НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Зварювальний факультет

Кафедра інженерії поверхні

«На правах рукопису»
УДК 621.791.927.5

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ І.В. Смирнов
«7» грудня 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 132 Матеріалознавство

на тему: «Вплив нанопорошку TiC на експлуатаційні характеристики наплавленого шару»

Виконав:
студент ІІ курсу, групи ЗП-71мп
Новіков Ілля Сергійович

Керівник:
Доцент, к.т.н.
Степанов Д.В.

Консультант з охорони праці:
Зав. каф., д.т.н., проф.
Левченко О.Г.

Рецензент:
доц., к.т.н. Чвертко Є.П.

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

Київ – 2018 року

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація викладена на 106 сторінках, в одній частині, містить 33 ілюстрацій, 20 таблиць і перелік посилань, що складається із 49 джерел.

Об’єкт дослідження – дугове наплавлення з введенням нанопорошку карбіду титану до зварювальної ванни.

Предмет дослідження – зносостійкість наплавленого металу в умовах сухого тертя металу по металу.

Мета роботи – провести експериментальне дослідження впливу нанопорошку карбіду титану на зносостійкість наплавленого металу при введені їх у зварювальну ванну в процесі дугового наплавлення для умов сухого тертя металу по металу.

Методи дослідження та апаратура – під час виконання досліджень використовували методи випробування зносостійкості наплавленого металу в умовах сухого тертя металу по металу, вимірювання мікротвердості, оптичної та електронної мікроскопії. Для проведення робіт були використані: оптичний мікроскоп NEOPHOT–32, мікротвердомір ПМТ-3, машина тертя СМЦ-2, обладнання для наплавлення.

Результати роботи та їх новизна – встановлено загальний позитивний вплив об’ємних співвідношень карбіду титану на зносостійкість наплавленого металу в умовах сухого тертя металу по металу при введенні його до зварювальної ванни за допомогою парафінового стрижня.

Ключові слова: *НАПЛАВЛЕННЯ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, МІКРОСТРУКТУРА, МІКРОТВЕРДІСТЬ, НАНОПОРОШКИ, КАРБІД ТИТАНУ, СУХЕ ТЕРТЯ.*

ABSTRACT

Master dissertation presented in 106 pages, in one piece, containing 33 illustrations, 20 tables and a list of references consisting of 49 sources.

Object of investigation – arc surfacing with introduction of nanopowder of titanium carbide into the weld pool.

Subject of investigation – wear resistance of deposited metal under the conditions of dry friction of metal-on-metal.

Purpose of work – experimental research about the impact of nanopowder of titanium carbide on the wear resistance of deposited metal after introducing them to the weld pool during arc surfacing under the condition of dry friction of metal-on-metal.

Methods of research and equipment - during the execution of research used methods of test the wear resistance of deposited metal under conditions of dry friction of metal-on-metal, measuring microhardness, optical and electron microscopy. To conduct works were used: optical microscope NEOPHOT-32, microhardness tester PMT-3, friction machine SMC-2, welding equipment.

The results and their novelty – set an overall positive impact for volume ratios nanopowder of titanium carbide on the wear resistance of the weld metal in the conditions of dry friction metal on the metal witch was injected into a weld bath using a paraffin rod.

Keywords: ARC SURFACING, WEAR RESISTANCE, MICROSTRUCTURE, MICROHARDNESS, NANOPOWDERS, TITANIUM CARBIDE, DRY FRICTION.

ЗМІСТ

ВСТУП 8
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ 9
1.1 Сухе тертя і його фізичний зміст 14
1.2 Узагальнений закон Амонтона 15
1.3 Принципи спокою і руху 19
1.4 Тертя по Пенлеве 23
1.5 Парадокс Пенлеве 25
1.6 Деякі узагальнення 26
1.7 Наплавлення, як спосіб відновлення працездатності деталей машин 28
1.8 Досвід застосування нанодобавок 32
2 ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ 35
2.1 Матеріали для наплавлення 35
2.1.1 Властивості карбіду титану 35
2.1.2 Властивості основного металу 40
2.1.3 Властивості наплавочного дроту та флюсу 41
2.2 Обладнання для наплавлення 44
2.3 Методика визначення зносостійкості наплавленого металу 48
2.4 Дослідження структури металу 58
2.4.1 Травлення для виявлення структури. 58
2.4.2 Документування одержуваної інформації 62
2.4.3 Визначення розміру зерна 63
2.4.4 Метод підрахунку перетинів кордонів зерен 65
2.4.5 Метод вимірювання довжин хорд. 66
3 ОПИС І АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ 68
3.1 Вплив нанопорошку карбіду титану на зносостійкість наплавленого металу в умовах сухого тертя 68
3.2 Вплив нанопорошку на структуру наплавленого металу 72
3.3 Вплив нанокарбідів на мікротвердість наплавленого металу 75
3.4 Аналіз розподілу неметалевих включень в наплавленому шарі 77
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ 86
4.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів 86

4.2 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці 88
4.2.1 Вимоги до технологічного процесу наплавлення 88
4.2.2 Вимоги до системи вентиляції 89
4.2.3 Засоби індивідуального захисту 90
4.2.4 Електробезпека 90
4.3 Розрахунок інженерного рішення 91
4.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях 93
4.4.1 Пожежна безпека 94
4.4.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях 96
5 СТАРТАП-ПРОЕКТ 97
5.1 Маркетинговий аналіз стартап-проекту 97
5.2 Організація стартап-проекту 98
5.3 Фінансово економічний аналіз 99
ВИСНОВКИ 102
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 103

ВСТУП

Важко вказати не тільки якусь машину або механізм, але і взагалі рух твердих тіл на Землі (за винятком польоту і плавання), де сухе тертя не грало б принципової ролі. При цьому сухе тертя не завжди грає шкідливу роль, що перешкоджає руху. Звісно, що деталі, які працюють в умовах тертя із часом зношуються, і тоді постає вибір – замінювати деталь на нову, чи відновлювати зношену.

При відновленні можна використовувати багато різних способів, але при необхідності забезпечити відносно товстий шар та високу міцність з’єднання нанесеного шару з основою – немає кращого методу ніж наплавлення. Також, для покращення характеристик деталі наплавлений шар виготовляють із іншого матеріалу, або іншим чином модифікують поверхню. Електроди та наплавочний дріт, що містять необхідні для такої модифікації речовини, зазвичай мають високу ціну, і їх використання обмежене.

Одним із способів модифікування поверхні є введення порошків у зону наплавлення. Серед перспективних є нанопорошки: оксиди, карбіди, нітриди. Змінюючи розмір частинки, її морфологію, спосіб введення можна отримувати композиційні матеріали із різними властивостями.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ

Основний принцип роботи всіх машин і механізмів, полягає у відносному переміщенні сполучених поверхонь, які супроводжуються тертям і зносом, через це відбувається вихід з ладу вузлів і механізмів. Проблема зносу і тертя є однією з найбільш загальних і важливих, визначаючих, в значній мірі, розвиток і прогрес в області машинобудування і експлуатації техніки.

Тертя є найважливішим видом шкідливого опору; в той же час на дії сил тертя заснований ряд найважливіших технологічних процесів і роботи механізмів: процеси прокатки, дроблення, гальмування автомобіля, зчеплення шини з дорогою, тертя в механізмі зчеплення, ремінні передачі, тощо. Будучи неминучим супутником будь-якого руху, а отже і роботи машини, витрати енергії на тертя іноді досягають дуже великих величин; наприклад, при прокатці близько 50% енергії двигуна витрачається на подолання тертя.

Знос деталей робить вирішальний вплив на довговічність і експлуатаційну надійність вузлів тертя. Збільшення зазору в сполученнях внаслідок зносу часто супроводжується зниженням коефіцієнта корисної дії, виникненням ударних навантажень, збільшенням втрат на тертя і інтенсивності зношування сполучених деталей [1].

Робота, що виконується силами тертя, частково перетворюється в теплоту, частково витрачається на стирання твердих поверхонь, що труться; при цьому з'являються коливання, звук (скрип гальм, свист шин при різкому гальмуванні та інше).

Підвищення температури частин машини завжди небажано і навіть небезпечно, так як перегрів може привести до самозаймання мастила, заїдання і поломок частин машини: з підвищенням температури метали втрачають в більшій чи меншій мірі свою міцність.

Тертя і знос - дуже складне явище фізичного, механічного та хімічного характеру, в даний час ще не достатньо вивчене.

В машинах слід розрізняти два основних види тертя ковзання: тертя сухе і тертя рідинне; та проміжні види тертя ковзання: напівсухе, що є різновидом першого, і напіврідинне - різновидом другого.

При сухому терті неминуче нагрівання взаємодіючих тіл і їх зношування, що складається частково в зриві нерівностей поверхні, частково в деформаціях і інших більш складних явищах молекулярного характеру.

Рідинне тертя має зовсім інший характер: при ньому тверді поверхні, що труться повністю відокремлені одна від одної суцільним шаром мастила (рідини або газу) такої товщини, що навіть найвищі нерівності цих поверхонь не стикаються або майже не стикаються. Тому силами тертя в цьому випадку є головним чином сили опору зсуву всередині самої рідини, що володіє певною в'язкістю, а знос твердих поверхонь теоретично повністю виключений, таким чином, призначення мастила складається в роз'єднанні твердих поверхонь, що труться, в усуненні безпосереднього контакту між ними, який неминуче приведе до зношування. [2].

Напівсухе тертя відбувається при наявності тонкого мастильного шару, коли значна частина нерівностей твердих поверхонь, що труться ще стикаються, деформуються і зрізаються; тому для цього тертя можна вважати дійсними закони Кулона.

