання якісного контакту між поверхнею зразка та абразиву.

Станок 3E881M, в першу чергу був розроблений для виготовлення шліфів, а не як установка для випробування на зношування. Тримач зразків, яким укомплектований станок не дозволяє проводити дослідження при різному навантаженні, а чітко визначені розміри посадочного місця, суттєво ускладнює роботу зі зразками різних розмірів. Тому було поставлено завдання спроектувати новий вузол тертя, для закріплення та навантаження зразків. Принципову схему конструкції наведено в Додатку А.

Розподільча головка (1) складається з 3-х різьбових отворів, які розташовані під  $120^\circ$  один відносно одного, для фіксації зразків (Додаток Б), а також втулки

(3), яка дублює отвори основної головки, та служить змінною частиною в залежності від розміру вихідного зразка для випробування. Така конструкція дозволяє забезпечити можливість дослідження зразків в досить широкому діапазоні розмірів. Для фіксації у тримачі установки передбачена втулка (2), яка має 2 різьбових отвори М6 для фіксації головки тримача, та штанги навантаження (4). Штанга (4) має виступ у верхній частині, для встановлення навантаження.

В даній роботі для зменшення часу на припрацювання зразків, проводили попередню обробку на плоско-шліфувальному станку. Етап припрацювання здійснювався при навантаженні в 20 кН, протягом 5 хв з частотою обертання круга 100 об/хв. Основне зношування здійснювалось при частоті обертів 200 об/хв та з навантаженням в 40 кН. Після кожного випробування зразки промивались, просушувались та зважувались на аналітичних вагах.



1 – карбід ніобію; 2 – РЕЛІТ

Рисунок 2.14 – Залежність інтенсивності зношування від часу дії абразивного середовища

## 2.6 Зносостійкість композитів СФС–РЕЛІТ різного фракційного складу

З метою встановлення оптимального складу вихідних компонентів було проведено дослідження зносостійкості в парі із закріпленим абразивом для композитів з різним розміром карбідної складової. Випробування проводилось при різному часі та навантаженні на зразок.

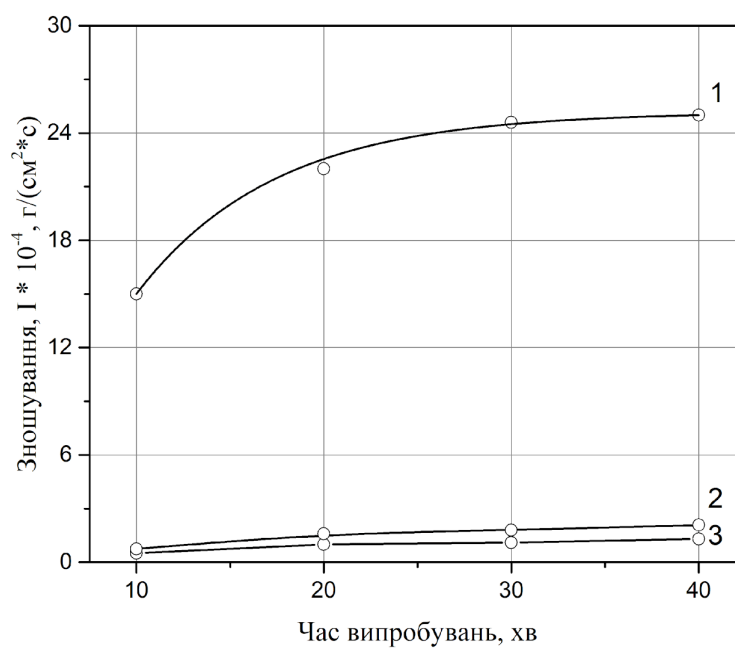
На першому етапі випробування, зразок зафіксовується в тримачі та притирається до вставлення стаціонарного режиму протягом 5 хв. Основне зношування проводилось протягом 10, 20, 30, 40 хв, з частотою обертів абразиву 200 об/хв., та навантаженням в 30 кПа.

Для встановлення впливу навантаження на зносостійкість, дослідні зразки піддавали зношуванню, при однаковому часі (20 хв.), під навантаженням 10, 20, 30, 40 кПа, частота обертів контр тіла 200 об/хв. Після зношування зразки промивались, висушувались та зважувались на аналітичних вагах (табл. 2.8).

Таблиця 2.8 – Проміжні результати втрати маси композитів СФС–РЕЛІТ

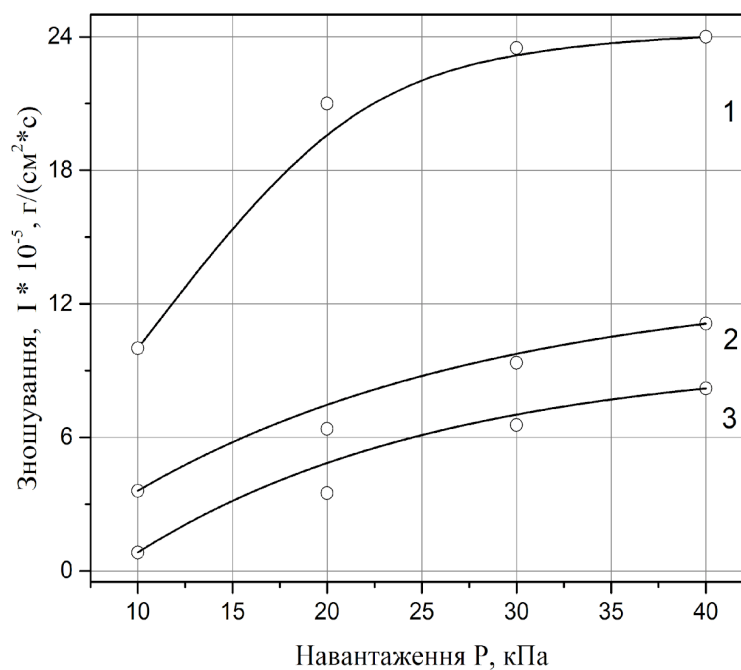
Час зношування, хв	Навантаження, кПа	Втрата маси, г		
		515 мкм	357 мкм	250 мкм
10	30	0,0009	0,0009	0,0155
20		0,0036	0,0039	0,0382
30		0,006	0,0067	0,0941
40		0,0108	0,0100	0,1111
20	10	0,0013	0,0003	0,0026
	20	0,0023	0,001	0,0048
	30	0,0032	0,002	0,0056
	40	0,004	0,0032	0,0061

За отриманими даними побудовано залежності зношування від часу випробування та від навантаження (рис. 2.15 – 2.16).



1 – 250 мкм; 2 – 357 мкм; 3 – 515 мкм

Рисунок 2.15 – Залежність зношування від часу випробування для композитів СФС – РЕЛІТ



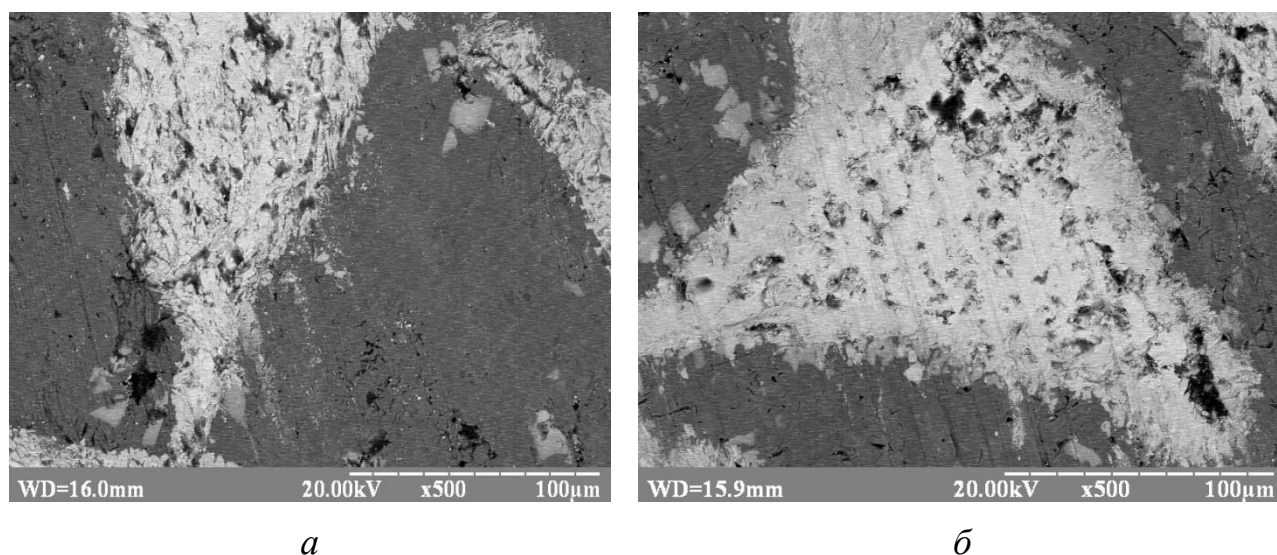
1 – 250 мкм; 2 – 515 мкм; 3 – 357 мкм

Рисунок 2.16 – Залежність зношування від навантаження для композитів СФС – РЕЛІТ



## 2.7 Металографічні дослідження поверхонь тертя

Для встановлення фізико-механічних основ процесів, що лежать в основі процесу зношування композицій СФС–РЕЛІТ було проведено дослідження поверхонь зношування, та визначення розподілу хімічних елементів для характерних ділянок мікроструктури (рис. 2.17, табл. 2.9).



*a*

*б*

а – 415 мкм ; б – 515 мкм

Рисунок 2.17 – Характерні структури зношування композицій СФС–РЕЛІТ

Таблиця 2.9 – Вміст елементів у фазових складових поверхні тертя

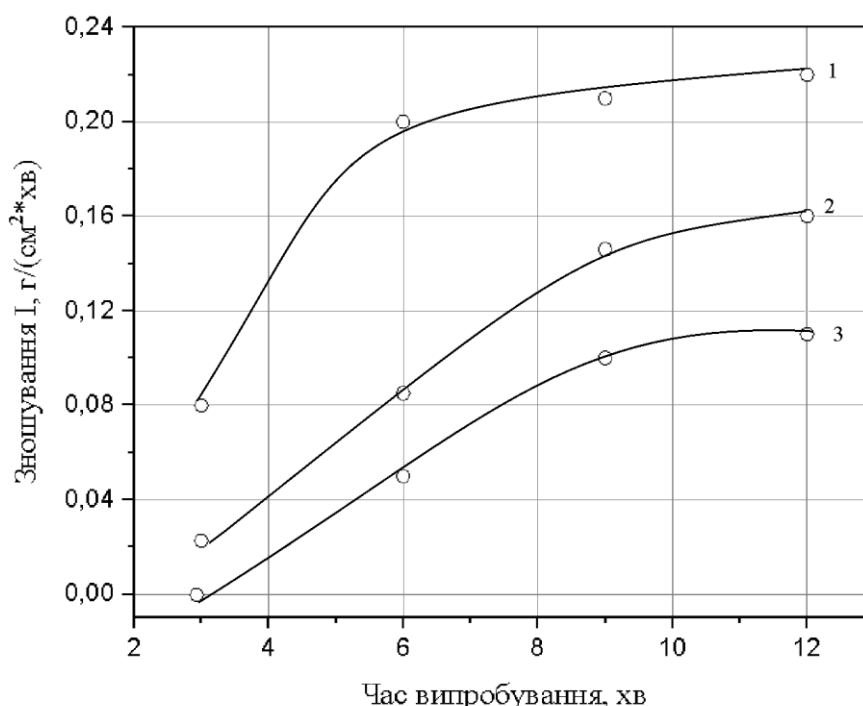
Точка	Вміст, %		
	W	Ni	Cr
1	99,33	7,90	1,77
2	72,66	12,54	14,79
3	91,76	6,58	1,66
4	99,72	0,28	0,00



## 2.8. Газоабразивне зношування

Одним з можливих варіантів застосування досліджуваних композитів, є нанесення покриття на робочу поверхню деталей, які піддають активному зношуванню. В межах даної роботи основну увагу приділено деталям інжекційної техніки, а саме екструдерам, для нанесення флюсу на електроди зварювання. Подача флюсу в таких установках відбувається при досить малих кутах, тому з метою імітації умов роботи екструдера було проведено випробування на газоабразивне зношування при найменш допустимому куті атаки в  $30^\circ$ .

Дослідження проводились для композитів з різним середнім розміром гранул РЕЛІТу. В якості абразиву використовувався діоксид кремнію середнім розміром 400 мкм, кут атаки струменю –  $30^\circ$ , відстань від сопла до поверхні зразка 30 см, тиск газу 6 атм. Отримані результати наведено на рисунку 2.18.

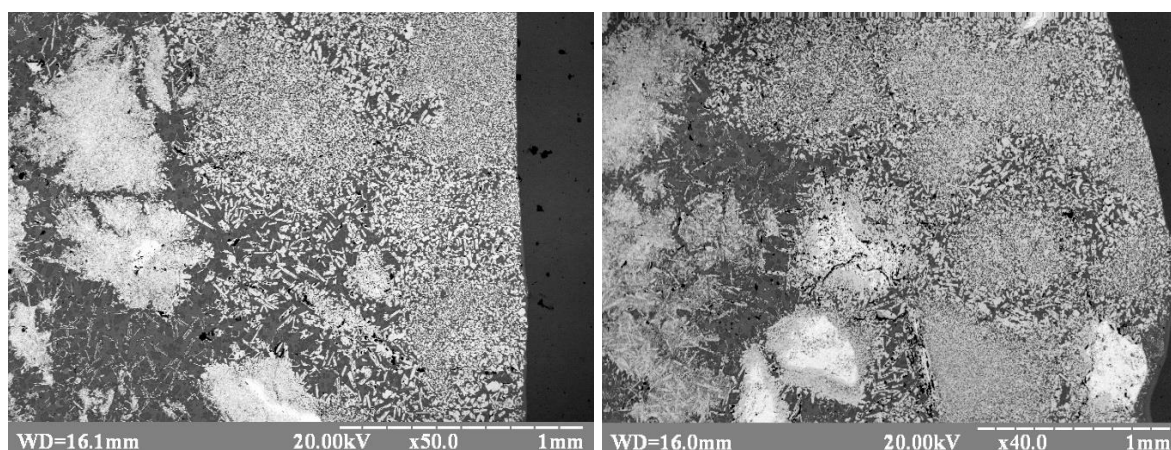
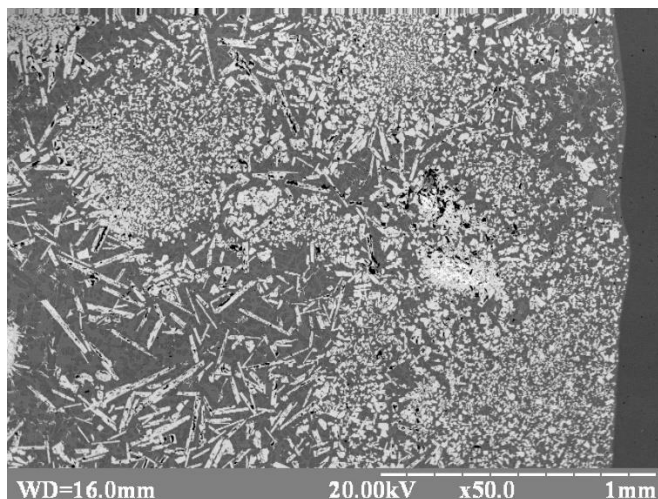


1 – 515 мкм; 2 – 357 мкм; 3 – 250 мкм.