Напіврідинне тертя відбувається при недостатній товщині шару мастила, коли стикаються лише деякі, найбільш виступаючі нерівності твердих поверхонь; в цьому випадку можна користуватися з достатнім наближенням законами рідинного тертя. Однак провести чітку межу між напівсухим і напіврідинним тертям неможна, так як обидва відбуваються при неповному змащуванні: в першому випадку - при переважному контакту твердих поверхонь, у другому - при переважному шару мастила, що переривається лише в окремих точках особливо виступаючими нерівностями. Зазвичай напівсухе тертя виходить при малих швидкостях, особливо при пуску машини на початку її руху, а напіврідинне - при неправильному або недостатньому змащенню, в гойдалкових цапфах, а також при неправильній

експлуатації, наприклад при перевантаженні цапфи, тощо. У техніці обидва основні види тертя (сухе і рідинне) зустрічаються досить часто; сухе тертя - в фрикційних і ремінних передачах, в гальмах, при прокатці і дробленні, при русі шини по дорозі та ін.; рідинне тертя - в добре змащуваних цапфах, п'ятах, повзунах, тощо.

Знос деталей машин - явище надзвичайно шкідливе. Знос можна визначити як небажаний результат процесу зношування при наявності тертя. В основному знос полягає в поверхневому руйнуванні твердих тіл під впливом дотичних сил тертя, що супроводжується перенавантаженням поверхневих шарів тіл вище межі текучості або межі міцності, сколювання найдрібніших частинок, пластичними деформаціями та іншими явищами фізичного і хімічного характеру.

Тертя і знос тісно пов'язані між собою. Знос є результат роботи тертя. За твердженням ряду вчених, що працюють в цій галузі, до теперішнього часу загальновизнаного визначення зносу тертям в технічній літературі ще немає. За визначенням проф. М. М. Хрущова, знос деталей машин є небажана поступова зміна їх розмірів в процесі роботи, яка виникає під дією зусиль на їх поверхні, що труться. [3]

В останні роки абразивному зношуванню було приділено багато уваги, оскільки зносостійкість деталей цього виду зносу має істотне значення для продовження терміну служби машин і їх надійності в роботі. Заслуговують на увагу дослідження в області абразивного зношування, проведені к.т.н. М. М. Тененбаум. Викликає безперечний інтерес його точка зору в питанні активної абразивної дії твердих частинок абразиву в контакті деталей, що труться.

Тененбаум вказує, що одна і та ж кількість абразивної речовини в контакті твердих тіл в залежності від різних факторів викликає за обсягом різні руйнування поверхні цих тіл[4]. Наприклад, активність абразивної дії певної кількості зерен кварцового піску в контакті двох тіл залежить багато в чому від характеру взаємодії цих зерен з двома тілами. Якщо абразивне зерно, не руйнуючись, вдавлюється в поверхневий шар деталі, то відбувається начебто

часткова ізоляція зерна в контакті сполучених деталей і їх шаржування. Це шаржування абразивними частинками поверхневих шарів сполучених деталей збільшує знос в порівнянні із зносом деталей в сполученні яких відсутні абразивні частинки.

Як було відзначено під час досліджень[4], найбільший знос відбувається в тому випадку, коли абразивні зерна, що знаходяться в контакті двох сполучених деталей, розкришуються. Енергія, необхідна для подрібнення зерен абразиву, передається через невеликі за площею контактні ділянки поверхневого шару, що викликає руйнування певних обсягів матеріалу деталей. Новостворені частки кварцового абразиву матимуть свою певну геометрію, яка сприятиме високій концентрації контактних напружень в поверхневих шарах деталей, що в свою чергу викликатиме підвищений знос поверхонь.

Інститут будівельної механіки Академії наук Української РСР провів велику роботу по вивченню зносу деталей автомобілів, тракторів і сільськогосподарських машин. В результаті роботи цього інституту проф. Б. І. Костецьким були встановлені принципово різні види зносу деталей, що підкоряються закономірності певного процесу.

Б. І. Костецький дає таку класифікацію видів зносу деталей машин: знос схоплюванням I роду; знос схоплюванням II роду, або тепловий; окислювальний знос; абразивний і осповідний знос[5].

Величина зносу характеризується товщиною стертого шару металу. Розрізняють такі види природного зносу:

- корозійний (під корозією розуміється фізико-хімічний процес руйнування металу під впливом навколишнього середовища);
- осповідний (викришування), переважно при коченні;
- окислювальний;
- тепловий;
- абразивний.

Робота будь-якої машини неминуче супроводжується тертям при відносному русі її частин, тому повністю усунути знос неможливо; величина ж зносу при безпосередньому контакті поверхонь прямо пропорційна роботі сил тертя. Абразивний знос частково викликається дією пилу і бруду, тому дуже важливо утримувати машину в чистоті, особливо її поверхні тертя, важливо також, щоб робота машини була спокійною (відсутні удари).

Таким чином, під зношуванням слід розуміти неминучий і шкідливий процес зміни форми і розмірів частин машин під дією, головним чином, сил тертя і інших тісно пов'язаних з ним факторів. [6].

Більшість деталей машин виходять з ладу саме через знос. Тому зменшення тертя і зносу навіть на 5-10% дасть величезну економію, що має виняткове значення.

Для боротьби із зносом і тертям замінюють одні метали іншими, застосовують термічну і хімічну обробку поверхонь, точну механічну обробку, а також замінюють метали різними замінниками (пластмасами, деревиною спеціальної обробки та ін.), змінюють конструкцію, покращують мастило, тощо.

Основне правило конструювання деталей, що працюють в умовах тертя полягає в тому, що більш дорогий і важко замінний елемент пари, що треться (наприклад вал) виготовляють з більш твердого і більше зносостійкого матеріалу, зазвичай з твердої сталі. А більш прості, дешеві і легко змінювані частини (наприклад вкладиші підшипника) виготовляють з порівняно м'якого матеріалу з невеликим коефіцієнтом тертя, зазвичай з бронзи, бабітів, спеціальних сортів чавуну, тощо.

1.1 Сухе тертя і його фізичний зміст

Основними положеннями закону сухого тертя ковзання є:

1. Сила тертя ковзання на площині прямо пропорційна нормальному тиску в певному діапазоні швидкостей і навантажень.

2. Напрям сили тертя ковзання напрямлений протилежно відносно швидкості тіла, що пересувається.

3. Точне положення точки прикладання сили тертя ковзання невідомо.

4. Тертя залежить від матеріалу і стану поверхонь, що труться.

5. Зі збільшенням швидкості руху сила тертя в більшості випадків зменшується, наближаючись до деякого постійного значення.

6. Із зростанням питомого тиску сила тертя в більшості випадків збільшується.

Закони сухого тертя кочення в першому наближенні були виведені Кулоном.

Основними положеннями цього закону є:

1. Сила тертя кочення прямо пропорційна нормальному тиску і обернено пропорційна радіусу катка

2. Сила тертя кочення спрямована в протилежний бік відносно швидкості тіла.

3. Точне положення точки прикладання сили тертя кочення невідомо.

Закони сухого тертя можна вважати чітко встановленими в разі ковзання твердих тіл[7]. Згідно Амонтону, сила тертя дорівнює:

$$-\mu|N|\frac{v}{|v|}, \quad (1.1.1)$$

де V - швидкість, N - тиск, μ - коефіцієнт тертя. Якщо ж тіло спочатку спочивало, а прикладена сила не перевищує μ|N|, то тіло залишиться в спокої.

Більш загально, тертя може бути анізотропним (тобто залежати від напрямку швидкості). У цьому випадку (1.1.1) замінюється більш загальним виразом:

$$-|N|\frac{\Phi v}{|v|}, \quad (1.1.2)$$

де Ф - оператор тертя – що невід'ємно визначено: $(\Phi v, v) \geq 0$ для всіх V [4]. У загальному випадку оператор Ф, звичайно, залежить ще й від положення ковзного тіла.

Закони сухого тертя при довільному русі твердого тіла (коли присутні кочення і вертіння тіла) ще в повній мірі не встановлені. Є тільки просунутий аналіз тертя вертіння, що знаходиться в якісному поєднанні з експериментом [8].

Вважається, що при описі руху твердих тіл з урахуванням односторонніх зв'язків і сил сухого тертя можливі парадоксальні ситуації, коли відповідне завдання Коші не має рішень. Ці парадокси відкриті Пенлеве і викладені в його книзі [9]. Спроби вирішення парадоксів Пенлеве привели до нових важливих ідей в теорії реалізації зв'язків в механіці. Парадокси Пенлеве пов'язані в тому числі і з неточним використанням законів сухого тертя при описі динаміки систем з багатьма ступенями свободи і неутримуючими зв'язками.

Можна подивитися на закони сухого тертя з більш загальної точки зору лагранжевої механіки. З одного боку, це представляє самостійний інтерес, а з іншого - дозволить уточнити закон Амонтона при описі динаміки твердих тіл з односторонніми зв'язками. При такому підході істотне значення має властивість коваріантності вираження для сили сухого тертя, характерне для рівнянь динаміки в лагранжевому формалізмі.

1.2 Узагальнений закон Амонтона

Нехай $x = (x^1, ..., x^n)$ - узагальнені координати механічної системи, T ($\dot{x}, x, t$) - її кінетична енергія, Q ($\dot{x}, x, t$) - зовнішня (активна) сила, що діє на систему, $f(x) > 0$ - односторонній зв'язок. Всі ці функції вважаються гладкими. Крім того, матриця других похідних

$$A = \left\| \frac{\partial^2 T}{\partial x^i \partial x^j} \right\|, \quad (1.2.1)$$

позитивно визначена, а функція *f* не має критичних точок на гіперповерхні зв'язку {x: *f*(x) = 0}. Сукупність величин (1.2.1) утворює двічі коваріантний тензор - «тензор інерції», який можна розглядати як метричний тензор в точці x в момент часу t.

Вважаючи поверхню $[f(x) = 0]$ «шорсткою», рівняння руху зі множником зв'язку виглядатиме:

$$\left(\frac{dT}{dx} \right) - \frac{dT}{dx} = Q + \lambda \frac{df}{dx} + F \quad (1.2.2)$$

Тут F - сила сухого тертя, яку слід ще визначити. При русі по поверхні до диференціальних рівнянь (1.2.2) слід додати алгебраїчне відношення

$$f(x) = 0 \quad (1.2.3)$$

Більшість авторів включають силу тертя в реакцію зв'язку, вважаючи тим самим зв'язки неідеальними: робота реакцій на можливих переміщеннях системи відмінна від нуля. Але тоді при виведенні рівнянь руху вже не можна використовувати принцип Даламбера-Лагранжа, що справедливий тільки для систем з ідеальними зв'язками. Але якщо зв'язки як і раніше слід вважати «ідеальними» (тобто справедливим принцип Даламбера-Лагранжа), то силу тертя треба віднести до «активних» сил, визначивши їх у відповідності з фізичною природою тертя.

Доданок R = {R_i}, де

$$Ri = \lambda \frac{df}{dx^i}, \quad (1.2.4)$$

- реакція зв'язку. Її величина R дорівнює тиску, який чинить система на зв'язок (1.2.3). Однак ця величина потребує чіткого визначення. Сила (1.2.4) - ковектор, і величина R залежить від вибору метрики в лінійному дотичному просторі в точці x і в момент часу t. Маючи природну метрику (1.2.1), ми можемо припустити

$$\left|R\right|^2 = \lambda^2 \left(\frac{df}{dx}, A^{-1} \frac{df}{dx} \right). \quad (1.2.5)$$

Дужка позначає згортку ковекторів і вектора (або, більш інваріантною мовою, значення ковекторів на векторі). Відзначимо, що компоненти одновалентного тензора

$$A^{-1} \frac{df}{dx}$$

при замінах змінних перетворюються по контрваріантному закону.

Тепер ми можемо визначити закон сухого тертя:

$$F = -\left|R\right| \frac{\Phi x}{\left|x\right|}, \quad (1.2.6)$$

де $\left|x\right|^2 = (Ax, x),$ а $\Phi = \left\| \Phi_{ij} \right\|$ - тензор сухого тертя. Ясно, що набори чисел $\Phi_{ij} x^j$ (По повторюваним індексам передбачається підсумовування) утворюють ковектор; цю умову і повинні задовольняти компоненти сили як ковектора. Тензор Ф, звичайно, може залежати від точки конфігураційного простору x і часу. Таким чином, закон (1.2.6) задає анізотропне сухе тертя. Забігаючи трохи наперед, ізотропне тертя відповідає випадку, коли

$$\Phi = kA, \quad (1.2.7)$$

де k - «наведений» коефіцієнт сухого тертя.

Оператор тертя Ф повинен задовольняти ще дві важливі умови. По перше,

$$(\Phi x, x) \geq 0 \quad (2.8)$$

для всіх швидкостей x (при всіх значеннях x і t). Ця природна властивість відповідає умові розсіювання енергії при додаванні тертя. Нерівність (2.8) еквівалентна умові незаперечності всіх головних діагональних міноров симетричних матриці $\Phi + \Phi^T$ (критерій Сильвестра). Символ «Т» означає транспонування матриці.

По-друге,

$$(\Phi^T A^{-1})\frac{df}{dx} = \rho\frac{df}{dx} \quad (1.2.9)$$

при деякому $\rho \in R$. Ця умова також має виконуватися для всіх x і t. Відношення (1.2.9) свідомо виконано для ізотропного тертя (1.2.7), якщо покласти $\rho = k$.

При виконанні (1.2.9) з системи рівнянь (1.2.2) і (1.2.3) можна однозначно знайти множник Лагранжа як функцію від $\dot{x}, x, t$. Більш того, множник λ не буде залежати від компоненту тензора тертя. Таким чином, не вирішуючи рівнянь руху, ми знаходимо реакцію R як функцію стану системи і часу і тим самим вже остаточно задаємо закон сухого тертя (1.2.6).

Дійсно, при $x \neq 0$ рівняння (1.2.2) можна представити у вигляді

$$A\ddot{x} = X + \lambda\frac{df}{dx} + v\Phi\dot{x} \quad (1.2.10)$$

де X - відома вектор-функція від стану $\dot{x}, x, t$, а v - поки невідомий скалярний коефіцієнт. При русі на зв'язку $\lambda \geq 0$. Отже, згідно з (1.2.5), $v = \lambda\psi,$, де ψ - відомий скалярний множник. З (1.2.10) маємо

$$\ddot{x} = A^{-1}X + \lambda A^{-1}\left(\frac{df}{dx} + \psi\Phi x\right). \quad (1.2.11)$$

З іншого боку, двічі диференціюючи (1.2.3) по t, отримуємо

$$\left(\frac{df}{dx}, \ddot{x}\right) = Z, \quad (1.2.12)$$

де Z - відома функція від $\dot{x}, x, t$.

Підставляючи (1.2.11) в (1.2.12), отримуємо алгебраїчне рівняння щодо множника Лагранжа:

$$\lambda\left(A^1\left[\frac{df}{dx} + \psi\Phi\dot{x}\right], \frac{df}{dx}\right) = Z - \left(\frac{df}{dx}, A^{-1}X\right) \quad (1.2.13)$$

Далі, за умовою:

$$\left(A^{-1}\Phi\dot{x}, \frac{df}{dx} \right) = \left(\Phi^T A^{-1} \frac{df}{dx}, \dot{x} \right) = \rho\left(\frac{df}{dx}, \dot{x} \right) = 0$$

Відповідно до рівняння зв'язку. Залишається зауважити, що

$$\left(A^{-1} \frac{df}{dx}, \frac{df}{dx} \right) > 0$$

зважаючи на позитивній визначеності оператора інерції і припущення про регулярність зв'язку. Згідно (1.2.13), множник Лагранжа λ стає відомою функцією від стану системи і часу. Але тоді однозначно визначається і сила тертя:

$$F = \lambda\psi\Phi\dot{x}, \quad \psi^2 = \frac{\left(\frac{df}{dx}, A^{-1} \frac{df}{dx} \right)}{\left(\dot{x}, A\dot{x} \right)}.$$

1.3 Принципи спокою і руху

Нехай в деякий момент часу t_0 система покоїться ($x = x_0$, $\dot{x} = 0$). В якому випадку вона почне рух при $t > t_0$? Можна сформулювати різні принципи спокою і руху систем з сухим тертям. Оскільки сила сухого тертя має сингулярність при $\dot{x} = 0$, то ці принципи не випливають безпосередньо з рівнянь руху. Їх слід вважати невід'ємною частиною закону Амонтона.

Зазвичай виходять з наступного принципу: сила тертя спокою по величині не перевищує можливі сили тертя того ж напрямку при русі системи. Як приклад розглянемо систему

$$\dot{x} = V, \quad \dot{V} = f - \frac{\Phi v}{|v|}, \quad x, v \in \mathbb{R}^n, \quad (1.3.1)$$

яка описує рух системи в евклідовому просторі з сухим тертям. У рівноважному стані $f = -F$, де F - сила тертя спокою. Можлива сила тертя при русі визначається з рівності

$$\frac{\Phi v}{|v|} = \mu F, \quad v \neq 0,$$

де μ > 0 - деякий матеріальний множник. Звідси

$$v = \mu |v| \Phi^{-1} F.$$

Отже, відповідна сила сухого тертя при русі дорівнює

$$\frac{\Phi v}{|v|} = \frac{F}{\sqrt{(\Phi^{-1}F, \Phi^{-1}F)}}.$$

З огляду на співвідношення F = - *f*, приходимо до наступного твердження: якщо

$$(\Phi^{-1}F, \Phi^{-1}F) \le 1 \quad (1.3.2)$$

то система залишається в спокої, і якщо

$$(\Phi^{-1}F, \Phi^{-1}F) > 1 \quad (1.3.3)$$

то система з сухим тертям приходить в рух. Ці умови встановлено при n = 2.

Нижче формулюється інший принцип спокою і руху, який можна застосовувати для систем загального виду. Перепишемо рівняння (1.2.11) в більш компактному вигляді:

$$\ddot{x} = q + \varphi \frac{\tilde{\Phi}\dot{x}}{|\dot{x}|}, \quad \tilde{\Phi} = A^{-1}\Phi. \quad (1.3.4)$$

Тут й і φ - відомі гладкі функції від $\dot{x}, x, t$. Уявімо рівняння другого порядку (1.3.4) у вигляді системи з 2n диференціальних рівнянь першого порядку

$$\dot{x} = v, \quad \dot{v} = q + \varphi \frac{\tilde{\Phi} v}{|v|} \quad (1.3.5)$$

І перейдемо до нового часу τ, вважаючи

$$d\tau = \frac{dt}{|v|}$$

Тоді система (1.3.5) буде мати наступний вигляд:

$$x' = v|v|, \quad v' = q|v| + \varphi\tilde{\Phi}v. \quad (1.3.6)$$

Її праві частини, очевидно, безперервні і задовольняють умові Ліпшиця. Отже, для системи (1.3.6) справедлива теорема існування і єдиності рішень. Зрозуміло, що кожне з станів

$$x = x_0,\ v = 0 \qquad (1.3.7)$$

буде положенням рівноваги системи (3.6).

Наступний додатковий принцип, що виражає умови спокою і руху при сухому терті: якщо рівновага (1.3.7) системи (1.3.6) стійка по Ляпунову, то розглянута система з сухим тертям буде спочивати, а якщо це рівновага нестійка, то система почне рухатися.

Для ілюстрації цього принципу спочатку розглянемо найпростіший приклад одновимірного ковзання, описуваний диференціальним рівнянням

$$\ddot{x} = f - \frac{\mu \dot{x}}{|\dot{x}|}, \quad x \in \square .$$

Тут f - постійна зовнішня сила, а $\mu > 0$ - коефіцієнт тертя. Система (1.3.6) в цьому завданні має вигляд

$$x' = v|v|, \quad v' = f|v| - \mu v = \begin{cases} -(\mu - f)v, & v > 0, \\ -(\mu + f)v, & v < 0. \end{cases}$$

Якщо $f < \mu$, то рівновага (3.7) стійка: швидкість V експоненціально швидко наближається до нуля, а значить, і координата x також отримує малий приріст. Навпаки, при $f > \mu$ має місце експоненціальна нестійкість, тому цю нерівність висловлює умова початку руху. Якщо $f = \mu$, то рівновага (1.3.7) знову нестійка (правда, не експоненціально). Згідно з цим принципом, при $f = \mu$ система починає рух, хоча зазвичай вважається, що зберігається стан спокою. Втім, ця різниця не має ніякого практичного значення.