Рисунок 2.18 – Залежність величини зношування від часу випробування в умовах газоабразивної обробки для композицій СФС–РЕЛІТ

## 2.9 Дослідження кінетики розчинення гранул РЕЛІТУ

З метою дослідження впливу умов отримання на структуру композиційних матеріалів на основі СФС–РЕЛІТ, було проведено отримання КМ, з середнім розміром гранул РЕЛІТу 250 мкм, за температури 1250 °С та витримки в 15, 25, 35 хв. Мікроструктура отриманих матеріалів наведена на рисунку 2.19.

*a**б**в*

а – 15 хв; б – 25 хв; в – 35 хв.

Рисунок 2.19 – Мікроструктура композиції СФС–Реліт при різному часі витримки

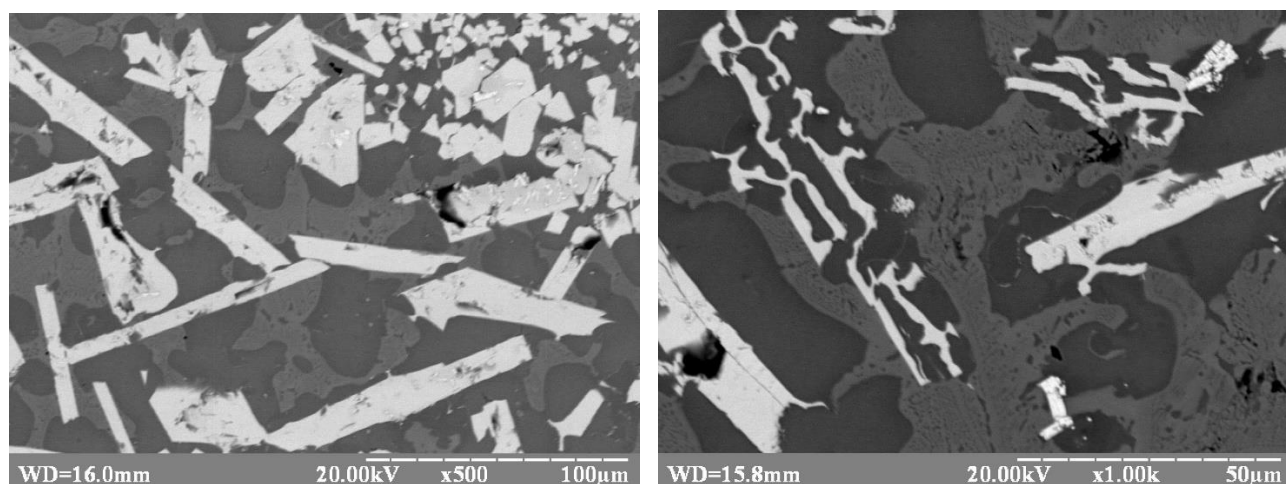
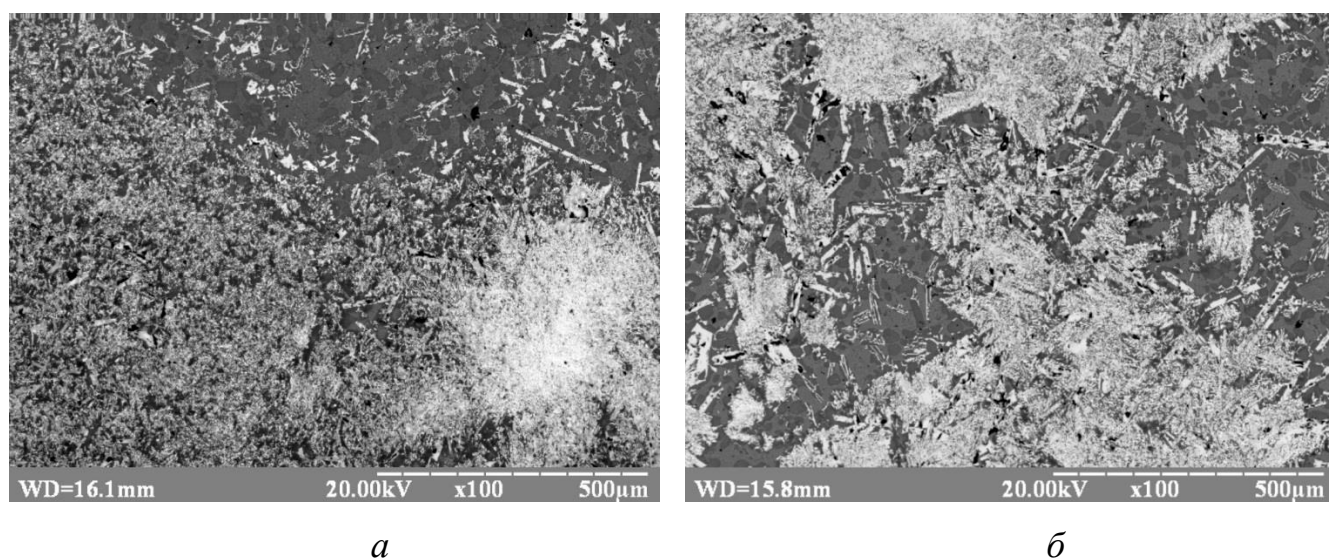


Рисунок 2.20 – Характерна мікроструктура композиції СФС-РЕЛІТ,  
час витримки 25 хв



*а* – 15 хв; *б* – 25 хв

Рисунок 2.21 – Ефект розчинення гранул РЕЛІТу

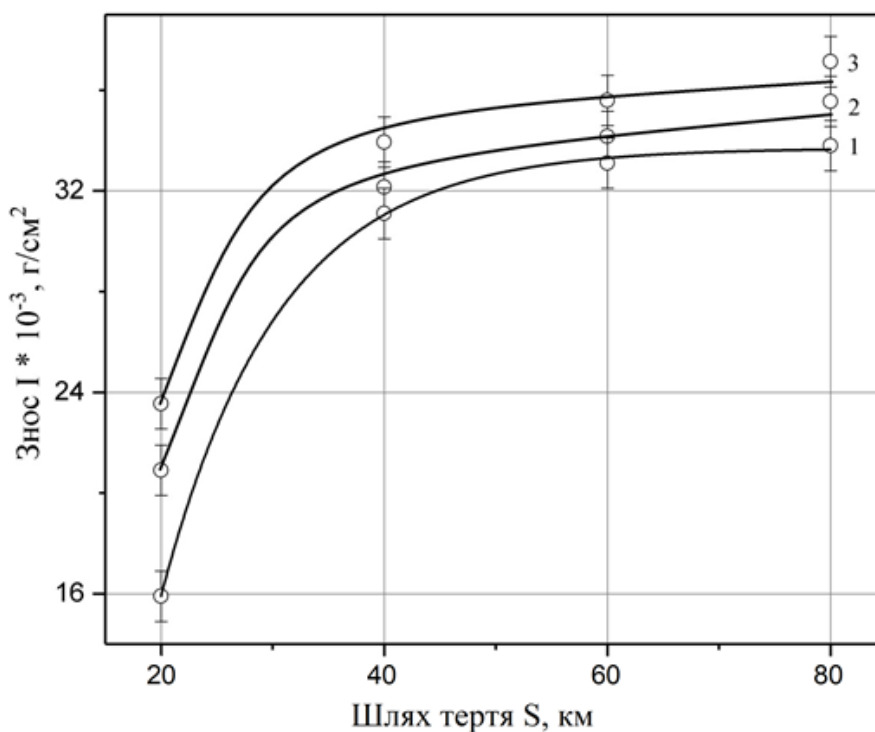
Аналіз мікроструктур показує, що збільшення часу витримки активує процеси розчинення та перекристалізації гранул карбіду вольфраму через рідку фазу. Можна побачити, що на периферії зразків (рис. 2.19) утворюється зона дрібнодисперсних включень карбідів. Внаслідок перекристалізації можна припустити, що йде мова про утворення сполук типу  $Fe_xW_yC$ . Натомість можна чітко побачити

як внаслідок взаємодії гранул карбіду, відбувається їх диспергування з утворенням, зон дрібнодисперсних включень в околі основного зерна (рис. 2.21).

## 2.10 Вплив часу термообробки на зносостійкість

З метою встановлення методу отримання композитів на їх експлуатаційні властивості було проведено дослідження зносостійкості в парі із закріпленим абразивом. Випробуванню піддавались зразки отримані при різному часі витримки в печі. Дана маніпуляція дозволяє дослідити вплив технології отримання на кінцеві експлуатаційні властивості, в тому числі і зносостійкості.

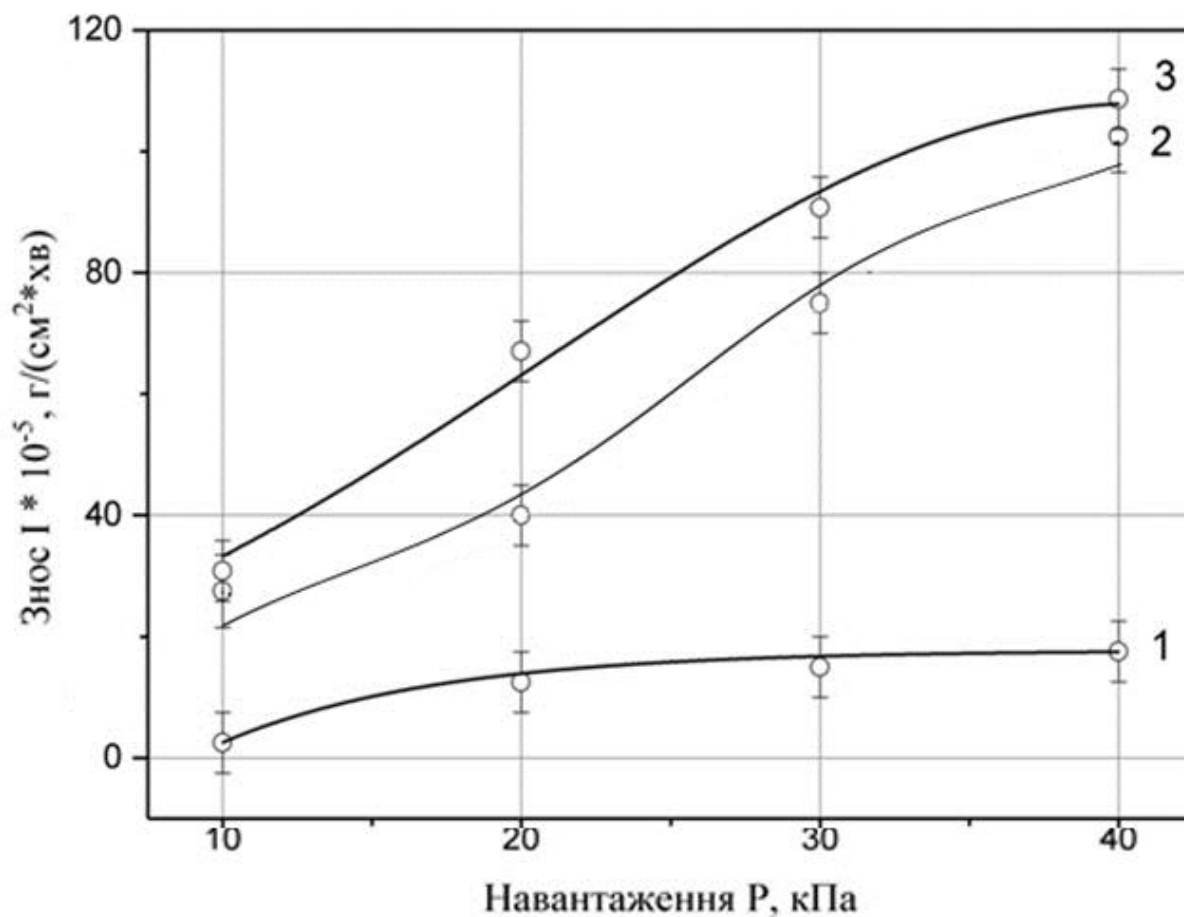
Зношування проводилось за методикою, яка описана раніше, зразки припрацьовувались, зважувались та піддавались зношуванню за стаціонарних умов. Знос проводився за швидкості обертання абразиву – 800 м/с, та навантаженні в 20 кПа, час обробки – 1, 2, 3, 4 хв (рис. 2.22).



1 – 30 хв, 2 – 25 хв, 3 – 15 хв

Рисунок 2.22 – Залежність величини зношування від шляху тертя, для композицій СФС-РЕЛІТ отриманих при різному часі витримки

З метою встановлення впливу навантаження на зносостійкість, проведено випробування на зношування, за різних навантажень при часі зношування 2 хв, та швидкості обертів 800 м/с (рис. 2.23).



*1 – 30 хв, 2 – 25 хв, 3 – 15 хв*

Рисунок 2.23 – Залежність величини зношування від навантаження на зразок, для композицій СФС-РЕЛІТ отриманих при різному часі витримки і

### 3 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані результати, можна пояснити наступним чином.

**Властивості гранул та наважка вихідних компонентів.** Отримані гранули з литих тугоплавких сполук, мають характерну осколчасту форму, що цілком притаманне для матеріалів, з високим ступенем крихкості. Гранули з литого карбіду вольфраму, мають витягнуту форму, в напрямку одної з кристалографічних осей. Такий вид руйнування цілком, узгоджується, з атомно-кристалічною будовою литого карбіду вольфраму. Під час плавлення, та подальшої кристалізації, в структурі матеріалу, можна чітко відрізнити 2 фаз, вищого карбіду вольфраму  $WC$ , та субкарбіду  $W_2C$ . В свою чергу такий тип кристалізації повністю узгоджується з діаграмами фазових рівноваг. Вищий карбід вольфраму має гексагональну кристалічну ґратку, що і призводить до витягування матеріалу в напрямку осі  $c$ .

Як показують результати раніше проведених досліджень [43]–[44] процесів взаємодії самофлюсівного сплаву з карбідами перехідних металів, відносна кількість рідкої фази, при розрахунку на 100% заповнення порожнин не є цілком достатньою. Внаслідок процесів інтрузії розплаву в пористу матрицю, відбувається контактна взаємодія між розплавом та вільно засипаними гранулами, під тиском рідкої фази частинки переміщуються одна відносно одної, що викликає збільшення відстані між ними. Як результат об'єм порового простору динамічно змінюється, в бік збільшення, що призводить до необхідності збільшувати кількість рідкої фази.

Аналізуючи отримані результати авторів [43], можна побачити, що існує певна кореляційна залежність, між величиною твердості та кількістю рідкої фази (рис. 2.2). Крива має виражений максимум твердості, який можна досягнути при відносній кількості СФС близько 105 % [43]–[44].

**Отримання композитів.** Для отримання композитів з високою щільністю було запропоновано технологію інфільтрації розплаву в пористу матрицю. За таких умов очевидно, що зменшення середнього розміру гранул, ускладнюватиме процеси інтрузії розплаву в пористе середовище. Внаслідок зменшення розміру

частинок, відбудуватиметься одночасне зменшення розміру пор, що відкладає відбиток на величину рушійних сил інтрузійних процесів – сил Лапласа. З іншого боку, збільшення дисперсності порошкових тіл, сприяє збільшенню поверхневої енергії, та реакційної здатності. Такі частинки значно швидше окиснюються, наявність оксидного шару, буде змінювати рівновагу в системі, тим самим збільшуючи кут змочування між розплавом СФС та частинкою карбіду. В таких умовах отримати 100 % щільність композитів не можливо. Отримати щільні вироби, можна при попередньому перемішуванні СФС з гранулами ТТС.

Підводячи підсумок, можна стверджувати, що для отримання щільних композитів в системі СФС–ТТС, для гранул з малим розміром гранул ( $> 250$  мкм) потрібно додатково перемішувати вихідні компоненти, у випадку ж гранул  $< 250$  мкм інфільтрацію можливо проводити за класичною технологією просочування зверху.

**Дослідження мікроструктури композитів.** Проведені мікроструктурні дослідження показують, що отримані композиційні матеріали мають гетерофазну структуру (рис. 3.1).

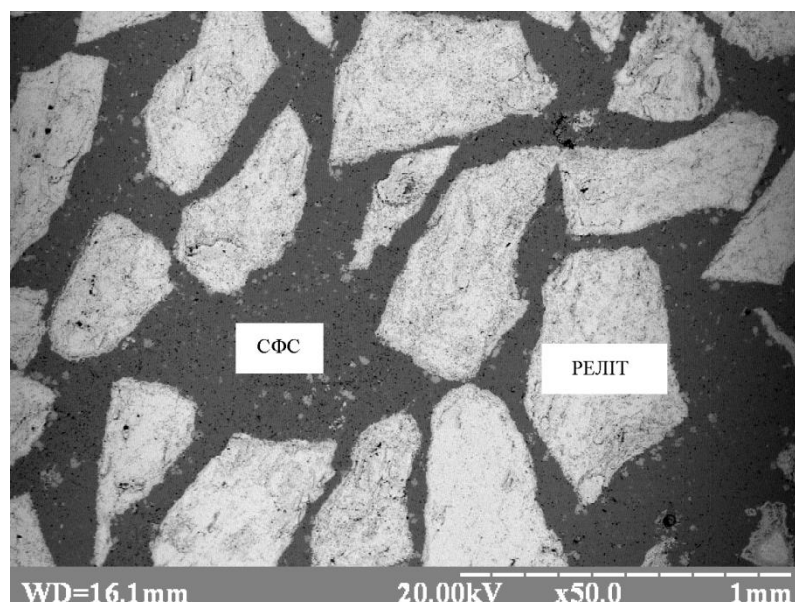


Рисунок 3.1 – Характерна мікроструктура композитів СФС-РЕЛІТ

Як видно з рисунку 3.1 композит складається з крупних зерен світлої фази (РЕЛІТ) та темної матричної (СФС). Матеріал має 100 % щільність та якісний контакт між складовими композиціями.

Отримані результати, узгоджуються з раніше проведеними дослідженнями поверхневої взаємодії СФС з литими карбідами. Чітко підтверджуються дані про повне змочування рідкою фазою (СФС) досліджуваних ТТС, що є визначальним фактором при отриманні композиційних матеріалів методом інфільтрації розплавів.

Більш ґрунтовні дослідження мікроструктури, показують, що матриця із самофлюсівного сплаву не є однорідною. При великих збільшеннях можна побачити, включення різного розміру та морфології. Така структурна особливість характерна для самофлюсівних сплавів. Використовуючи СФС на основі нікелю, варто очікувати в структурі утворення боридів нікеля та хрому, та інших більш складних не бінарних сполук. Це припущення чітко узгоджується з вже відомими роботами, по отриманню композитів та покриттів на основі СФС. Автори роботи [74] проводили дослідження формування структури покриттів NiCrSiBC, отриманні результати рентгено-структурного аналізу в повній мірі ілюструють наведені вище твердження.

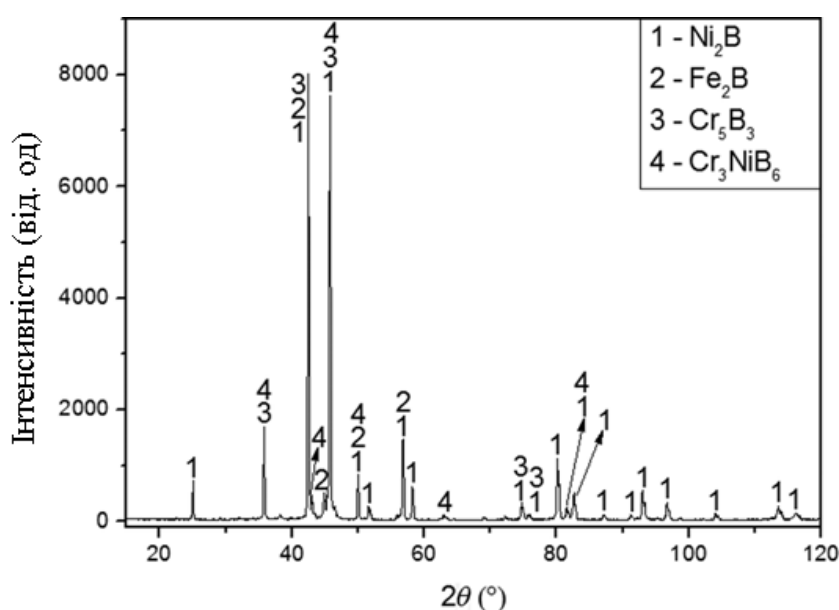


Рисунок 3.2 – Дифрактограма покриття NiCrSiBC [74]



З погляду експлуатаційних властивостей додаткові дисперсні включення, які розподілені по матриці, будуть збільшувати загальний комплекс властивостей.

**Взаємодія між компонентами.** Оперуючи отриманими даними мікроструктурних досліджень (рис. 2.5, 2.6), можна стверджувати, що в системі СФС–ТТС присутня певна розчинність компонентів. Такі дані цілком узгоджуються, із результатами досліджень, контактних явищ на поверхні розділу розплав металів–ТТС.

Згідно механізму встановленого в цих роботах розчинення карбідів супроводжується міграцією рідкої фази, по межах зерен та субзерен. Відповідно проникання рідини викликає дію ефекту Ребіндера. Від основного тіла зерна, відокремнюються більш дрібні частинки, які з часом перекристалізуються через розплав (рис. 2.7, 2.8).

Ефекти міграції та проникнення рідкої фази в об'єм зерна підтверджують дані енерго-дисперсійного аналізу. А саме, концентрація концентрація Ni (табл. 2.7) зростає від точки 1 до 4 (рис. 2.9).

З термодинамічної точки зору рушійною силою вказаних процесів є зменшення поверхневої енергії при утворенні нових поверхонь поділу [44]. Повертаючись до нашої системи СФС – MeC, повинна виконуватись умова:

$$\sigma_{MeC-SFC} < \sigma_{MeC-MeC},$$

де  $\sigma_{MeC-SFC}$  – поверхнева енергія на межі поділу розплав СФС – карбід;

$\sigma_{MeC-MeC}$  – поверхнева енергія на межі поділу карбід – карбід.

За результатами роботи [70] та даними енергетичних складових (табл. 3.1), при інших рівних умовах, величина поверхневої енергії і як наслідок ступінь розчинення буде в значній мірі залежати від положення, карбідоутворюючого металу в періодичній таблиці Д. М. Менделєєва.

Таблиця 3.1 – Поверхнева і міжфазова енергія в системах карбід металу – кобальт [70]

Система	Поверхнева енергія карбїду, $\sigma_{т.г.}$ , Дж/м <sup>2</sup>	Енергія поверхні подїлу кобальт–карбїд, $\sigma_{т.р.}$ , Дж/м <sup>2</sup>	Енергія на межї зерен карбїду, $\sigma_{т.г.}$ , Дж/м <sup>2</sup>
TiC – Co	2,215±0,200	0,505±0,200	0,885±0,300
TaC – Co	2,400±0,200	0,550±0,200	0,960±0,300
WC – Co	2,475±0,200	0,575±0,200	0,990±0,300

За величиною поверхневих та міжфазних енергій (табл. 3.1) імовірність просочування рідкої фази між зернами / субзернами карбїдів знижується при переході від карбїдоутворюючого елемента VIa до IVa підгрупи періодичної таблиці.

Використовуючи дані роботи [69] та апроксимуючи ключові положення та висновки авторів, можна припустити, що така ж періодичність властивостей буде притаманна і для нашої системи СФС – MeC. Для порівняння з РЕЛІТом в роботі було отримано КМ на основі карбїду ніобію. Якщо порівнювати ці дві системи, то ступінь розчинення карбїдної складової, буде вищим в системі СФС-РЕЛІТ.

Отримані у роботі дані цілком узгоджуються із даними авторів [70], щодо ступеня розчинності карбїдів, які використовуються в твердосплавному виробництві, у розплавах заліза, кобальту та нікелю. Зрозуміло, що самофлюсівний сплав є більш складною системою, з великою кількістю дифузійних потоків, які діють одночасно, проте в першому наближенні ми можемо порівнювати, дані для чистого нікелю, з СФС на основі нікелю.

В основі процесу дифузії лежать направлений потік атомів. Для системи СФС–MeC можна вести мову про декілька сценаріїв.

а) виходячи з правила Юм-Розері, якщо різниця розмір атомів, не перевищує 15 % то можуть утворюватись тверді розчини заміщення. В такому випадку, атоми карбїдоутворюючого металу будуть заміщувати атоми в розплавї;

б) в свою чергу, атоми вуглецю, які мають не великий радіус та питому вагу, з найбільшою імовірністю, будуть утворювати тверді розчини проникнення. Атоми вуглецю будуть розміщуватись у октаедричних та тетраедричних порожнинах.

Величина розчинності це комплексна функція, яка залежить в першу чергу від кристалографічної будови вихідних компонентів та відносної кількості атомів заміщення та проникнення.

Найвищі значення розчинності (табл. 3.2) має карбід вольфраму, що власне кажучи і дозволяє використовувати його, як основну сировину для виготовлення твердих сплавів.

Таблиця 3.2 – Розчинність (%) деяких карбідів і їх твердих розчинів в металах групи заліза в твердому (1250 °С) та рідкому (1400 °С) стані [53]

Метал	Температура, °С	WC	TiC-WC 1:1	TiC	NbC	TaC	Mo <sub>2</sub> C	Ti <sub>0.5</sub> N <sub>0.5</sub>
Fe	1250	7,0	0,5	0,5	1,0	0,5	5,0	-
Co	1250	22,0	2,0	1,0	5,0	3,0	13,0	-
Ni	1250	12,0	5,0	5,0	3,0	5,0	8,0	5,0
Co	1400	39,0	–	10,0	8,5	6,3	39,0	-
Ni	1400	27,0	-	11,0	7,0	6,3	36,0	-

Іншим підходом, щодо пояснення природи розчинності в системі СФС–MeC можуть бути структурні особливості литих карбідів. Карбід вольфраму, як вже було зазначено раніше, в литому стані, має двофазну структуру. Тобто рідка фаза має додатковий напрямок поширення, адже з енергетичної точки зору, проникнення по межі розділу двох карбідів більш вигідно, ніж міграція розплаву через тіло зерна чи по субзернам.

**Вплив кривизни поверхні на ступінь розчинення.** Вплив кривизни поверхні на розчинення, якісно дозволяє оцінити рівняння Кельвіна-Томсона. За яким

зменшення радіусу кривизни поверхні, активує процеси розчинення частинок карбідів.

$$C = \frac{2\sigma}{r} \cdot \frac{V_0}{kT} \cdot C_0,$$

де  $C$  – розчинність твердого тіла з випуклої поверхні;

$\sigma$  – поверхневий натяг;

$r$  – радіус кривизни поверхні розділу фаз;

$R$  – універсальна газова стала;

$V_0$  – молярний об'єм твердого тіла;

$k$  – стала Больцмана;

$T$  – температура, К;

$C_0$  – розчинність плоских поверхонь.

Отримані результати цілком узгоджуються з існуючими уявленнями про вплив кривизни поверхні на розчинення твердої фази в рідкій.