Більший інтерес представляє застосування цього принципу до системи (1.3.1) з постійною силою f. Рішення другого рівняння відповідної системи (1.3.6) запишемо так

$$v' = f|v| - \Phi v \quad (1.3.8)$$

у вигляді експоненти

$$v = \xi e^{\lambda\tau}, \quad \xi \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}.$$

Вектор ξ задовольняє наступній нелінійній алгебраїчній системі рівнянь

$$\Phi\xi + \lambda\xi = f|\xi|.$$

I - одиничний оператор. Якщо оператор Φ + λI звернемо, то

$$\eta = (\Phi + \lambda I)^{-1} f,$$

причому «спектральний» параметр λ повинен задовольняти співвідношенню (η, η) = 1.

Якщо виконана умова (1.3.3), то існує позитивне λ і, отже, тривіальне рішення системи (1.3.8) експоненціально нестійке. Для доказу припустимо, що

$$\varsigma(\lambda) = ((\Phi + \lambda I)^{-1} f, (\Phi + \lambda I)^{-1} f).$$

Ця функція, очевидно, неперервна при λ > 0, причому ζ(0) > 1 згідно з умовою (1.3.3). З іншого боку, $\varsigma(\lambda) \to 0$ при $\lambda \to +\infty$. Отже, $\varsigma(\lambda) = 1$ при деякому λ > 0.

Покажемо, що якщо умову (1.3.2) замінити чіткою нерівністю, то система (1.3.1) залишиться в стані спокою відповідно до сформульованого вище принципу. Для цього треба спочатку довести стійкість тривіальної рівноваги системи (1.3.8). Скористаємося функцією Ляпунова

$$W = \frac{1}{2}(\Phi^{-1}v, v).$$

Вона позитивно визначена, а її похідна в силу системи (1.3.8) дорівнює

$$|v|\big[(v,a) - |v|\big], \quad (1.3,9)$$

де a = $\Phi^{-1} f$. Згідно нерівності Коші,

$$(v,a) \le \sqrt{(v,v)}\sqrt{(a,a)}.$$

Отже, функція (1.3.9) не перевищує

$$(v,v)(|a| - 1),$$

що негативно при v ≠ 0 відповідно до нерівності (a, a) < 1. Таким чином,

$$W' \le -\rho(v,v), \quad \rho = 1 - |a| > 0.$$

Отже, за теоремою Ляпунова, рівновага V = 0 системи (1.3.8) асимптотично стійка. Більш того, функція $\tau \to v(\tau)$ експоненціально швидко прямує до нуля при $\tau \to +\infty$. Оскільки $x' = v|v|$, то при обуренні система мало відхиляється від свого початкового положення.

1.4 Тертя по Пенлеве

Проаналізуємо умову (1.2.9). Для цього перепишемо рівняння руху у вигляді (1.2.11):

$$\ddot{x} = A^{-1}X + \lambda A^{-1}\frac{df}{dx} + vA^{-1}\Phi\dot{x}.$$

Тут λ і *v* - скалярні функції. Якщо Q - сила (ковектор), то $A^{-1}Q$ буде вже вектором. Його умовно можна назвати силою-вектором.

Умова (1.2.9) полягає в тому, що сила-вектор сухого тертя (1.2.6) лежить (як і вектор швидкості x) в дотичній площині до поверхні зв'язку $\{f = 0\}$.

Дійсно,

$$\left(\frac{df}{dx}, A^{-1}\Phi\dot{x}\right) = \left(\Phi^T A^{-1}\frac{df}{dx}, \dot{x}\right) = 0$$

для всіх x з дотичній площині

$$\left(\frac{df}{dx}, \dot{x}\right) = 0$$

тоді і тільки тоді, коли виконано (1.2.9).

До умови (1.2.9) можна підійти по-іншому, узагальнюючи визначення сили тертя, дане Пенлеве для випадку, коли конфігураційний простір є евклідовим простором [9]. З цією метою введемо в фіксований момент часу і в даному положенні лінійний простір можливих переміщень (швидкостей) $\xi \in \mathbb{R}^n$, які відповідають умові

$$\left(\frac{df}{dx}, \xi\right) = 0 \quad (1.4.1)$$

Нехай Λ - сума сили реакції і невідомої поки сили тертя. Розглянемо її роботу на можливих переміщеннях: (Λ, ξ). Цей лінійний функціонал на просторі всіх можливих переміщень (1.4.1) не визначає однозначно силу Λ. Дійсно

$$\Lambda' = \Lambda + \rho\frac{df}{dx}, \quad \rho \in \square . \quad (1.4.2)$$

Серед сил (4.2) знайдемо мінімальну за величиною. Іншими словами, знайдемо точку мінімуму квадратичної форми ($A^{-1}\Lambda'$, Λ') / 2:

$$\frac{d}{d\rho}\frac{1}{2}(A^{-1}(\Lambda + \rho\eta), (\Lambda + \rho\eta)) = 0 \quad \eta = \frac{df}{dx}.$$

Звідси

$$(A^{-1}\Lambda, \eta) + \rho(A^{-1}\eta, \eta) = 0,$$

І, отже,

$$\rho = -\frac{(A^{-1}\Lambda, \eta)}{(A^{-1}\eta, \eta)}.$$

Отже,

$$F = \Lambda - \frac{(A^{-1}\Lambda, \eta)}{(A^{-1}\eta, \eta)}\eta \quad (1.4.3)$$

- сила тертя по Пенлеве.

Ця сила задовольняє умові (1.2.9). Дійсно, вектор $A^{-1}F$ є можливим переміщенням системи, що відразу ж випливає з (4.3): ($A^{-1}F$, η) = 0. Для сили сухого тертя (1.2.6) ця рівність набуває вигляду ($A^{-1}\Phi x$, η) = 0 для всіх можливих швидкостей x або, що те ж саме,

$$(\Phi^T A^{-1}\eta, \dot{x}) = 0.$$

Ця рівність разом з умовою (η, x), звичайно, еквівалентна умові (1.2.9).

1.5 Парадокс Пенлеве

Написане вище дозволяє прояснити деякі принципові моменти, пов'язані з відомим парадоксом сухого тертя, зазначеним вперше Пенлеве [9]. Розглянемо класичний приклад - рух двох матеріальних точок з масами m_1 і m_2, з'єднаних невагомим твердим стрижнем довжини l, що спирається одним кінцем на горизонтальну шорстку вісь. Спочатку ми маємо систему з трьома ступенями свободи; в якості узагальнених координат візьмемо декартові координати x, y маси m_1 і кут ϑ, утворений відрізком з горизонтальною віссю. Одностороння зв'язок задається нерівністю $f = y > 0$.

Будемо розглядати рух системи з урахуванням зв'язку y = 0 в надлишкових координатах x, ϑ, y. Матриця оператора інерції в цих координатах має вигляд

$$A = \begin{pmatrix} m_1 + m_2 & -m_2 l \sin\vartheta & 0 \\ -m_2 l \sin\vartheta & m_2 l^2 & m_2 l \cos\vartheta \\ 0 & m_2 l \cos\vartheta & m_1 + m_2 \end{pmatrix}.$$

Вона, звичайно, позитивно визначена, але її елементи залежать від положення системи.

Пенлеве розглядає випадок, коли сухе тертя виникає лише в точці контакту (в точці з масою m_1): він описується законом Амонтона з урахуванням тиску стержня на горизонтальну вісь. Тоді оператор тертя має діагональний вигляд: $\Phi = \mathrm{diag}(\chi, 0, 0)$. Але, як легко перевірити, при $\chi \neq 0$ співвідношення (1.2.9) не виконується. Отже, таку взаємодія стержня і горизонтальної осі не можна назвати тертям по Пенлеве. Цей факт також випливає з формули для тиску стержня на вісь, в яку явно входить величина коефіцієнта тертя. Нагадаємо, що для тертя по Пенлеве нормальна реакція не залежить від конкретного виду закону тертя [9]. Тому парадокс Пенлеве, що виникає в ході аналізу рівнянь руху з одностороннім зв'язком, обумовлений порушенням умови (1.2.9): при досить великих значеннях коефіцієнта тертя

тиск стержня на вісь визначено не для всіх положень стержня (через наявність сингулярностей).

У розглянутій вище умові (1.2.9) виконується лише в тих випадках, коли сухе тертя описується оператором

$$\Phi = A\Omega^T, \quad (1.5.1)$$

причому останній стовпець матриці Ω має вигляд

$$(0,0,v)^T. \quad (1.5.2)$$

При цій умові рух системи з анізотропним сухим тертям однозначно і коректно визначено на всій осі часу. Зокрема, сила тертя залежить від нахилу стрижня, а також залежить не тільки від лінійної швидкості x, але і від кутової швидкості відрізка P.

Відзначимо, що умови (1.5.1) і (1.5.2) свідомо виконані для ізотропного тертя (1.2.7). В цьому випадку матриця Ω має діагональний вигляд з рівними елементами по діагоналі.

1.6 Деякі узагальнення

Описаний підхід до теорії сухого тертя просто узагальнюється на випадок, коли на систему накладено кілька зв'язків. Нехай вони представляються рівняннями

$$f_1(x) = 0, \quad ..., \quad f_p(x) = 0; \quad p < n. \quad (7.1)$$

Ці рівняння передбачаються незалежними: в кожній точці конфігураційного простору {x} ковектори

$$\frac{df_1}{dx}, \quad ..., \quad \frac{df_p}{dx} \quad (1.6.2)$$

лінійно незалежні. Як і в разі одного зв'язку (p = 1), узагальнені координати x_1, ..., x_n будуть надмірними.

І в цьому більш загальному випадку закон сухого тертя Амонтона має той же вигляд (1.2.6). При цьому реакція R обчислюється з урахуванням

декількох зв'язків (1.6.1). Як і при p = 1, формула R як вектор-функції стану системи обчислюється без урахування тертя.