**Твердість композитів.** Дослідження твердості показують, що вона, при інших рівних умовах, залежить від розміру вихідних гранул карбідів. Найвищі значення твердості мають композити з середнім розміром гранул 257 мкм (рис. 2.12, 1). Як можна побачити зберігається чітка тенденція, зниження твердості, зі збільшенням розміру гранул. Це можна пояснити тим, що збільшення розміру гранул, збільшує відносний об'єм пор, та кількість пластичної фази.

Високі значення твердості композицій СФС–РЕЛІТ, обумовлені природним поєднанням високих значень твердості та мікропластичності даної сполуки, модуля пружності (735 ГПа) та мікротвердості (15-20 ГПа). Двофазна мікроструктура литого карбіду вольфраму робить його практично композитом.

**Зносостійкість в парі із закріпленням абразивом.** Дослідження зносостійкості, композитів СФС–МеС при різному часі випробування, показують лінійне збільшення втрати маси (рис. 2.14). В порівнянні з системою СФС–NbС, компози-

ти за участю гранул РЕЛІТу, мають значно меншу інтенсивність зношування. Комплекс фізико-механічних властивостей дозволяє отримувати високі значення зносостійкості в композитах за участі литого карбиду вольфраму. Гіпотеза про те, що карбід ніобію може конкурувати, з карбідом вольфраму в композиціях за участі самофлюсівного сплаву не підтвердилась.

**Зносостійкість композитів СФС–РЕЛІТ різного фракційного складу.** Зношування композиційних матеріалів в парі із закріпленим абразивом, показує, що при інших рівних умовах, характер зношування є функцією від середнього розміру карбідної складової (рис. 2.15). Проводячи дослідження при різному часі тертя - зношування, має досить не закономірний характер зміни. Для композицій із середнім розміром гранул 250 мкм, збільшення часу призводить до активації процесів зношування. Хоча інтенсивність з часом знижується, до встановлення певного стаціонарного стану (рис. 2.15, 1). В свою чергу, збільшення розміру гранул до 357 мкм та 515 мкм під час зношування до 20 хв сприяє зниженню величини втрат маси. Подальші випробування показують, що з часом, зношування корелюється в межах одного значення, що дозволяє судити, про стаціонарність тертя (рис. 2.15, 2,3).

Виходячи з фізичних процесів, що лежать в основі процесу, таку закономірність можна пояснити наступним чином. З рисунку 2.17 та таблиці 2.9 внаслідок зношування, відбувається зношування матеріалу за рахунок крихкого руйнування карбідних включень, по міжфазній границі розділу. Продукти руйнування, за рахунок інерційних сил будуть видалятися із контактної поверхні, але частина продуктів руйнування будуть впроваджуватись у пластичну матрицю самофлюсівного сплаву, тим самим додатково армуючи її. Це припущення підтверджується даними енергодисперсійного аналізу, що показує підвищений вміст вольфраму у фазі, яка розташовується в матриці (табл. 2.9, точка 1).

З іншого боку, внаслідок зношування відбувається й активне стирання матричної фази. Продукти руйнування матричної фази, за рахунок підвищеної пластичності, проникають в тріщини та мікропори гранул РЕЛІТу, та заліковують їх (табл. 2.9, точка 2,3), тим самим підвищуючи зносостійкість матеріалу. В

цих включеннях за рахунок зондових досліджень було знайдено, на фоні великої кількості вольфараму, додаткові елементи, які є складовими самофлюсівного сплаву, що підтверджує гіпотезу, щодо проникнення пластичної складової в дефектне зерно карбіду. Два взаємних процеси, які відбуваються в процесі зношування, дозволяють стабілізувати режим зношування матеріалу, в наслідок чого інтенсивність зношування буде мати майже постійне значення.

Якже було зазначено, більшу швидкість зношування, мають гранули з малим розміром, що може бути обумовлено, більшою питомою поверхнею грану. За рахунок крихкого руйнування, в основному на межі поділу зерен, буде відбуватись більш інтенсивне руйнування карбідних включень. Проте варто очікувати, також стабілізації швидкості зношування з часом.

Дослідження впливу навантаження, на зносостійкість, показують, досить не характерну поведінку зношування, в залежності від розміру гранул РЕЛІТу (рис. 2.16), максимум властивостей вдається отримати за розміру гранул в 357 мкм. Таку залежність можна пояснити виходячи з того, що при інших рівних умовах, величина зношування, буде визначатись розподілом напружень, на структурних складових, які виникають під дією зовнішнього тиску. Зменшення розміру карбідних включень, призводить до зменшення площі поперечного перерізу контакту тертя, в такому випадку зношування буде відбуватись більш рівномірно по поверхні матеріалу. Але, як було зазначено вище, при зменшенні розмірів гранул РЕЛІТу знижується кількість армуючих включень в матриці самофлюсу, що буде призводити до зниження зносостійкості.

При дії навантаження, як наслідок, відбуваються два паралельних процеси, з одного боку рівномірність розподілу напружень, а з іншого боку крихке руйнування гранул карбіду. Конкуренція між цими процесами обумовлює те, що при використанні гранул розміром 515 мкм, відбувається превалююча дія першого механізму, з локальним перевищенням межі міцності, а при використанні гранул розміром 250 мкм, відбувається переважна дія механізму крихкого руйнування, та видалення продуктів із зони тертя. Золотим перетином властивостей, в даному аспекті можна вважати використання гранул розміром 357 мкм, що теоретично до-

зволя отримати достатню кількість продуктів руйнування, які будуть зміцнювати матрицю, та рівномірний розподіл напружень по об'єму структурних складових.

**Газообразивне зношування.** Дослідження зносостійкості при куті атаки в  $30^\circ$ , показують, що зі збільшенням розміру гранул, зносостійкість в значній мірі знижується (рис. 2.18). Цю закономірність можна пояснити виходячи з наступного, оскільки с основи процесу зношування на малих кутах, лежить механізм різання матеріалу, основний вклад у втрату маси, а відповідно і знос буде вносити пластична матриця. Як зазначалось раніше, збільшення розміру гранул, призводить до збільшення відносної кількості пластичної складової.

**Дослідження кінетики розчинення гранул РЕЛІТУ.** Як можна побачити, збільшення часу витримки інтенсифікує процеси розчинення гранул в матриці СФС, відбувається диспергування та перекристалізація РЕЛІТУ з утворенням нових структур. Аналізуючи структуру, варто виділити характерні структурні елементи (рис. 2.20).

В структурі матеріалу, чітко помітні зерна світлої фази, що найбільш імовірно є карбідом вольфраму. В свою чергу таких зерен можна зустріти 2 види: витягнутих по одній з осей та неправильної форми.

Витягнута форма кристалів характерна для сполук нищої сингонії, в нашому випадку найбільш імовірним це може бути нищий карбід вольфраму, який перекристалізовується через рідку фазу. Натомість дрібні зерна неправильної форми, скоріш за все дрібні частинки РЕЛІТУ, які відкололись від основного остову зерна. На фоні зазначених ефектів відбувається також ріст більш складних сполук, які мають колоніальну евтектичну структуру.

Говорячи, про розчинення гранул можна чітко прослідкувати механізм, який лежить в основі процесу. Процес розчинення карбідів в розплавах металів починається з міграції розплавів по їх межах зерен та субзерен з відокремленням їх від основного масиву та подальшою перекристалізацією через розплав (рис. 2.21). Міграцію карбідів і проникнення розплаву в об'єм зерен.

**Зносостійкість СФС-РЕЛІТ за різного часу витримки.** Як показують результати досліджень зносостійкості зразків, отриманих при різному часі витримки, в загальному випадку, підвищення часу витримки призводить до, збільшення зносостійкості. На нашу думку такий ефект досягається за рахунок, досить суттєвих структурних змін у матеріалі, утворення так званого композиту з нерівномірним розподілом карбідної складової. Крупні карбідні зерна, за рахунок витримки починають розчинатись, навколо основного остову зерна утворюється своєрідне поле з дуже дрібних включень карбідів, та складних не бінарних сполук. Оскільки розмір цих карбідів на рівні 1 мкм та нижче, відбувається значне дисперсне зміцнення матриці композиту.

В умовах зношування, як добре відомо, перехід від стаціонарного зношування, до умов критичного руйнування в першу чергу обумовлено, накопиченням дислокацій, які активують поверхню. Така активація стимулює процеси адгезію та когезію на межі контртіло – композит. Однак, як відомо з класичної теорії дислокацій, та інтерпретація законів Орована та Ансела-Ланела наявність додаткових дисперсних включень буде протидіяти руху дислокацій та їх накопиченню. Як наслідок, величина зношування зі збільшенням кількості таких включень буде знижуватись.



## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності [76]. Вона включає в себе цілий спектр організаційних та технічних заходів направлених на уникнення травматизму та захворювання робітників на виробництві, створення оптимальних умов праці, проведення інженерно-конструкторських робіт, щодо зниження дії небезпечних факторів виробничого середовища (шум, випромінювання вібрація тощо).

В основі роботи лежить дослідження процесу формування структури та властивостей зносостійких композиційних матеріалів на основі карбіду вольфраму та самофлюсівного сплаву, отриманих шляхом високотемпературного просочення пористого каркасу (карбіду) розплавом самофлюсу.

Метою даного розділу є аналіз небезпечних та шкідливих факторів, які виникають у процесі отримання композиційних матеріалів на основі карбіду вольфраму з використанням у якості зв'язки самофлюсівний сплав на основі нікелю.

Завданням розділу є розробка засобів та заходів для створення здорових і безпечних умов праці та усунення можливої надзвичайної ситуації.

### **4.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ)**

Аналізуючи технологічні операції, які лежать в основі проведення дослідження можна виділити велику кількість небезпек, які можуть виникнути під час роботи (табл. 4.1). Можна виокремити наступні ключові операції технологічного процесу:

- засипка порошків;
- просочування;
- шліфування.

Таблиця 4.1 – Можливі загрози при проведенні отримання композитів

Технологічний процес	Джерело загрози	Сутність небезпеки
Засипка порошків	Дрібнодисперсні порошки	<ul style="list-style-type: none"> <li>– утворення та поширення дрібнодисперсного пилу в робочому середовищі;</li> <li>– алергенна дія частинок порошків на слизову оболонку людини та шкіру;</li> </ul>
Просочування	Високотемпературна піч	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ураження електричним струмом;</li> <li>– опіки;</li> <li>– тепловий удар;</li> <li>– пожежа;</li> </ul>
Шліфування	Шліфувально-абразивний станок	<ul style="list-style-type: none"> <li>– травмування м'яких тканин тіла;</li> <li>– ураження слизової оболонки продуктами стирання;</li> <li>– ураження електричним струмом.</li> </ul>

Розглянемо більш детально небезпеки, які виникають під час технологічного процесу:

**а) Дрібнодисперсні порошки:** при засипці висхідних порошків у форму для просочування, можливе поширення в повітрі дрібнодисперсної фракції порошків, дисперсність частинок складає від 1 до 10 мкм. ГДК для карбиду вольфраму складає  $5 \text{ мг/м}^3$ , а для нікелю  $0,001 \text{ мг/м}^3$  [77], за нормативною документацією, карбід вольфраму відносять до 3 класу небезпеки – помірно небезпечний; нікель до 2 класу – високонебезпечний [78].

Порошки карбиду вольфраму та самофлюсу на основі нікелю дрібнодиспер-

сному стані мають переважно фіброгенний вплив, який проявляється у подразненні слизистої оболонки, дихальних шляхів та осіданні в легенях. Така дія пов'язана із самою природою порошоків – це дрібні осколчаті частинки, які потрапляючи на слизисту оболонку травмують її. Такий пил, на відміну від крупнодисперсного, практично не осідає в повітрі приміщення, а знаходиться у зваженому стані і легко потрапляє до легень. З іншого боку, накопичення в організмі важких металів може призвести до отруєння.

**б) Високотемпературна піч:** кінцевою операцією отримання виробів, методами порошкової металургії є спікання або ж інфільтраційні процеси проникнення рідкої фази у пористий каркас. Дана операція проводиться у високотемпературних печах, у середовищі захисного газу чи на повітрі. У контексті даної роботи використовується піч для спікання на повітрі, тому не потрібно проводити додаткові заходи, щодо захисту та обслуговування балонів з інертним чи газом відновником.

У лабораторії використовується струм напругою 220 В для живлення сушильної шафи та печі для спікання. Опір ізоляції силових та освітлювальних електропроводів повинен бути не менше 0,5МОм. Лабораторія належить до приміщення з підвищеною небезпекою електротравм, оскільки існує можливість одночасного доторкання людини до неструмовідних частин електроустановки і до металоконструкцій, що мають контакт із землею.

Все електричне обладнання в лабораторії з'єднано між собою та є трифазною електронною мережею з глухозаземленою нейтраллю. Розетки відносяться до однофазної електронної мережі. Можливими випадками ураження електричним струмом у даній лабораторії є ураження при пошкодженні ізоляції і заземлення печей та електричного обладнання або при пошкодженні розетки, яке можливе безпосередньо при дотику до пошкодженої ізоляції чи до корпусу установки, безпосереднє зіткнення з струмоведучими частинами установок, що знаходяться під напругою, пов'язане з небезпекою ураження струмом. При цьому ступінь небезпеки і можливість ураження електричним струмом залежать від того, яким чином сталося дотик людини до провідників, що знаходяться під напругою. Таким чи-

ном, ураження людини електричним струмом у лабораторії може статися під час двофазного дотику чи однофазного дотику до фазного і нейтрального провідника у мережах з напругою до 1кВ з глухозаземленою нейтраллю [79].

Внаслідок тривалої роботи печі, теплове випромінювання може привести до теплового удару та головного болю, до ослаблення уваги. Допустиме значення густини потоку ІЧВ, згідно з [80] складає 140 Вт/кв. м., за рахунок високої температури є висока небезпека опіків.

**в) Шліфувально-абразивний станок:** з метою досягнення високої чистоти поверхні та очищення отриманих композитів від окалини, проводиться додаткова механічна обробка на шліфувальному станку. Основною небезпекою яка може спіткати робітника під час роботи є механічні травми, за рахунок контакту частин тіла з рухомим абразивним кругом. Також в наслідок зношування, дрібні частинки можуть потрапляти до слизової оболонки, викликати запалення та кашель.

#### 4.1.1 Мікроклімат

Лабораторія 0-22 в якій проводилась переважна кількість досліджень оснащена системами опалення, вентиляції та кондиціонування для забезпечення потрібних мікрокліматичних умов приміщення. Умови мікроклімату виконуються завдяки встановленому водяному опаленню у холодний період року та штучній припливно-витяжній вентиляції у теплий період року. Параметри мікроклімату знаходяться у допустимих межах, встановлених ДСН 3.3.6.042-99 [81]. Робота, яка виконується в лабораторії, відноситься до категорії середньої важкості Па, оскільки робота пов'язана з ходінням, переміщенням дрібних (до 1 кг) виробів або предметів у положенні сидячи або стоячи і які потребують незначного фізичного напруження. Енерговитрати організму становлять від 151 ккал/год до 200 ккал/год. Значення показників температури, відносної вологості та швидкості руху повітря для категорії робіт середньої важкості Па у лабораторії 0-22 відповідають допустимим вимогам встановлених для постійного робочого місця в холодний та теплий період року (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Параметри мікроклімату

Категорія	Параметр мікроклімату	Період року	Нормовані значення мікроклімату ДСН 3.3.6.042-99 [81]		Дані вимірювань	Висновки
			Оптимальні	Допустимі		
Середньої важкості Па	Температура, °C	Холод.	19 – 21	17 – 23	17	Допустимі
		Тепл.	21 – 23	18 – 27	23	Оптимальні
	Відносна вологість повітря, %	Холод.	40 – 60	75	72	Допустимі
		Тепл.	40 – 60	65	54	Оптимальні
	Швидкість руху повітря, м/с	Холод.	0,2	<0,3	0,2	Оптимальні
		Тепл.	0,3	0,2 – 0,4	0,3	Допустимі

#### 4.1.2 Рівень шуму

Шум – це будь-який небажаний звук, який наносить шкоду здоров'ю людини, знижує його працездатність, а також може сприяти отриманню травми внаслідок зниження сприйняття попереджувальних сигналів [82].

Вібрація – це механічні коливання твердого тіла [83]. Лабораторія обладнана наступними приладами, які є джерелом шуму, а саме: гідравлічні преси, печі для спікання та електроустаткування.

За часовою характеристикою шум відноситься до постійного – рівень звуку за весь робочий день при роботі обладнання не змінюється більш ніж на 5дБА. За походженням шум поділяється на електромагнітний (джерело – електроустаткування) та механічний (джерело – гідравлічні преси). При одночасній роботі всього устаткування рівень шуму може перевищувати допустимі норми [82], що призводить до виникнення профзахворювань.

Шум може викликати різні загально біологічні подразнення, патологічні зміни, функціональні розлади та механічні ушкодження. Для зменшення шкідливого впливу виробничого шуму на працівників шумних виробництв, послаблення передавання його в сусідні приміщення застосовують звуко- і віброізоляцію, звуко- і вібропоглинання та глушники шуму. Також для зменшення шкідливого

впливу шуму використовуються індивідуальні засоби захисту від шумового впливу або обмеження часу перебування в зоні підвищеного шуму. Так як всі установки одночасно не використовувались, а період роботи на окремих з них не великий, то вплив шуму не значний, тому в даних умовах застосовувати захист не потрібно.

## **4.2 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці**

### **4.2.1 Запиленість робочого середовища**

Чистота повітря в лабораторії визначається вмістом пилу і шкідливих речовин. У ГОСТ 12.1.005-88 [77] встановлені гранично допустимі концентрації шкідливих речовин  $c_{гдк}$  (мг/м<sup>3</sup>) в повітрі робочої зони виробничих приміщень ГДК для карбїду вольфраму складає 6 мг/м<sup>3</sup>, а для нікелю 0,001 мг/м<sup>3</sup>. Приміщення в яких проводяться роботи з підвищеною запиленістю, обладнані місцевою системою вентиляції для зниження рівня пилу в робочому середовищі.

Для запобігання попадання пилу у дихальні шляхи рекомендується при дозуванні використовувати респіратор, а також захисні окуляри та гумові рукавиці [78]. Всі шкідливі речовини, які створюють пил, зберігаються в посуді, що щільно закривається у витяжній шафі. Особи, що піддаються впливу пилу забезпечувались спецодягом.

### **4.2.2 Небезпека ураження електричним струмом**

Згідно ДНАОП 0.00-1.21-98 [84] для запобігання ураження електричним струмом від електропечей передбачається заземлення високовольтних мереж, додатковий шар ізоляції на кабелях живлення. Незважаючи на те, що пічне обладнання живиться від низьковольтних мереж (до 1000 В), за рахунок дії закону Джоуля-Ленца відбувається значне виділення тепла при проходженні електричного струму, тому струмове навантаження на кабелі досить значне. Щоб уникнути проплавлення кабелів, необхідно чітко підібрати співвідношення, між перері-

зом кабелю та типом підсиленої обмотки ізоляції. Оскільки використовується струм до 1000 В, ефективним методом захисту являється огорожувальна система, яка складається з кожухів та кришок. Позначки чи плакати привертають увагу працюючого персоналу та забезпечити інформування про можливу небезпеку. Всі печі обладнані додатковою системою захисту – системою блокування подачі струму на нагрівачі. Передбачена захисна система автоматичного вимкнення при контакті оператора з джерелом струму чи несправностях мережі.

Допустима напруга для людини при нормальному (не аварійному) режимі роботи електроустановки не повинна перевищувати 3 В для змінного струму і 8 В для постійного. Найбільш небезпечна частота становить від 50 Гц до 60 Гц.

### **4.2.3 Виробничевипромінювання**

З метою захисту від теплового впливу та опіків при роботі із нагрівальною піччю використовували спецодяг – рукавиці та спеціальний інструмент (металеві щипці) для завантаження та вивантаження зразків.

У виробничих умовах з високою температурою і вологістю навколишнього середовища тепловіддача утруднена, організм людини може перегрітися. Таке явище називають гіпертермією. Внаслідок перегрівання організму і втрати ним великої кількості рідини з потом можливе порушення водно-електролітного обміну, що проявляється судомною хворобою. Під час завантаження та вивантаження зразків використовувались металеві щипці та рукавиці.

### **4.2.4 Інженерні рішення під час роботи зі шліфувальним верстатом**

Шліфувальний верстат є джерелом не тільки шуму, а й вібрації. Вібрація викликає порушення фізіологічного та функціонального стану людини. Вібрацію нормують згідно з [83]. Допустима тривалість вібраційного впливу не більше 120 хв. Для віброізоляції стаціонарних машин з вертикальною змішувальною силою використовують віброізолювальні опори у вигляді прокладок або пружин. У

даному випадку використовувались резинові прокладки.

Іншою небезпекою, яка може зустріти оператора установки це пошкодження м'яких тканин тіла за рахунок контакту з рухомими частинами. Для запобігання таких випадків, зразки, які обробляються, закріплюються в спеціальному тримачі, та затискаються гвинтами. Це дозволяє дистанціювати оператора від небезпечного середовища та знизити ризик травмування. З іншого боку, внаслідок стирання поверхні, виділяються дрібні частинки, іскри. Для запобігання потрапляння цих тіл до слизової оболонки, застосовують спеціальні кожухи, з полімерних матеріалів, які б дозволяли захистити оператора і водночас дозволили б візуально контролювати процес. У випадку відсутності таких кожухів, необхідно застосовувати засоби індивідуального захисту, респіратор, гумові рукавиці та окуляри. Для уникнення електротравм, на шліфувальному станку передбачається струмоізолююча платформа, та додаткові шари ізоляції електромереж.

### **Підсумковий аналіз умов праці, небезпечних та шкідливих чинників**

Аналізуючи умови праці, небезпечні та шкідливі фактори, можна зазначити, що виконана робота не є шкідливою для робітників.

Так, параметри мікроклімату знаходяться в допустимих межах, встановлених ДСН 3.3.6.042-99 [81]. Шум та вібрації не мали значного впливу при виконанні роботи, оскільки всі установки, наявні в приміщенні не використовувалися одночасно. Лабораторія 022-9 належить до приміщення з підвищеною небезпекою електротравм, оскільки існує можливість одночасного доторкання людини до неструмовідних частин електроустановки і до металоконструкцій, що мають контакт із землею.

### **4.3 Розрахунок інженерного рішення. Вентиляція**

Вентиляцією – називають направлений і контрольований повітрообмін, що забезпечує видалення з приміщення чи робочого середовища, забрудненого повіт-



ря і подачу на його місце свіжого. Задачею вентиляції є забезпечення чистоти повітря і заданих метеорологічних умов у виробничих приміщеннях [85].

Для ефективної роботи вентиляції необхідно виконувати ряд вимог:

– Різниця обсягів повітря, що подається в приміщення, з повітрям, яке з нього видаляється не повинно перевищувати 10 – 15 %.

– Подавати свіже повітря необхідно в зони з низькою локалізацією забруднення, а відкачувати з частини великого забруднення.

– Система вентиляції не повинна створювати додаткові шкідливі і небезпечні фактори (шум , вібрацію, випромінювання тощо).

– Система вентиляції повинна бути надійною в експлуатації і економічною.

Специфіка робіт, які проводяться в 0-22 аудиторії передбачають виділення шкідливих речовин у повітря. У такому випадку розрахунок повітрообміну проводиться з балансу утворених в приміщенні шкідливих речовини і речовин, що видаляються з нього:

$$L = G_{\text{шр}} / (C_{\text{вид}} - C_{\text{пр}}),$$

де  $G_{\text{шр}}$  – маса шкідливих речовин, що виділяються у приміщенні за одиницю часу, мг/год;

$C_{\text{вид}}$  і  $C_{\text{пр}}$  – концентрація шкідливих речовин у повітрі, що видаляються, і у припливному повітрі ( $C_{\text{вид}} \leq C_{\text{гдж}}$ ,  $C_{\text{пр}} \leq 0,3C_{\text{гдж}}$ ).

$$L = 12000 / (3 - 0,6) = 80000 / 2,4 = 5000 \text{ м}^3/\text{год},$$

У випадку роботи з карбідом вольфраму та самофлюсом на основі нікелю, основним джерелом запилювання середовища буде карбід вольфраму. Оскільки самофлюс отримувався в промислових масштабах розпиленням та фасуванням лише однієї фракції близько 100 мкм. Натомість карбід вольфраму дробився механічно, тому має багато фракційний склад, і дрібний пил досить легко потрапляє в повітря.

У зв'язку з наявністю в лабораторії осередків підвищеного забруднення, а також пічного обладнання, приміщення обладнано місцевою механічною вентиляцією витяжного типу. Основним при розрахунку вентиляційної системи є визначення втрати тиску, які виникають у результаті руху повітря, за рахунок дії сил тертя  $P_{\text{тр}}$  (за рахунок шорсткості повітропроводу) і в місцевих опорах ( $P_{\text{мо}}$ ).

$$P_{\Sigma} = P_{\text{тр}} + P_{\text{мо}} = \left( \sum_1^n l \cdot \frac{\lambda}{d} + \sum_1^m \xi \right) \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2},$$

де  $l$  – довжина ділянки повітропроводу, характеризується сталістю витрати і швидкості повітря, м;

$\lambda$  – коефіцієнт опору тертя (орієнтовно  $\lambda = 0,02$ );

$\xi$  – коефіцієнт місцевого опору (довідкові дані в залежності від фасонних змін повітропроводів і устаткування,  $x = 0 \dots 1000$ ) [86]–[87];

$\rho$  – густина повітря,  $\text{кг/м}^3$ ;

$v_{\text{п}}$  – швидкість повітря, м/с;

$n$  – число ділянок магістралі;

$m$  – число елементів місцевих опорів.

$$P_{\Sigma} = P_{\text{тр}} + P_{\text{мо}} = \left( \sum_1^n l \cdot \frac{\lambda}{d} + \sum_1^m \xi \right) \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} =$$

$$\left( ((0,3 \cdot 0,02 / 0,4) + (0,6 \cdot 0,02 / 0,4) + (0,3 \cdot 0,02 / 0,4)) + (2 \cdot 0,02 / 0,4) \right) + (0,5 + 0,19 + 1,4 + 1) \cdot$$

$$1,29 \cdot 10 \cdot 10 / 2 = 0,015 + 0,03 + 0,015 + 0,1 + 3,09 \cdot 64,5 = 209,62 \text{ Па.}$$

Установочна потужність електродвигуна ( $N$ , кВт) для вентилятора розраховується за формулою:

$$N = k \cdot L \cdot P / (1000 \cdot \eta_y \cdot \eta_{\text{п}}),$$

де  $k$  – коефіцієнт запасу (1,05 – 1,15);

$L$  – продуктивність вентилятора,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;

$P$  – повний тиск вентилятора, Па;

$\eta_y$  – к. к. д. вентилятора;

$\eta_{\text{п}}$  – к. к. д. передачі від вентилятора до двигуна (для клиновидних пасів

$\eta_{\text{п}} = 0,9 - 0,95$ , для плоских пасів  $0,85 - 0,9$ ).

$$N = 1,1 \cdot 100 \cdot 800 / (1000 \cdot 0,8 \cdot 0,9) = 122,2 \text{ кВт.}$$

#### **4.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях**

##### **4.4.1 Пожежна безпека**

У лабораторії 022-9 можлива надзвичайна ситуація – пожежа. Пожежа – неконтрольоване горіння поза спеціальним вогнищем, що розповсюджується у часі і просторі. Спричиняється при порушенні правил і норм експлуатації електричних приладів та виробничого устаткування [79]. У даній лабораторії можливі пожежі класу А (горіння твердих речовин). Відповідно до [88] приміщення за вибухопожежною та пожежною небезпекою відноситься до категорії Г (приміщення, в яких знаходяться негорючі речовини та матеріали в гарячому, або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор, полум'я; горючі гази, тверді речовини, які спалюються або утилізуються як паливо).

Можливими причинами виникнення пожеж у приміщенні лабораторії можуть бути: коротке замикання в електричних ланцюгах, порушення правил пожежної безпеки при використанні побутових електронагрівальних приладів, при виробництві вогневих робіт(зварювання).