Оператор анізотропного тертя Ф знову повинен задовольняти двом умовам. По перше,

$$(\Phi\dot{x},\dot{x}) \geq 0$$

для всіх можливих швидкостей X, задовольняють рівнянням зв'язків

$$\left(\frac{df_1}{dx},\dot{x}\right) = \ldots = \left(\frac{df_p}{dx},\dot{x}\right) = 0. \quad (1.6.3)$$

По-друге,

$$(\Phi^T A^{-1})\frac{df_i}{dx} = \sum \lambda_{ij}\frac{df_i}{dx} \quad (1.6.4)$$

для всіх $1 < i < p$ і деяких $\lambda_{ij} \in \square$. Ця умова узагальнює умова (2.9) при p = 1. Іншими словами, лінійний простір розмірності *p*, утворений лінійними комбінаціями ковекторів (1.6.2), має бути інваріантним підпростором лінійного оператора $\Phi^T A^{-1}$. Умова (1.6.4) разом з умовою позитивної визначеності оператора інерції A гарантує, що множники Лагранжа $\lambda_1, \ldots, \lambda_p$ можна однозначно визначити як функції стану системи. Зокрема, реакція зв'язків

$$R = \sum_{i=1}^{p} \lambda_i \frac{df}{dx_i}$$

не залежить від тензора тертя Ф. Відзначимо, що умова (1.6.3) свідомо виконується в разі анізотропного тертя (1.2.7).

Є ще одна можливість узагальнення, що носить відносно формальний характер. Йдеться про заміну внутрішньої метрики, в якій обчислюються величини $|R|$ та $|\dot{x}|$ у формулі (1.2.6), на якусь іншу ріманову метрику. При такому узагальненні виникають нові параметри, що підлягають визначенню при вирішенні задачі ідентифікації. Мабуть, таке узагальнення насправді не

вносить нічого принципово нового в закон сухого тертя Амонтона для загальних лагранжевих систем.

Нарешті, вся ця теорія легко поширюється на випадок, коли зв'язки залежать від часу: $f_j(x,t)=0.$ Тільки відповідні формули виглядають більш громіздко. Віртуальні переміщення як і раніше задовольняють рівняння (1.4.1), а рівняння для дійсних швидкостей (1.6.3) ускладняється:

$$\frac{df_j}{dt}+\left(\frac{df_j}{dx},\dot{x}\right)=0;\quad 1\le j\le p.$$

У своїх лекціях Фейнман описував досвід [13], який доводить, що коефіцієнт тертя не залежить від ваги прикладеної до бруска, і відзначав, що брусок ковзав нерівномірно, із зупинками - на одному місці застрягне, на іншому зірветься вперед. Така поведінка є ознака того, що коефіцієнт тертя тільки грубо можна вважати постійним: він змінюється від місця до місця. Настільки ж невпевнена поведінка спостерігалася і при зміні навантаження бруска. Відмінності тертя виникають від різної гладкості або твердості частин поверхні, від бруду, іржі та інших сторонніх впливів. Таблиці, в яких перераховані коефіцієнти тертя "сталі по сталі", "міді по міді" та інше, все це суцільне обдурювання, бо в них цими дрібницями нехтують, але ж вони-то і визначають значення коефіцієнта тертя. Тертя "міді про мідь" та інше. - це насправді тертя "про забруднення, що пристали до міді"

Ближче до наших днів все частіше вчені звертають увагу, що зміст тертя на нанорівні ще не розкрито, виходять нові статті і нові ідеї. Це в свою чергу вказує на те, що проблема тертя хоч і вивчається вже більше 500 років (перші праці по тертю належать до Леонардо да Вінчі, 1493р) і все ж залишилося ще багато загадок, які належить відкрити.

1.7 Наплавлення, як спосіб відновлення працездатності деталей машин

Проблема підвищення надійності і довговічності машин, обладнання та приладів є найважливішою на сучасному етапі розвитку техніки. Її вирішення нерозривно пов'язане зі збільшенням зносостійкості рухливих контактуючих пар, а також з підвищенням конструкційної міцності елементів конструкцій, що працюють в різноманітних умовах експлуатації [14].

Способів відновлення існує досить багато, їх переваги та недоліки описувати не має сенсу. В даній роботі буде використано наплавлення під шаром флюсу, як спосіб відновлення, і наведемо тільки його переваги і недоліки.

Наплавлення – це нанесення шару металу на поверхню заготовки або виробу за допомогою зварювання плавленням.

Відновлювальне наплавлення (наварювання) використовується для відновлення початкових розмірів спрацьованих або пошкоджених деталей. У цьому разі наплавлений метал за складом і властивостями може бути близьким до основного (відновлювальне розмірне наплавлення) або відрізнятися від цих (відновлювальне зносостійке наплавлення).

Способи наплавлення класифікуються за трьома ознаками – фізичними, технічними, технологічними. Найбільш поширена та зручна класифікація за фізичними ознаками (використане джерело нагрівання). За цими ознаками основні способи наплавлення та наварювання можна поділити на три групи:

1. Термічні (електродугове, електрошлакове, плазмове, електронно-променеве, лазерне (світлове), індукційне тощо)
2. Термомеханічні (контактне, прокаткою, екструдуванням)
3. Механічні (вибухом, тертям)

Більшість із цих способів можуть поділятися за технічними (спосіб захисту зони наплавлення, ступінь механізації процесу, безперервність наплавлення) та технологічними (за родом струму, кількістю електродів, наявністю зовнішнього впливу тощо) ознаками.

Під час напівавтоматичного та автоматичного дугового наплавлення, механізованого під флюсом одним дротом (суцільним чи порошковим) або

стрічкою, легування наплавленого металу виконується, як правило, крізь електродний метал, легуючі флюси застосовують рідко [15].

Що стосується виду струму, використовуваного при наплавленні під шаром флюсу, то найчастіше застосовується струм зі зворотною полярністю - плюс від джерела електричного струму подається на зварювальну дріт, а мінус - на поверхню виробу. Для того, щоб ще більше підвищити продуктивність цього методу, часто використовують стрічкові електроди або подачу одразу двох дротів в зону наплавлення за допомогою двох напівавтоматичних пристроїв.

Переваги наплавлення під шаром флюсу.

Дугове наплавлення під флюсом займає лідируючі позиції серед всіх видів наплавлення металу. До основних переваг наплавлення під шаром флюсу можна віднести:

1. Високу продуктивність праці. Особливо проявляється в тих випадках, коли проводиться наплавлення на велику площу поверхні виробу, що має досить просту форму;
2. Невисоку складність процесу. Наплавлення під шаром флюсу не вимагає високої кваліфікації від зварника, тому для її виробництва не потрібно шукати фахівця, що володіє великим досвідом саме в цьому спектрі зварювальних робіт;
3. Висока якість роботи. При застосуванні наплавлення під шаром флюсу зовнішній вигляд валика з наплавленого металу має відмінні естетичні характеристики, що має велике значення для зовнішнього вигляду всієї деталі. Крім того, одержуваний в результаті наплавлення валик має високу міцність і надійність, і чудово проявляє себе в ході подальшої експлуатації виробу;
4. Високу безпеку роботи зварника. Схована зварювальна дуга під шаром флюсу дозволяє уникнути розбризкування розплавленого металу, що значно підвищує безпеку робочого, запобігаючи можливості отримання опіків.

Недоліки наплавлення під шаром флюсу.

Разом з незаперечними перевагами наплавлення металу під шаром флюсу має і певні недоліки. І основними мінусами цього виду наплавлення можна вважати:

1. високу вартість обладнання. Як правило, обладнання, що застосовується в ході наплавлення під шаром флюсу, коштує набагато дорожче, ніж обладнання для ручного дугового наплавлення із застосуванням стрижневих електродів з покриттям;
2. велику зону нагрівання, через що цей вид наплавлення не може бути застосований в тих випадках, коли потрібно відновити дрібні вироби, особливо, в тому випадку, якщо ці вироби мають досить складну форму;

І все ж, незважаючи на всі недоліки, наплавлення металу під шаром флюсу продовжує залишатися найпоширенішим способом наплавлення, так як дозволяє істотно економити ресурси - і не тільки сам метал, а й енергетичні ресурси підприємства, що, в свою чергу, призводить до зниження вартості одержуваних в результаті застосування цього способу наплавлення виробів.

Для вибору матеріалів, що використовуються найчастіше проаналізуємо статтю, яка була написана к.т.н І.І. Рябцевим [16]. Відшукаємо сплави, які використовують в різних видах зношення. Аналіз показав, що найчастіше використовують сплави на основі заліза, і їх властивості показані у таблиці 1.7.1.

Табл. 1.7.1 – Хімічний склад сталей, що застосовуються найчастіше.

№Сплаву	Масова частка елементів, %						
	C	Cr	Ni	Mn	Mo	W	V
1	<0,4	<3,5	-	0,5…3,0	<1	<1	<1
2	0,4…1,2	<7,0	<1	0,5…3,0	<1	<1	<1
3	0,2…0,5	1…8	<5	<3	<4,5	<10	<1,5

Характерними особливостями 1 та 2 сплавів є ударна стійкість, а сплав 3 добре проявляє властивості збереження ріжучої кромки. Також в статті приведені термічні та механічні властивості цих сплавів, вони наведені в табл.

Табл. 1.7.2 – Механічні властивості сталей, що застосовуються найчастіше.

№Сплаву	Властивості						
	Механічні		Термічні		Корозійна стійкість	Тріщино-стійкість	Оброблюваність
	Опір тертю	Опір ударам	Опір високим темп.	Опір терм. ударам			
1	1 або 2	2 або 3	1	1	1	4	4
2	1 або 2	3	1	1	1	3	2
3	2	3	3	3	2	3	3

*Чим вище цифра, тим краще проявляє цю властивість сплав, де 1 – дуже погано, 4 – дуже добре.

Мікроструктура цих сплавів також відрізняється. Сплавам 1 більш притаманні ферито-мартенситні структури, сплаву 2 мартенситні, а сплаву 3 мартенситні із вкрапленнями карбідів.