Дана лабораторія обладнана місцевою вентиляцією, щоб виключити такі причини, як запиленість чи загазованість повітря. Для запобігання самозапаленню різних матеріалів, розробляються спеціальні правила для їх зберігання та використання. Зберігати ці матеріали необхідно в металевій щільно зачиненій тарі.

У зв'язку з тим, що в КПІ ім. Сікорського значна частина обладнання є електричним, основним засобом гасіння пожежі є вогнегасник ОУ-2. Для виявлення пожеж у лабораторіях застосовується автоматична пожежна сигналізація. Тип ав-

томатичного датчика плавкий. Кожна лабораторія має схему евакуації людей під час пожежі. У приміщенні лабораторії встановлено 4 пожежні сигналізатори ИП-105, сигнал з яких надходить на основну панель пожежної сигналізації. Сигналізатори ИП-105 спрацьовують на підвищення температури до  $t = 72\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для евакуації персоналу під час виникнення пожежі передбачено план евакуації, який наведено на рисунку 4.1.

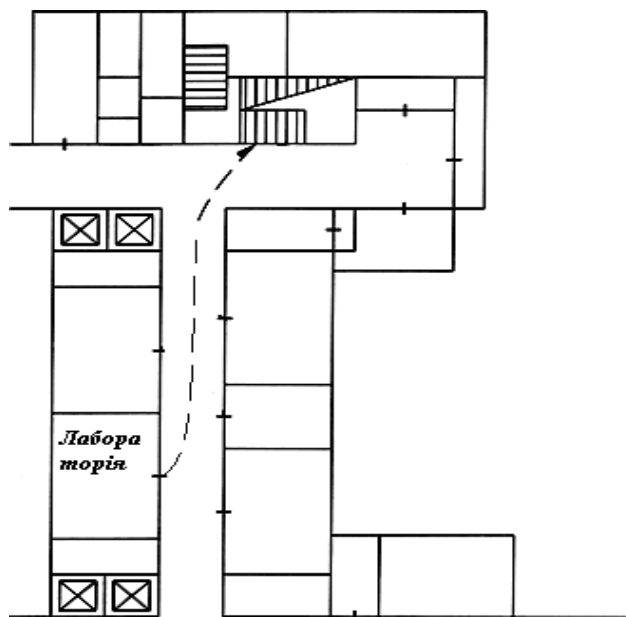


Рисунок 4.1 – План евакуації з приміщення

У коридорі знаходиться пожежний кран із приєднаним до нього пожежним рукавом. Відповідно до [88] будівля корпусу відноситься до I ступеня вогнестійкості.

Отже, заборонено:

- палити;
- зберігати запальні та легкозаймисті матеріали, не пов'язані з технологічним процесом;
- використовувати електронагрівальні прибори в побутових цілях;
- користуватись зіпсованим електричним устаткуванням, некаліброваними електричними запобіжниками, незаземленими електроприладами;
- захаращувати проходи та виходи;

– захищати проходи до засобів гасіння пожежі (вогнегасників, вентиляційних пожежнихкранів).

Усі електроштити повинні постійно знаходитись у закритому стані й не захищуватись сторонніми предметами.

Оскільки у будівлі знаходяться прилади, що працюють безперебійно, то вони повинні бути під постійним наглядом відповідальних осіб.

Перед закриттям приміщення проводять ретельний огляд. Перекривають воду та знеструмлюють усі установки, що не працюють безперебійно.

Для запобігання самозапалення різних матеріалів, таких як спирт, бензин, технічні мастила потрібно зберігати ці речовини необхідно в металевій тарі щільно зачиненій [89].

Співробітники чи студенти, що виявили виникнення пожежі, зобов'язані: а) викликати пожежну допомогу за телефоном 5 – 01 (міський – 01);

б) прийняти усі заходи до урятування людей та гасіння пожежі усіма доступними засобами гасіння пожежі.

#### **4.4.2 Забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях**

Надзвичайна ситуація (НС) – це порушення нормальних умов життя і діяльності людей на об'єкті або території, спричинене аварією, катастрофою, стихійним лихом, великою пожежею, застосуванням засобів ураження, що призвели або можуть призвести до людських і матеріальних втрат.

Відповідно до цивільного кодексу України, надзвичайні ситуації класифікуються за характером походження, ступенем поширення, розміром людських втрат та матеріальних збитків [89]. Залежно від характеру походження подій, що можуть зумовити виникнення надзвичайних ситуацій на території України, визначаються такі види надзвичайних ситуацій:

а) техногенного характеру – транспортні аварії (катастрофи), пожежі, неспровоковані вибухи чи їх загроза, аварії з викидом (загрозою викиду) небезпечних хімічних, радіоактивних, біологічних речовин, раптове руйнування споруд та

будівель, аварії на інженерних мережах і спорудах життєзабезпечення, гідродинамічні аварії на греблях, дамбах тощо;

б) природного характеру – небезпечні геологічні, метеорологічні, гідрологічні морські та прісноводні явища, деградація ґрунтів чи надр, природні пожежі, зміна стану повітряного басейну, інфекційна захворюваність людей, сільськогосподарських тварин, масове ураження сільськогосподарських рослин хворобами чи шкідниками, зміна стану водних ресурсів та біосфери тощо;

в) соціальні – порушення нормальних умов життя та діяльності людей на окремій території чи об'єкті на ній або на водному об'єкті, спричинене протиправними діями терористичного і антиконституційного спрямування, або пов'язане із зникненням (викраденням) зброї та небезпечних речовин, нещасними випадками з людьми тощо;

г) воєнні – порушення нормальних умов життя та діяльності людей на окремій території чи об'єкті на ній або на водному об'єкті, спричинене застосуванням звичайної зброї або зброї масового ураження, під час якого виникають вторинні чинники ураження населення, що її визначають в окремих нормативних документах.

Залежно від обсягів заподіяних надзвичайною ситуацією наслідків, обсягів технічних і матеріальних ресурсів, необхідних для їх ліквідації, визначаються такі рівні надзвичайних ситуацій [89]:

- а) державний;
- б) регіональний;
- в) місцевий;
- г) об'єктовий.

Порядок класифікації надзвичайних ситуацій за їх рівнями встановлюється Кабінетом Міністрів України.

Оповіщення про загрозу або виникнення надзвичайних ситуацій полягає у своєчасному доведенні такої інформації до органів управління цивільного захисту, сил цивільного захисту, суб'єктів господарювання та населення.

У даній лабораторії можливе виникнення надзвичайної ситуації техногенно-

го характеру об'єктного рівня, яка розгортається на території об'єкта або на самому об'єкті і наслідки якої не виходять за можливий рівень об'єкта або його санітарно-захисної зони.

Для захисту лабораторій ІФФ від виробничих аварій і катастроф, а також їх попередження, здійснюється комплекс організаційних, інженерно-технічних заходів, які визначають вимоги охорони праці і вимог безпеки, протипожежної безпеки, а також вимог інструкції з експлуатації обладнання, електричних установок, посудин під тиском[79].

Для захисту корпусу від пожеж, що викликані стихійними лихами (блискавки, замикання електропроводки внаслідок пошкодження магістралей і т.п.) використовуються громовідводи, автоматичні системи відключення, системи автоматичного пожежогасіння, а також первинні засоби пожежогасіння [88].

Для ліквідації можливих пожеж на ділянці передбачені вогнегасники типу ОУ-5 та пожежні стенди.

#### **4.5 Висновки до розділу охорони праці**

1. Мікроклімат у лабораторії 022-9, де проводились дослідження, відповідає вимогам санітарних норм.
2. Показники шкідливих чинників, що виникають у процесі роботи (освітленість, шум, запиленість, теплове та інфрачервоне випромінювання) не перевищують допустимих значень.
3. З точки зору пожежної безпеки лабораторія 022-9 відноситься до приміщень категорії Г, вона обладнана необхідними засобами пожежогасіння.

## ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз літературних даних, щодо отримання та формування структури та властивостей композиційних, зносостійких матеріалів на основі твердих тугоплавких сполук та самофлюсівних сплавів. Розглянуті основні технології отримання, композитів, які б дозволили отримати матеріали з мінімальною пористістю та заданими властивостями. Показано, що перспективними матеріалами у цьому відношенні є композиції за участю плавлених твердих тугоплавких сполу та металевих зв'язок, вироби з яких отримують методами порошкової металургії. Як наслідок встановлена мета та задача дисертації роботи згідно яким передбачалось вивчення закономірностей отримання зносостійких матеріалів для роботи в умовах абразивного зношування із композицій плавлені карбіди – самофлюсівний сплав з підвищеними експлуатаційними характеристиками, встановлення закономірностей та фундаментальні засад отримання матеріалів з наперед заданими структурою та властивостями.

2. Вивчені закономірності отримання композиційних матеріалів з композицій плавлений карбід вольфраму і металевої зв'язки з самофлюсівного сплаву на основі нікелю. Встановлені оптимальні умови та склад композицій, які забезпечують стовідсоткову щільність композицій. Показано, що найбільш доцільним методом отримання таких композицій є просочення вільно насипаних гранул з плавленого карбіду вольфраму розплавом самофлюсівного сплаву на повітрі. Встановлений оптимальний склад композицій залежно від характеристик гранул.

3. Вивчена мікроструктура матеріалів, їх фазовий склад та твердість. Показано, що вона є гетерофазною і залежить від складу матеріалу та умов отримання. Мікротруктура отриманих композиційних матеріалів є гетерофазною, яка змінюється залежно від температури та часу просочування. Збільшення цих показників сприяє більш повній взаємодії між гранулами з карбіду вольфраму та розплавом самофлюсу. Встановлений механізм цих процесів, згідно якому відбувається диспергування зерен карбіду вольфраму за рахунок міграції розплаву між зернами гранул та наступним розчиненням і взаємодією з компонентами СФС з утворен-



ням дисперсних зерен складних карбідів ( $W_xFe_yC_z$ ) та евтектик, кількість, форма і розмір яких залежить від температурних і кінетичних параметрів а також активності елементів в сплавах та закономірностями гетеродифузії при сплавоутворенні.

У наслідок цього відбувається дисперсне зміцнення матричної фази з СФЗ за рахунок чого збільшується твердість та зносостійкість отриманих матеріалів.

4. Вивчені властивості композиційних матеріалів за участю КПМ та СФЗ. Встановлено, що інтегральна твердість та зносостійкість при абразивному зношуванні КМ залежить від їх складу, умов отримання та експлуатації. Твердість матеріалів зростає зі збільшенням дисперсності гранул карбідної складової матеріалів та часу і температури просочення. Останнє зумовлено утворенням дисперсно зміцнених структур.

Зносостійкість матеріалів при абразивному зносі у парі з закріпленим абразивом залежить від характеристик вихідної сировини та умов зносу. Показано, що знос матеріалу зменшується зі збільшенням розміру гранул до 515 мкм. З часом знос збільшується лінійно, що свідчить про незмінність механізму зношування в основі якого є крихке руйнування карбідної складової та знос за рахунок різання металевої зв'язки. Швидкість зношування з часом зменшується за рахунок дисперсного зміцнення металевої зв'язки продуктами руйнування карбідної складової, що приводить до виникнення напружено-деформованого стану, що викликаний великою кількістю зароджених енергетичних бар'єрів для руху дислокацій.

5. Дослідження зносостійкості при газоабразивному зношуванні показало, що вона залежить від складу, умов отримання матеріалів та умов зношування. Встановлено механізм зношування. Показано, що в основі механізму газоабразивного зношування лежать процеси крихкого руйнування карбідної складової та різання металевої. Переважання того чи іншого механізму залежить від умов зношування (кута «атаки») повітряно-абразивного струменя з поверхнею зношування матеріалу. Ступінь зношування у кожному випадку визначається структурою матеріалу.

Показано, що найвищі показники зносостійкості демонструють матеріали із середнім розміром гранул 250 мкм. Це обумовлено тим, що при не великих кутах

атаки струменя, основний механізм зношування – різання. В таких умовах основний вклад у втрату маси буде вносити пластична матриця.

6. Розроблені засади з техніки безпеки та охорони навколишнього середовища, що забезпечують безпечні умови проведення досліджень по розробці композиційних матеріалів з використанням порошоків карбідів перехідних металів та самофлюсівних сплавів, термічного обладнання та механічного обладнання з рухомими елементами.

## CONCLUSIONS

1. The analysis of literature data on obtaining and forming the structure and properties of composite, wear-resistant materials based on hard refractory compounds and self-fluxing alloys. The basic technologies of obtaining composites which would allow to receive materials with the minimum porosity and the set properties are considered. It is shown that promising materials in this regard are compositions involving fused solid refractory compounds and metal bonds, products of which are obtained by powder metallurgy. As a result, the purpose and task of the dissertation were established, according to which it was assumed the study of the patterns of obtaining wear-resistant materials for work in the conditions of abrasive wear from compositions of cast carbides - self-fluxing alloy with high performance, establishing patterns and fundamental principles of obtaining materials with predetermined structure and properties.

2. The regularities of obtaining composite materials from compositions of cast tungsten carbide and metal bonds from self-fluxing alloy based on nickel are studied. The optimal conditions and composition of the compositions are established, which provide one hundred percent density of the compositions. It is shown that the most expedient method of obtaining such compositions is the impregnation of freely poured granules of fused tungsten carbide with a melt of a self-fluxing alloy in air. The optimal composition of the compositions depending on the characteristics of the granules is set.

3. The structure of materials, their phase composition and hardness was studied. It is shown that it is heterophase and depends on the material composition and production conditions. The structure of the obtained composite materials is heterophase, which varies depending on the temperature and impregnation time. The increase in these parameters contributes to a more complete interaction between the tungsten carbide granules and the self-flux melt. The mechanism of these processes is established, according to which tungsten carbide grains are dispersed due to melt migration between granule grains and subsequent dissolution and interaction with SPS components with formation of dispersed grains of complex carbides ( $W_xFe_yC_z$ ) and eutectic, the number, shape and

size of which depend on temperature. Parameters as well as the activity of elements in alloys and patterns of heterodiffusion in alloying. As a result, there is a disperse hardening of the matrix phase with SFS due to which the hardness and wear resistance of the obtained materials increases.

4. The properties of composite materials with the participation of CPM and SFS are studied. It is established that the integral hardness and wear resistance in abrasive wear of CM depends on their composition, conditions of production and operation. The hardness of the materials increases with increasing dispersion of the granules of the carbide component of the materials, the time, temperature of impregnation. The latter is due to the formation of dispersely strengthened structures.