Звісно, існують матеріали властивості яких набагато кращі, ніж представлені у таблиці вище. Але враховуючі їх рідкість та ціну виробники відмовляються від використання таких матеріалів, і постійне відновлення дешевих варіантів вважається більш рентабельним. Отже залишається тільки вдаватись до технологічних прийомів, щоб покращити властивості поверхневого шару.

1.8 Досвід застосування нанодобавок

Одним із способів підвищення зносостійкості металу при різних видах зношення є подрібнення структурних складових наплавленого металу. Такі зміни у металі спричиняють речовини, які називаються модифікаторами. Вони впливають на умови кристалізації та розмір первинної структури металу [17].

Такі зміни у металі можуть викликати і звичайні легувальні компоненти, але модифікатори відрізняються тим, що такі зміни викликають при введенні у відносно малих пропорціях [18].

З кожним роком використання нанотехнологій, та взагалі робота із частинками нанорозмірного діапазону (до 100 нм.) стає все більш доступною. Такі роботи вже відомі у великій металургії, порошковій металургії, литті та інших напрямах [19–22].

В роботі [23] було представлено вплив нанодисперсних часток карбіду вольфраму та нікелю на структуру і властивості наплавленого металу. Їх вводили до складу покриття електродів, якими проводили наплавлення. Ці частинки частково оплавляючись на границі високотемпературної дуги потрапляють у зварювальну ванну, і в результаті отриманий метал краще проявляв себе на ударну в'язкість та твердість.

В роботі [24] вивчали вплив наночасток карбонітриду титану при електрошлаковому зварюванні. Такий порошок вводився в середину трубчастого електроду, який подавався в зону зварювання як додатковий електрод. Це спричиняло подрібнення зерен в структурі і покращення властивостей шва.

В роботі [25] наночастинки вводили до зони зварювання в складі покриття плавкого електроду у середовищі захисного газу. Наносили частинки на електрод за допомогою електролітів, з нанопорошком міді. Спостерігалося покращення властивостей зварного шва, а в процесі зварювання були покращені властивості дуги і підвищена продуктивність зварювання.

В роботі [26] було проведено порівняння деяких способів введення нанопорошку карбіду вольфраму, модифікація поверхні відбувалася у кожному з них, але з різними показниками. Як було помічено, найбільш ефективним методом було розміщення гранул у тонкому поверхневому шарі покриття електрода.

На сьогодні вплив нанопорошків на наплавлений метал вивчений дуже погано, і одним із порошків, вплив якого невідомий – карбід титану. В роботі

[26] вивчали карбіди (карбід вольфраму), вводили його через електрод, в роботі [27] вивчали вплив карбіду титану у якості інокулятора для лазерного зварювання, на сьогодні більш детальної інформації немає. Аналіз літературних даних вказує на те, що розробка методики наплавлення із застосуванням нанорозмірних карбідів і їх застосування може бути перспективним і потребує додаткового вивчення.

2 ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали для наплавлення

2.1.1 Властивості карбіду титану

Як об’єкт дослідження було обрано карбід титану.

Більше 80% карбіду титану в виробничих умовах отримують з діоксиду титану (в основному в зв'язку з порівняно низькою вартістю). Протягом 30 останніх років вуглетермічний метод залишається домінуючим у виробництві карбіду титану. Відпрацьована технологія, стандартне і недороге обладнання, порівняно дешева сировина - головні причини цього. У промисловому вітчизняному виробництві зазвичай використовується діоксид титану таких складів,%:

1. 1.99,8 TiO_2; 0,06 S; 0,5 P;

2. 98,8 TiO »; 0,1 SiO_2; 0,05 Fe; 0,1 S; 0,1 P (ТУБ-10-1394-78).

Суміш, що складається з 68,5% TiO_2 і 31,5% сажі, піддається тривалому і ретельному перемішуванню в рідкому середовищі. Для зниження часу приготування суміші в чотири рази рекомендується проводити процес в вакуумі. Суміш TiO_2 з сажею набивається в графітовий патрон або пресується під тиском $1,5 \cdot 10^7$ Па в брикети, які завантажуються в графітові човники або тиглі. Карбідізація суміші проводиться в атмосфері водню в вугільно-трубчастих печах опору; у власній захисній атмосфері в вертикальних або вакуумних садочних печах. У вугільно-трубчастих печах графітові човники безперервно просуваються в печі, температура якої 2000° С. Подрібнений і просіяний карбід титану містить 20…20,5% загального вуглецю, з яких 1,0…2,0% знаходиться у вигляді вільного вуглецю. При вакуумній карбідізації реакція утворення TiC починається вже при 800° С і швидко протікає при 1200…1400° С. Остаточна витримка тривалістю 0,5 год проводиться при 1900…1950° С. Карбід титану після подрібнення і просіювання містить 19,5…20,3% загального та 0,1…0,8% вільного вуглецю [28].

Але такий спосіб отримання карбіду титану ($TiO_2 \rightarrow Ti_2O_3 \rightarrow TiO \rightarrow TiC$) хоч і найпоширеніший, продуктивність такого методу дуже мала, через сильне газовиділення в процесі відновлення TiO_2, а також на остання стадя ($TiO \rightarrow TiC$) ускладнена утворенням неперервного ряду твердих розчинів [29]. Далі приведені декілька способів отримання нанорозмірного карбіду титану, грануляцією 40…60 нм.

В роботі [30] запропонований спосіб отримання карбіду титану за технологією саморозповсюждуючогося високотемпературного синтезу з фільтрацією газів (СВС - ФГ). Для СВС змішуються порошкоподібні реагенти: Ті (приблизно 100 мкм) і вуглець (сажа): з отриманої суміші пресується таблетка пористістю не менше 30%. Горіння ініціюється вольфрамовим дротом при пропущенні через нього електричного струму. Вихідні реагенти, проміжні і кінцеві продукти реакції знаходяться в конденсованому стані. СВС-процес характеризується високою (1500…4000° С) температурою, великою (0.5…15 см/с) швидкістю поширення фронту горіння. Великі швидкості горіння забезпечують високу продуктивність процесу, але використання дорогого титанового порошку і апаратурне забезпечення робить процес витратним.

У роботі [31] описаний спосіб отримання карбіду титану шляхом взаємодії титанових порошків з сажистим вуглецем. Вихідну суміш попередньо витримують у вакуумі при температурі 200…400° С протягом 60…120 хв. Після цього її безперервно подають у реакційну зону апарату при температурі 885…1000° С. Завдяки такому рішенню відпадає необхідність у складній апаратурі і виключається виділення реакційних газів, що дозволяє збільшити продуктивність в 2…3 рази і знизити вартість одержуваного карбіду на 25…30%.

В роботі [32] запропонований спосіб виготовлення порошків карбіду титану, що включає отримання спочатку частинок оксидного з'єднання титану з адсорбованим на їх поверхні аморфним вуглецем і подальшим карботермічним відновленням. Для цього в водний розчин сірчанокислотного

титану додають ацетиленову сажу при співвідношенні Ti^{+4}: $C_{сажа}$ не менше ніж 1: 0,5, потім при безперервному активному помішуванні додають зі швидкістю $1{,}6 \cdot 10^{-8} \ldots 3{,}3 \cdot 10^{-8}$ $м^3/с$ водний розчин аміаку, відстоюють пульпу Відстоюють протягом 10…20 хв. декантирують розчин, фільтрують осад, промивають водою і сушать при температурі 200…220° С. Спосіб дозволяє отримати порошки карбіду титану з контрольованим вмістом вуглецю.

У роботі [33] описаний спосіб отримання карбіду титану, в якому процес проводять при безперервної подачі вихідної шихти, що складається з порошків титану і сажистого вуглецю, в герметичний реактор, нагрітий до температури 1000…1050° С. При цьому співвідношення обсягу порції шихти і обсягу реактора становить 1: (250…500). Спосіб дозволяє збільшити продуктивність в 3 - 4 рази, підвищити вихід придатного матеріалу.

У роботі [34] запропонований СВС-спосіб отримання карбіду титану, що включає локальне запалення і високотемпературну взаємодію в режимі горіння суміші порошків титану і вуглецю, оточеною оболонкою з пористого матеріалу. З метою підвищення виходу карбіду титану і поліпшення його абразивних властивостей як пористий матеріал використовують кварцовий пісок, а локальному запаленню піддають ініціюючу шихту з порошків титану і вуглецю, що має швидкість горіння, в 1,5…2 рази більшу за швидкість горіння основної суміші порошків, яку поміщають в центр вихідної основної суміші. Процес взаємодії в режимі горіння здійснюють під тиском.

Більш висока вартість карбідосталей в порівнянні зі звичайними сталями не грає великої ролі, якщо сплави TiC - сталь застосовуються у вигляді армуючих вставок, секторів, облицювань. При оцінці економічної доцільності виготовлення деталей з карбідосталей слід враховувати наступні фактори:

1. Вартість порошків карбіду титану і сталевої зв'язки;
2. Вартість і технологічність процесу отримання карбідосталей і виробів з них;
3. Підвищення експлуатаційних властивостей, яке досягається за рахунок застосування карбідосталі.

У разі, коли використання карбідосталі проблематичне з економічних міркувань, доцільно застосовувати цей матеріал для нанесення покриттів на сталі різних класів. Незважаючи на досить широке коло застосування карбідосталі, безсумнівно, що цей матеріал далеко не вичерпав себе і в майбутньому масштаби його використання зростуть.

Покриття з карбіду титану з початку 60-х років широкого поширення набули зносостійкі матеріали з нанесеними на них покриттями. Покриття знайшли застосування в аерокосмічній промисловості, атомній енергетиці, автомобілебудуванні, при виготовленні інструментальних матеріалів. Використання покриттів дозволяє збільшити в кілька разів термін служби виробів, заощадити дорогі і дефіцитні матеріали. Карбід титану є одним з найбільш ефективних матеріалів, використовуваних в якості зносостійкого, це пов'язано перш за все з тим, що TiC в найбільшій мірі задовольняє вимогам, що пред'являються до покриттів: високі зносостійкість і твердість при високих і низьких температурах; хороша хімічна стабільність; невеликий коефіцієнт тертя, хороше зчеплення з поверхнею матеріалу - основи; окалиностійкість; мала схильність до схоплювання і холодного зварювання; здатність не руйнуватися під впливом механічних і теплових навантажень. В даний час є ціла гама методів нанесення покриття, причому число нових способів безперервно збільшується [35].