The wear resistance of materials during abrasive wear in a pair with a fixed abrasive depends on the characteristics of the raw material and wear conditions. It is shown that the wear of the material decreases with increasing granule size to 515  $\mu\text{m}$ . Over time, wear increases linearly, indicating the invariance of the wear mechanism, which is based on the fragile destruction of the carbide component and wear due to cutting the metal matrix. The wear rate decreases over time due to the dispersion strengthening of the metal bond by the destruction products of the carbide component, which leads to a stress-strain state caused by a large number of inherent energy barriers to the movement of dislocations.

5. The study of wear resistance in gas-abrasive wear has shown that it depends on the composition, conditions of obtaining materials and wear conditions. The wear mechanism is established. It is shown that the mechanism of gas-abrasive wear is based on the processes of brittle fracture of the carbide component and cutting of the metal matrix. The predominance of one or another mechanism depends on the conditions of wear (angle of "attack") of the gas-abrasive jet with the surface of the material. The degree of wear in each case is determined by the structure of the material.

It is shown that the highest wear resistance is shown by materials with an average granule size of 250  $\mu\text{m}$ . This is due to the fact that at not large angles of attack of the jet, the main mechanism of wear - cutting. Under such conditions, the main contribution to weight loss will be made by the plastic matrix.

6. Developed principles of safety and environmental protection environments that provide safe conditions for research on the development of composite materials using powders of carbides of transition metals and self-flux alloys, thermal equipment and mechanical equipment with moving elements.

**ПЕРЕЛІК ДжЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. Neale M. J. A guide to wear problems and testing for industry / M. J. Neale, M. Gee. – William Adrew publishing. – 2001. – 157 p.
2. Straffelini G. Friction and Wear / G. Straffelini. – Springer Tracts in Mechanical Engineering. – 2015. – 292 p.
3. Dodiya V. K. A Study of Various Wear Mechanism and its Reduction Method / V. K. Dodiya, J. P. Parmar // International Journal for Innovative Research in Science & Technology. – 2016. – Vol. 2, Is. 9. – P. 242 – 247.
4. Маслюк В. А. Фізико-хімічні основи поверхневих явищ у твердих дисперсних системах. Навчальний посібник / В. А. Маслюк, П. І. Лобода, А. В. Мініцький. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 200 с.
5. Добровольский А. Г. Абразивная износостойкость материалов : Справочное пособие / А. Г. Добровольский, П. И. Кошеленко – К. : «Тэхника», 1989. – 128 с.
6. Власов В. М. Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей / В. М. Власов – М. : Машиностроение, 1987. – 304 с.
7. Trivedi H. K. Rolling contact fatigue evaluation of advanced bearing steels with and without the oil anti-wear additive tricresyl phosphate / H. K. Trivedi, N. H. Foster, L. Rosado // Tribology Letters. – 2010. – Vol. 41. – P. 597 – 506.
8. Microstructure evolution and wear resistance of high silicon bainitic steel after austempering / Zhang Changle, Li Shouhai, Fu Hanguang, Lin Yinghua // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – 14 p.
9. Dependence of fretting wear resistance on microstructural features of alloyed steels / Xinyue Qiu, Xuejiao Wei, Xiaojun Xu [et al.] // Tribology International. – 2019. – Vol. 137. – P. 39 – 45.
10. Effect of tempering on the impact-abrasive and abrasive wear resistance of ultra-high strength steels / Oskari Haiko Kati Valtonen Antti Kaijalainen [et al.] // Wear. – 2019. – Vol. 440 – 441. – 11 p.

11. Гарбер М. Е. Износостойкие белые чугуны. / М. Е. Гарбер. – М. : Машиностроение, 2010. – 280 с.
12. Сидорин И. Н. Исследование износостойких высоколегированных хромистых сталей / И. Н. Сидорин, Н. А. Долгова, В. П. Масков // Известия вузов. Машиностроение. – 1969. – № 10. – С. 133 – 135.
13. Сидорин И. Н. Износостойкость инструментальных сталей и ее зависимость от распределения легирующих элементов в мартенсите и карбидах / И. Н. Сидорин, Н. А. Долгова // Известия вузов. Машиностроение. – 1970. – № 5. – С. 155 – 157.
14. Ioan Milosan. The manufacturing of a special wear-resistant cast iron used in automotive industry / Milosan Ioan // Procedia – Social and Behavioral Sciences. – 2014. – Vol. 109. – P. 610 – 613.
15. Studnicki A. Wear resistance of chromium cast iron– research and application / A. Studnicki, J. Kilarski, M. Przybył [et al.] // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2006. – Vol. 16, Is. 1 – 2. – P. 63 – 73.
16. Bao J. Wear-Resistant WC Composite Hard Coatings by Brazing / J. Bao, J. W. Newkirk, S. Bao // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2004. – Vol. 13, № 4. – P. 385 – 388.
17. Constrained sintering and wear properties of Cu–WC composite coatings / J. L. Cabezas-Villa, L. Olmos, H. J. Vergara-Hernandez [et al.] // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2017, Vol. 27, № 10. – P. 2214 – 2224.
18. Shan-Ping Lu. Wear behavior of brazed WC/NiCrBSi(Co) composite coatings / Shan-Ping Lu, Oh-Yang Kwon, YiGuo // Wear. – 2003. – Vol. 254, № 5 – 6. – P. 421 – 428.
19. Shan-Ping Lua. Wear behavior of brazed WC/NiCrBSi(Co) composite coatings / Shan-Ping Lua, Oh-Yang Kwona, Yi Guob // Wear. – 2003, – P. 421 – 428.
20. A comparative study of the structure and wear resistance of NiCrBSi/50 t.% WC composite coatings by laser cladding and laser induction hybrid cladding / Shengfeng Zhou, Jianbo Lei, Xiaoqin Dai [et al.] // Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2016. – Vol. 60. – P. 17 – 27.

21. X. Luo. Effect of NiCrBSi content on microstructural evolution, cracking susceptibility and wear behaviors of laser cladding WC/Ni–NiCrBSi composite coatings / X. Luo, G.J. Li // *Journal of Alloys and Compounds* – 2015. – Vol. 626. – P. 102 – 111.

22. Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi–WC coatings on stainless steel / M. J. Tobar, C. Álvarez, J. M. Amado [et al.] // *Surface & Coatings Technology*. – 2006. – Vol. 200, № 22 – 23. – P. 6313 – 6317.

23. Processing and characterization of laser clad NiCrBSi/WC composite coatings. Influence of microstructure on hardness and wear / D. Deschuyteneer, F. Petit, M. Gonon, F. Cambier // *Surface & Coatings Technology*. – 2015. – Vol. 283. – P. 162 – 171.

24. High temperature wear of cermet particle reinforced NiCrBSi hardfacings / A. Zikin, M. Antonov, I. Hussainova [et al.] // *Tribology International*. – 2013. – Vol. 68. – P. 45 – 55.

25. Fabrication of WCp/NiBSi metal matrix composite by electron beam melting / Hui Peng, Chang Liu, Hongbo Guo [et al.] // *Materials Science & Engineering A*. – 2016. – Vol. 666. – P. 320 – 323.

26. S. Lu. Microstructure and Bonding Strength of WC Reinforced Ni-Base Alloy Brazed Composite Coating / S. Lu, O. Kwon // *Surf. Coat. Technol* – 2002. – Vol. 153, № 1. – P. 40 – 48.

27. Wear resistance of diode laser-clad Ni/WC composite coatings at different temperatures / Zhikun Weng, Aihua Wang, Xuhao Wu [et al.] // *Surface & Coatings Technology*. – 2016, Vol. 304, P. 283 – 292.

28. Parisa Farahmand. Corrosion and wear behavior of laser clad Ni–WC coatings / Parisa Farahmand, Radovan Kovacevic // *Surface & Coatings Technology*. – 2015. – Vol. 276. – P. 121 – 135.

29. Chinmaya Kumar Sahoo. Microstructure and mechanical properties of TiC-Ni coating on AISI304 steel produced by TIG cladding process / Chinmaya Kumar Sahoo, ManojMasanta // *Journal of Materials Processing Technology* – 2017. – Vol. 240. – P. 126 – 137.



30. Potentials of niobium carbide (NbC) as cutting tools and for wear protection / M. Woydt, S. Huang, J. Vleugels [et al.] // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2018. – Vol. 72. – P. 380 – 387 .

31. Woydt M. The use of niobium carbide (NbC) as cutting tools and for wear resistant tribosystems / M. Woydt, H. Mohrbacher // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2014. – Vol. 49. – P. 212 – 218.

32. Кисла Г. П. Матеріалознавство тугоплавких металів та сполукнавч. посіб. / Г. П. Кисла, П. І. Лобода, В. Є. Федорчук, М. О. Сисоев. – К. : Центр учбової літератури, 2017. – 320 с.

33. Скороход В. В. Порошковые материалы на основе тугоплавких металлов и соединений / В. В. Скороход. – К. : Техніка, 1982. – 167 с.

34. Кислый П. С. Керметы / П. С. Кислый, Н. И. Бондарук, М. С. Боровикова и др. ; под ред. П. С. Кислого. – К. : Наук, думка, 1985. – 271 с.

35. Хасуи А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки ; пер. с яп. В. Н. Попова ; под ред. Н. Г. Шестеркина. – М. : Машиностроение, 1985 – 240 с.

36. Лахтин Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов. – 2-е издание / Ю. М. Лахтин. – М. : Металлургия, 1979. – 407 с.

37. Структуроутворення та формування триботехнічних властивостей евтектичних покриттів / М. В. Кіндрачук, Ю. А. Куницький, О. І Дудка та ін. – К. : Вища школа, 1997. – 120 с.

38. Диффузионные карбидные покрытия / В. Ф. Лоскутов, В. Г. Хижняк, Ю. А. Куницький, М. В. Кіндрачук. – К. :Техніка, 1991. – 168 с.

39. Фазовые превращения в структуре поверхностного слоя в процессе внешнего трения металлов / Б. А. Кириевский, В. И. Тихонович, Е. А. Марковский и др. // Пробл. трения и изнашивания – 1975. – Вып. 8. – С. 83 – 88.

40. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник. / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. – Киев: "Наукова думка", 1983. – 568 с.

41. Степанчук А. М. Матеріали для напилювання покриттів: навч. посіб / А. М. Степанчук, І. І. Білик. – К: Центр учбової літератури, 2016. – 236 с.

42. Белый А. И. Износостойкость и прочность карбидов вольфрама  $WC-W_2C$ , полученных различными способами / А. И. Белый // Автоматическая сварка. – 2010. – № 12. – С. 20 – 23.

43. Степанчук А. М. Теоретичні та технологічні основи отримання порошкових металів, сплавів і тугоплавких сполук. Підручник / А. М. Степанчук. – К. : ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2006. – 410 с.

44. Артамонов А. Я. Некоторые закономерности процесса абразивного изнашивания карбидов переходных металлов / А. Я. Артамонов, Г. А. Бовкун // «Тугоплавкие карбиды». – К. : «Наукова думка», 1982. – С. 217 – 220.

45. Износостойкости структура твердых наплавов М. М. Хрущов, М. А. Бабичев, Е. С. Беркович и др. – М. : Машиностроение, 1971. – 96 с.

46. Износостойкие наплавки эвтектическими сплавами на основе железа / А. К. Шурин, В. Е. Панарин, М. В. Киндрачук и др. // Защитные покрытия на металлах. – 1983. – Вып. 17. – С. 40 – 43.

47. Степанчук А. Н. Прочностные и абразивные свойства плавленых тугоплавких соединений и инструментальных материалов на их основе / Современные спеченные твердые сплавы. Сб. научных / под общ. ред. Н. В. Новикова. – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2008. – 344 с.

48. Полищук В. С. Интенсификация процессов получения карбидов, нитридов и композиционных материалов на их основе. – Севастополь: "Вебер", 2003. – 327 с.

49. Степанчук А. Н. Получение и некоторые свойства плавленых карбидов / А. Н. Степанчук, В. Я. Шлюко В. Я // Вестник КПИ, серия "Машиностроение". – 1970, – вып. 7, С. 116 –120.

50. Hadi Ghazanfari. Improving wear resistance of metal matrix composites using reinforcing particles in two length-scales:  $Fe_3Al/TiC$  composites / Hadi Ghazanfari, Carl Blais, Mario Gariépy // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 385. – 39 p.

51. Ahmed Elmahdy. Mechanical behavior of basalt and glass textile composites at high strain rates: A comparison / Ahmed Elmahdy, Patricia Verleysen // Polymer Testing. – 2020. – Vol. 81. – 13 p.

52. Nanotubes as polymer composite reinforcing additive materials – A comparative study / László Vanyorek, Emőke Sikora, Tamás Balog [et. al] // *Arabian Journal of Chemistry*. – Vol. 13, Is. 2. – P. 3775 – 3782.

53. Витрянюк В. К. Спеченные безвольфрамовые твердые сплавы: Монография / В. К. Витрянюк, А. Н. Степанчук. – К. : ЗАО «Випол», 2011. – 248 с.

54. Okamoto H. C-W (Carbon-Tungsten) / H. Okamoto // *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. – 2008. – Vol. 29, Is. 6. – P. 543 – 544.

55. Niobium carbide for machining and wear protection – Evolution of properties / M. Woydt, S. Huang, E. Cannizza [et. al] // *Metal Powder Report*. – 2019. – Vol. 74, Is. 2. – P. 82 – 89.

56. Microstructural investigation and machining performance of NbC-Ti ( $C_{0,5}N_{0,5}$ ) matrix cermets / S. G. Huang, H. B. Nie, X. Y. Guo [et. al] // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2019. – Vol. 84. – 8 p.

57. Kolchin O. P. Manufacturing and applications of niobium carbide components / O. P. Kolchin, I. K. Berlin // *Sintered materials and components*. – 1963. – Vol. 4, Is. 28. – P. 25 – 34.

58. S. Shimada. A Kinetic and thermoanalytical Study on Oxidation of Powder and Single-Crystal Samples of Niobium Carbide / S. Shimada // *Oxidation of Metals*. – 1994. – Vol. 42, Is. 5 / 6. – P. 357 – 373.

59. Hurricks P. L. Some metallurgical factors controlling the adhesive and abrasive wear resistance of steels. A review / P. L. Hurricks // *Wear*. – 1973. – Vol. 26. – P. 285 – 304.

60. Moore M. A. The relationship between the abrasive wear resistance, hardness and microstructure of ferritic materials / M. A. Moore // *Wear*. – 1974. – Vol. 28, Is. 1. – P. 59 – 68.

61. Wear-resistance and hardness: Are they directly related for nanostructured hard materials / I. Konyashin, B. Ries, D. Hlawatschek [et. al] // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2015. – Vol. 49. – P. 203 – 211.

62. New WC-Cu composites for the divertor in fusion reactors / M. Dias, N. Pinhão, R. Faustino [et. al] // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – Vol. 521. – P. 31 – 37.

63. Mechanical properties and microstructure of WC-Fe-Ni-Co cemented carbides prepared by vacuum sintering / Yang Gao, Bing-Hui Luo, Ke-Jian He [et. al] // Vacuum. – 2017. – Vol. 143. – P. 271 – 282.

64. Shih-Hsien Chang. Characterization and properties of sintered WC-Co and WC-Ni-Fe hard metal alloys / Shih-Hsien Chang, Song-Ling Chen // Journal of Alloys and Compounds. – Vol. 585. – P. 407 – 413.

65. Hadi Karimi. Effect of sintering techniques on the structure and dry sliding wear behavior of WC-FeAl composite / Hadi Karimi, Morteza Hadi // Ceramics International. – 2020. – 11 p.

66. Oscillatory pressure sintering of WC-Fe-Ni cemented carbides / Yang Gao, Ka Gao, Lei Fan [et. al] // Ceramics International. – Vol. 46, Is. 8. – P. 12727 – 12731.

67. Степанчук А.М. Отримання зносостійких композиційних матеріалів за участю самофлюсівних сплавів просочуванням / А. М. Степанчук, М. Б. Шевчук // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2013. – №5. – С. 87 – 92.

68. Степанчук А. М. Структурутворення при взаємодії РЕЛІТу з розплавами самофлюсівних сплавів на основі заліза / А. М. Степанчук, М. Б. Шевчук, Л. О. Бірюкович // Металознавство та термообробка. – 2012. – №2. – С. 44 – 49.

69. Лисовский А. Ф. Формование структуры композиционных материалов при обработке металлическими расплавами. / А. Ф. Лисовский. – К. : Наукова думка, – 2008. – 198 с.

70. R. Warren. Determination of the Interfacial Energy Ratio in Two-Phase Systems by Measurement of Interphase Contact / Warren R. // Metallography. – 1976. – Vol. 9, № 3. – P. 183 – 191.

71. Документація. Металеві матеріали. Визначення твердості за Роквеллом. Частина 1. Метод випробування (шкали А, В, С, D, Е, F, G, Н, К, N, Т) : ДСТУ ISO 6508-1:2013. – [Чинний від 2014-01-07]. – К. : Мінекономрозвитку України, 2014. – 22 с.

72. Документація. Шорсткість поверхні. Терміни та визначення : ДСТУ ГОСТ 25142:2009. – [Чинний від 2008-12.08]. – К. : Держспоживстандарт. – 16 с.

73. Документація Зносостійкість виробів. Тертя. зношування та мащення. Терміни та визначення : ДСТУ 2823-94. – [Чинний від 1996-01.01]. – К. : Держспоживстандарт. – 33 с.

74. Wear Behavior of a Borided Nickel-Based Self-Fluxing Thermal Spray Coating / F. Mariani, G. Rêgo, A. Neto [et. al] // Materials Performance and Characterization. – 2016. – Vol. 5, № 4. – P. 414 – 422.

75. Рыжкин А. А. Фазовый состав металломатричных композитов системы «Fe-W-C» формируемых плазменным осаждением / А. А. Рыжктн, А. В. Илясов // Материаловедение. – 2007. – Вып. 33, № 2. – С. 169 – 176.

76. Документація. Закон України «Про охорону праці». – [Чинний від 1992-10-14]. – К. : Верховна Рада України, 1992. – № 49.

77. Документація. Система стандартів безпеки труда Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны : ГОСТ 12.1.005-88. – [Действует от 1988-12-01]. – М. : Государственный стандарт Союза, 1988. – 25 с.

78. Документація. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів : ДСТУ-Н Б А 3.2-1:2007 [Чинний від 2007-01-02]. – К. : Міністерство охорони здоров'я України, 2007. – 11 с.

79. Гандзюк М. П. Основи охорони праці / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський. – К. : Каравела, 2011. – 384 с.

80. Документація. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень: ДСН 3.3.6.042-99. – [Чинний від 1999-12-01]. – К. : Міністерство охорони здоров'я України, 1999. – 16 с.

81. Документація. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень: ДСН 3.3.6.042-99. – [Чинний від 1999-12-01]. – К. : Міністерство охорони здоров'я України, 1999. – 12 с.

82. Документація. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку: ДСН 3.3.6.037-99. – [Чинний від 1999-12-01]. – К. : Міністерство охорони здоров'я України, 1999. – 10 с.

83. Документація. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації: ДСН 3.3.6.039-99. – [Чинний від 1999-12-01]. – К. : Міністерство охорони здоров'я України, 1999. – 11 с.

84. Документація. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : ДНАОП 0.00–1.21–98. – [Чинний від 1998-02-20]. – К. : Державний комітет України по нагляду за охороною праці, 1998. – 20 с.

85. Основи охорони праці / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний та ін. // За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. – К. : Основа, 2006. – 448 с.

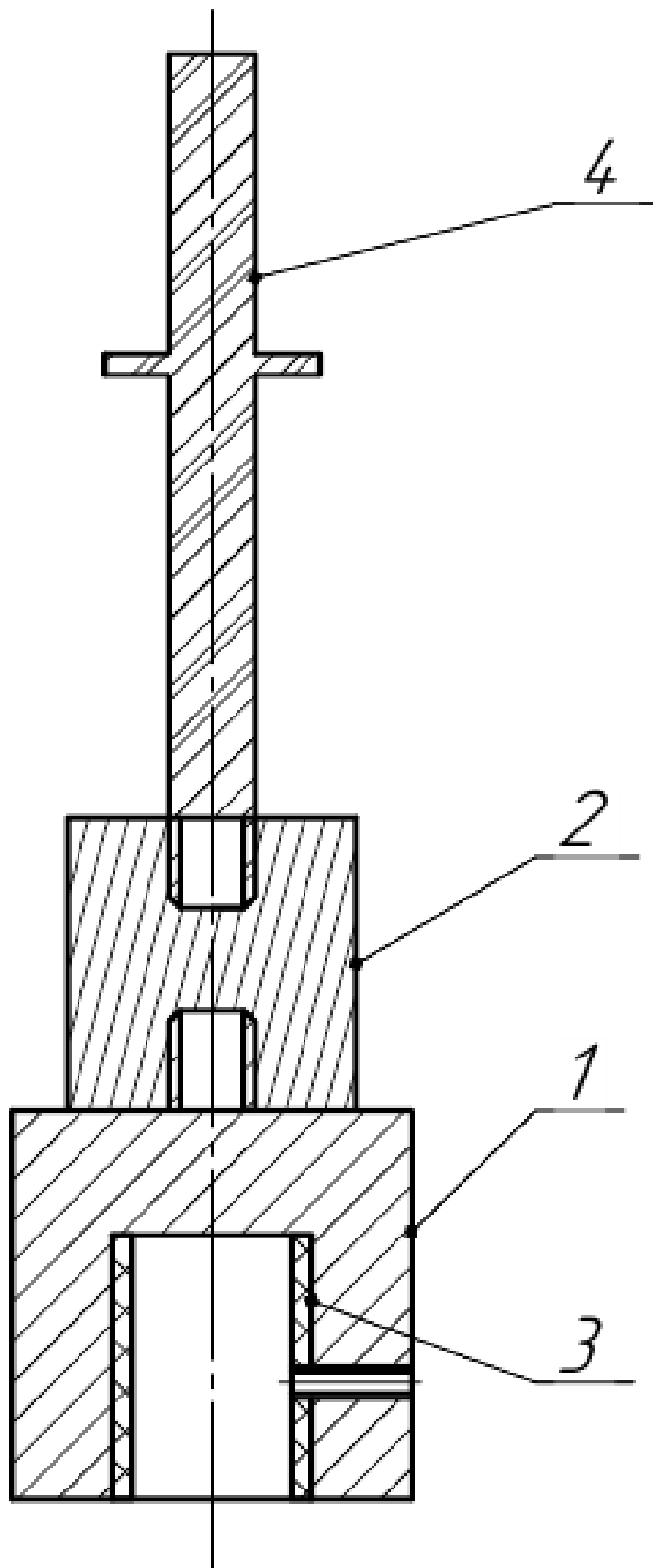
86. Альтшуль А. Д. Гидравлика и аэродинамика / А. Д. Альтшуль, П. Г. Киселев. – М. : Стройиздт. – 1975. – 323 с .

87. Альтман Е. І. Гідрогазодинаміка [Посібник для практичних занять та самостійної роботи студентів] / Е. І. Альтман, І. Л. Большаков, Ю. Д. Кожелупенко. – Одеса, 2008. – 150 с.

88. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – К. : Держстандарт України, 1999. – 16 с.

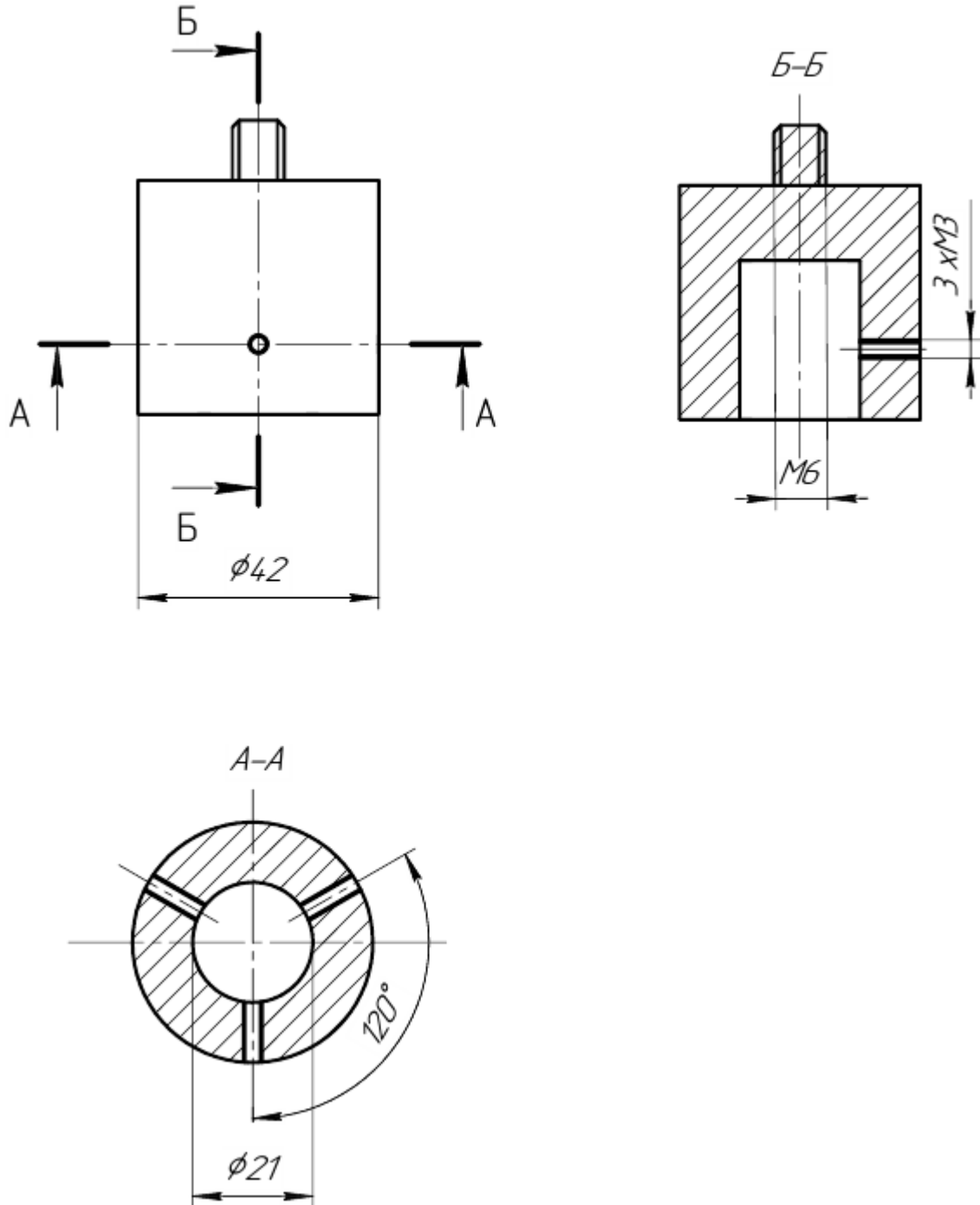
89. Кодекс цивільного захисту України // Відомості Верховної Ради України. – К. : Верховна Рада України, 2013. – № 34. – 1802 с.

ДОДАТОК А



				<b>ФК81мн04</b>					
	Дата	№ докум.№	Підпис-	Дата					
Розроб.	Тесля С.Ю.		<i>[Signature]</i>		Літ.Літ	Арк..	Масштаб-		
Перевір.	Степанчук А. М.		<i>[Signature]</i>			108	2:1		
Реценз.					<b>Збірний кресленник</b>				
Н. Контр.				<b>ІФФ,ФК-81мн</b>					
Затверд.	Степанчук А. М.		<i>[Signature]</i>						

# ДОДАТОК Б



					<b>FK81MN04</b>			
	Дата	№ докум.№	Підпис-	Дата				
Розроб.	Тесля С.Ю.		<i>[Signature]</i>		<b>Головка</b>	Літ.Літ	Арк..	Масштаб-
Перевір.	Степанчук А. М.		<i>[Signature]</i>				109	2:1
Реценз.						<b>ІФФ,ФК-81мн</b>		
Н. Контр.								
Затверд.	Степанчук А. М.		<i>[Signature]</i>					