Хімічні властивості

З’єднання типу TiCx (x = 0,49…1,00), що представляє собою фазу впровадження з широкою областю гомогенності; сірі кристали з кубічними гратами типу NaCl (a = 0,430…0,433 нм, просторова група Fm3m);

$T_{пл}$ = 3257 ° C;

Щільність – $4{,}85 \cdot 10^3$ кг/м3;

$C^o\rho$ = 34,23 Дж / (Дмоль · К);

$\Delta H^o_{обр}$ = 209 кДж / моль;

S^o_{298} = 24,7 Дж / (моль · К);

Температурний коефіцієнт лінійного розширення – $8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$;

Електричний опір $R = 2 \cdot 10^{-6}$ Ом·м;

Теплопровідність – 0,068 Вт / (см · К);

Модуль пружності – $4{,}94 \cdot 10^5$ Па;

мікротвердість ~ $3 \cdot 10^4$ Па;

$S_{зг}$ ~ 600 МПа.

Титана карбід стійкий до дії соляної, сірчаної, фосфорної кислот і лугів, розчиняється в царській горілці і суміші азотної і фтористоводневої кислот. Інтенсивно окислюється на повітрі вище 1000 ° С. При високих температурах з N_2 утворює тверді розчини-карбонітриди Ті, з галогенами-галогенідами Ті [36].

Введення нанокомпоненту в зону наплавлення відбувалося за допомогою парафінового стрижня, зображення якого є на рисунку 2.1.1: парафін розтоплювався, змішувався з нанопорошком у заданій пропорції, перемішувався та застигав. Перед наплавленням стрижнем була змащена зона наплавлення.

Рисунок 2.1.1 – Парафіновий стрижень з нанопорошком і пристрій для його виготовлення.

Для проведення випробувань було виготовлено 9 зразків: 1 зразок без введення нанокомпонентів, 4 зразки із введенням нанопорошку аеросилу SiO_2 та 4 зразки із нанопорошком карбіду титана TiC. Для кожного із зразків було

виготовлено окремий стрижень із заданою кількістю нанопорошку, що показано в таблиці 2.1.1.

Табл. 2.1.1 – Відсоток нанопорошку у стрижні

Зразок 1	Контрольний, без добавок	
Зразок 2	0,5% TiC	99,5% Парафін
Зразок 3	1% TiC	99% Парафін
Зразок 4	5% TiC	95% Парафін
Зразок 5	10% TiC	90% Парафін
Зразок 6	1% SiO_2	99% Парафін
Зразок 7	5% SiO_2	95% Парафін
Зразок 8	7% SiO_2	93% Парафін
Зразок 9	10% SiO_2	90% Парафін

2.1.2 Властивості основного металу

В якості основи для наплавлення було обрано металевий лист із конструкційної низьколегованої сталі 09Г2С. Сталь 09Г2С широко використовується при виготовленні труб і іншого металопрокату. Вид постачання згідно ГОСТ 19903-74. Закордонні аналоги: Німеччина – 13Mn6, 9MnSi5, Японія – SB49, Китай – 12Mn, Болгарія – 09G2S, Угорщина – VH2, Румунія – 9SiMn16. В таблиці 2.1.2.1 приведений хімічний склад сталі.

Табл. 2.1.2.1 – Хімічний склад сталі 09Г2С

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As	Fe
До 0,12	0,5…0,8	1,3…1,7	До 0,3	До 0,04	До 0,035	До 0,3	До 0,008	До 0,3	До 0,08	~96…97

Властивості сталі 09Г2С:

Щільність – $7{,}85 \cdot 10^3$ кг/м3;

Температура критичних точок $Ac_1 = 725$, $Ac_3(Ac_m) = 860$, $Ar_3(Arc_m) = 780$, $Ar_1 = 625$;

Зварюваність: без обмежень;

Флокеночутливість відсутня;

Схильність до відпускної хрупкості відсутня;

Оброблюваність різанням: δ_B=520 МПа, $K_{U\ б.ст}$ =1 $K_{U\ тв.\ спл}$ = 1,6

Межа текучості $Б_{0,2}$ При різних температурах (згідно ГОСТ 5520-79) 250° С = 225 МПа, 300° С = 195 МПа, 350° С = 175 МПа, 400° С = 155 МПа.

Механічні властивості наведені у таблиці 2.1.2.2 згідно ГОСТ 5520-79.

Таблиця 2.1.2.2 - Механічні властивості сталі 09Г2С.

Товщина листа S, мм	≤ 20
Температура випробувань Т, °С	20
Границя пропорційності $\sigma_т$, МПа	295
Границя міцності $\sigma_в$, МПа	405
Відносне видовження δ, %	30
Ударна в'язкість KCU, Дж/см^2	59

2.1.3 Властивості наплавочного дроту та флюсу

Для наплавлення було використано дріт марки Велтек-Н300РМ-S, діаметром 2 мм. Постачається згідно ТУ 28.7-31749248-001-2002, його хімічний склад наведено в таблиці 2.1.3.1. Цей дріт є покращеним варіантом більш розповсюдженого 30ХГСА і використовується для автоматичного та напівавтоматичного наплавлення відкритою дугою при відновленні і реновації деталей із вуглецевих і низьколегованих сталей, працюючих в умовах тертя метала по металу при нормальних та підвищених температурах. Після

наплавлення підвищена зносостійкість наплавленого металу, можлива обробка ріжучим інструментом. Хімічний склад наведено в таблиці. Рекомендовано для наплавлення використання постійного струму зворотної полярності. Зварювальні властивості наведені в таблиці 2.1.3.2.

Табл. 2.1.3.1 Хімічний склад дроту Велтек-Н300РМ-S

C	Mn	Si	Cr	S	P
0,22	1,1	0,8	1,1	0,018	0,017

Табл. 2.1.3.2 Зварювально-технологічні властивості дроту Велтек-Н300РМ-S.

Формування наплавленого валика	Гарне
Відділення шлакової кірки	Гарне
Схильність наплавленого металу до утворення тріщин	Низька
Витрати дроту на 1 кг наплавленого металу, кг	1,05…1,2
Твердість наплавленого металу (HRC для 3-го…4-го слою)	НВ 280…НВ 380

Наплавлення проводиться без попереднього підігріву для деталей із вмістом вуглецю до 0,25% (09Г2С – 0,12%), рекомендовані режими наплавлення приведені в таблиці 2.1.3.3.

Табл. 2.1.3.3 – Рекомендовані режими наплавлення.

Діаметр дроту, мм	Струм, А	Напруга, В	Швидкість наплавлення, м/год	Продуктивність наплавлення, кг/год
1,6 – 1,8	140 – 260	25 – 28	10 - 15	4 – 8
2,0 – 2,2	160 – 300	26 – 29	12 - 18	5 - 9
2,4 – 2,6	200 – 340	26 – 29	15 - 20	6 -10
2,8 – 3,0	240 – 380	26 – 30	18 - 23	7 – 11
3,2	280 – 400	27 – 31	20 – 25	8 – 12

Для захисту зони зварювання було використано зварювальний флюс АН-60, який призначений для дугового автоматичного зварювання на підвищеній швидкості (до 180 м/год) конструкцій з вуглецевих і

низьколегованих сталей. Зварювальний флюс АН-60 постачається згідно ГОСТ 9087-81, і найчастіше використовується при виробництві труб. Колір зерен флюсу – від світло-сірого до жовтого і світло-коричневого кольору всіх відтінків. Зварювально-технологічні властивості наведені у таблиці 2.1.3.4.

Табл. 2.1.3.4 Зварювально-технологічні властивості флюсу АН-60.

Стійкість дуги	гарна
Розривна довжина дуги, мм	11
Схильність до утворення пір і тріщин	низька
Формування шва	гарне
Відділення шлакової кірки	гарне
Насипна щільність, г / см³	0,9…1,2
Зміст сторонніх часток*, %	< 0,3
Зміст білих непрозорих зерен,%	< 10
Вологість флюсу	< 0,05

*Не розчинені частинки сировинних матеріалів, футерування, вугілля, графіту, коксу, металевих частинок і ін.

Рекомендовані параметри для зварювання: I до 1800 А; $V_{ЗВ}$ до 220 м/год; U_{XX} джерела ~ 70 В.

При вологості, що перевищує допустиму норму, флюс перед вживанням піддають сушінню при температурі 200-250 ° С - не менше 2 годин.

Висококремнієвий високомарганцевий оксидний флюс з хімічною активністю Аф = 0,75-0,8. При зварюванні на підвищених швидкостях кремноєво- та марганцевовідновні процеси протікають досить повільно. В результаті наплавлений метал в значній мірі збагачений дрібнодисперсними оксидними включеннями. Хімічний склад флюсу наведений в таблиці 2.1.3.5. Вміст кисню в металі шва в становить 0,05%.

Табл. 2.1.3.5 – Хімічний склад флюсу АН-60, %

SiO_2	MnO	CaO	CaF_2	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	S	P

42…46	37…41	3…11	5…8	до 6	0,5…3	до 0,9	до 0,09	до 0,1

2.2 Обладнання для наплавлення

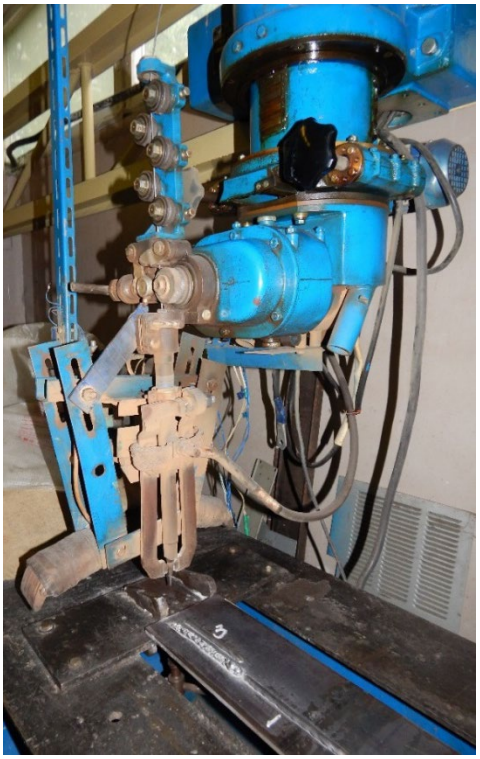
При проведені досліджень використовували наявне обладнання для наплавлення: автомат АД-231 типу АДФ1204 з джерелом живлення ВДУ-1201К (КИУ – 1201К).

Автомат АД-231 типу АДФ1204 УХЛ4 (див. рис. 2.2.1) для дугового наплавлення призначений для виконання широкого кола наплавочних і зварювальних робіт різними дротами на постійному струмі. Даний автомат виконує зварювання в нижньому положенні тіл обертання, а також плоских деталей і виробів складної форми.

У комплект автомата входять змінні вузли та приставки, які дозволяють виконувати наступні операції:

- наплавлення суцільним дротом або стрічкою;
- наплавлення дротяним електродом з поперечними коливаннями;
- наплавлення порошковим дротом;
- наплавлення порошковою стрічкою.

-



а) загальний вид б) приставка для наплавлення

Рисунок 2.2.1 – Автомат АД-231

АД-231 складається з автомата, який встановлюється на спеціальний стенд, пульта, шафи управління, джерела живлення. Технічна характеристика автомата приведена в таблиці 2.2.1.

Основними параметрами режиму наплавлення, що мають регулювання є: зварювальний струм; швидкість подачі електродного дроту або стрічки; діаметр електродного дроту або товщина стрічки; виліт електроду; напруга дуги.

Режим наплавлення підбирається в залежності від розмірів деталі і товщини наплавленого шару. Режими наплавлення залежать від багатьох факторів:

- стану зварювальних матеріалів (хімічного складу дроту або стрічки, флюсів, забрудненості,
- діаметра електродного дроту або розмірів стрічки
- характеристики джерела струму, вильоту електрода та ін.

Зміна одного з наведених чинників в першу чергу викликає зміну величини зварювального струму, який при підборі режиму повинен бути відповідним чином відкоригований за рахунок зміни вильоту електрода і швидкості подачі електродного матеріалу.

Таблиця 2.2.1 - Технічна характеристика автомата АД231

Найменування параметра	Норма
Напруга мережі живлення трифазного змінного струму, В	380
Частота трифазної мережі живлення, Гц	50
Номінальний зварювальний струм, А	1250
Номінальний режим роботи, ПВ,%	100
Діаметр електродного дроту, мм - суцільного	3.0 – 6.0

- порошкового	2.0 – 6.0
Товщина стрічки, мм - холоднокатаної або спеченої - порошкової	 0.5 - 1.0 2.0-4.0
Ширина стрічки, мм - холоднокатаної або спеченої - порошкової	 30, 40, 60 20
Швидкість подачі електродного дроту (стрічки), м/ч - I діапазон - II діапазон	 10 - 100 46 - 460
Місткість касети, кг, не більше	50
Регулювання швидкості подачі електродного дроту і стрічки всередині діапазонів	плавне
Коригування мундштука, мм - уздовж наплавочного валика - поперек наплавочного валика	 90 200
Кут нахилу мундштука у вертикальній площині при наплавленні, градусів, в межах	±30
Вертикальний хід механізму підйому, мм, не менше	400
Швидкість механізму підйому, м/ч, не менш	24
Швидкість переміщення наплавочної головки, м/ч - маршова, не більше - робоча, в межах	 800 6 - 61
Найбільша швидкість поперечних коливань, м/ч, в межах	29 - 118
Амплітуда коливань, мм, в межах	40 - 250
Маса дроту на котушці, кг, не більше	80
Флюсоапаратура: - флюсобункер, $дм^3$, не менше - витрата повітря, $м^3/ч$, не менш - тиск повітря в магістралі, Па ($кгс/см^2$)	 55 30 490×10^3
Висота всмоктування флюсу, м, не більше	2.0

Габаритні розміри автомата, мм - висота - ширина - довжина	 2350 860 1090
Маса автомата, кг, не більше	310
Габаритні розміри шафи керування, мм - висота - ширина - довжина	 660 385 505
Маса шафи керування, кг, не більше	68

Напруга дуги автомата вибирається методом зміни зовнішньої характеристики джерела живлення дуги і вильоту електрода і в деяких випадках, за рахунок регулювання подачі електродного матеріалу.

Як джерело живлення автомата було використано випрямляч ВДУ – 1201К (КИУ – 1201К) (див. рис. 2.2.2). Технічна характеристика випрямляча приведена в таблиці 2.2.2.

Рисунок 2.2.2 – Випрямляч ВДУ – 1201К

Таблиця 2.2.2 – Технічна характеристика випрямляча ВДУ – 1201К

Найменування параметра	Норма

Номінальна напруга мережі живлення, В	380
Частота струму мережі живлення, Гц	50
Номінальний зварювальний струм при ПВ 100%, А	1250
Межі регулювання зварювального струму, А - падаючі - жорсткі	 200-1250 250-1250
Межі регулювання робочої напруги, В - падаючі - жорсткі	 28-56 20-56
Активна максимальна еквівалентна споживана потужність (з урахуванням ПВ), кВт	84
Напруга холостого ходу, В	85
Діаметр електродів, мм	4-10
Маса, кг	550
Габаритні розміри, мм	960x680x890

При наплавленні були встановлені наступні режими: сила струму I = 300 А, напруга дуги U = 30 В, швидкість наплавлення V = 16 м/год, h = 20 мм.

2.3 Методика визначення зносостійкості наплавленого металу

Після наплавлення випробовування на зносостійкість наплавленого металу проводились на машині тертя СМЦ-2, яка показана на рисунку 2.3.1. Технічні характеристики машини приведено в таблиці 2.3.1.

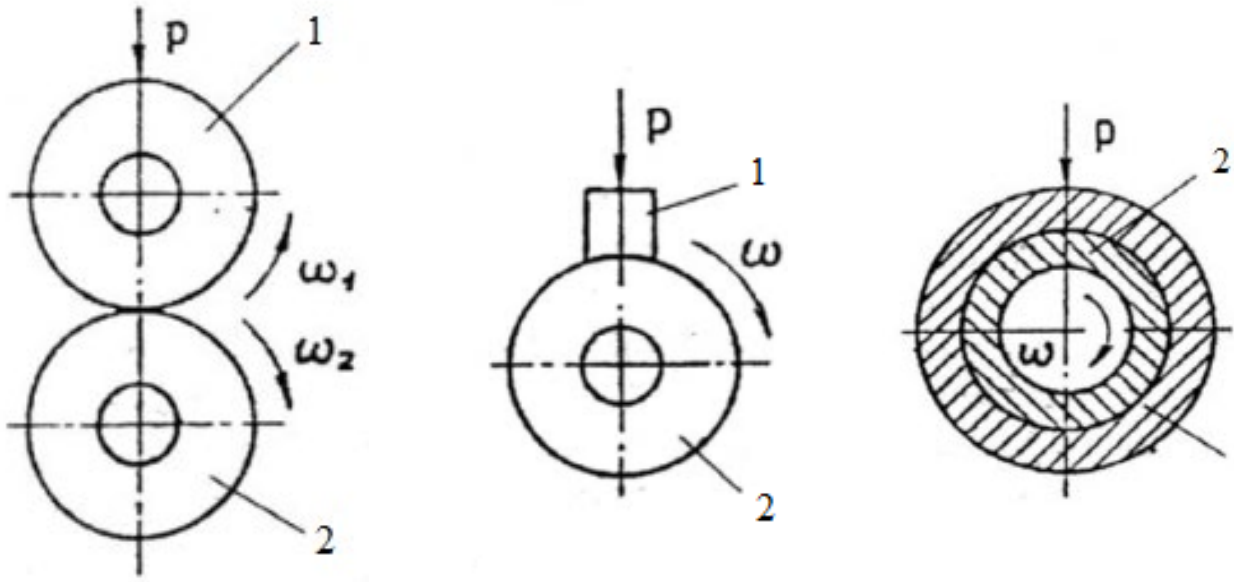
Рисунок 2.3.1 – Машина тертя СМЦ-2

Таблиця 2.3.1 - Технічна характеристика СМЦ-2

Найменування параметра	Норма
Частота обертання валу контртіла, об/хв	300, 500, 1000
Коефіцієнт проковзування круглих зразків з однаковими діаметрами, %	0, 10, 15, 20
Максимальний момент тертя, Н·м	15
Діапазон зміни моменту тертя, Н·м	1.5...15
Діапазон вимірювання навантаження, Н - диск-диск, диск-колодка; - вал-втулка	 200 - 2000 500 - 5000
Потужність, кВА	2.2
Межа допустимої похибки коефіцієнта проковзування	±5%
Межа допустимої похибки числа обертів контртіла	±10%

Машина тертя СМЦ-2 призначена для випробування матеріалів на знос і визначення їх фрикційних властивостей в умовах сухого або в рідких середовищах, тертя ковзання і тертя кочення при нормальних температурах для модельних трибосистем, схема яких представлена на рисунку 2.3.2: диск-диск, диск-колодка, втулка-вал.

Пару тертя диск-диск використовують для моделювання роботи систем з лінійним контактом елементів, таких як колесо-рейка або зубчасте зачеплення. При взаємному обкатуванні взаємодіючих дисків з деяким проковзуванням в зоні їх контакту виникають умови навантаження матеріалу, відповідні навантаженню матеріалу зубчастого колеса в будь-якій точці лінії контакту (зачеплення).



а) диск-диск б) диск-колодка в) втулка-вал

1 – зразок; 2 – контртіло

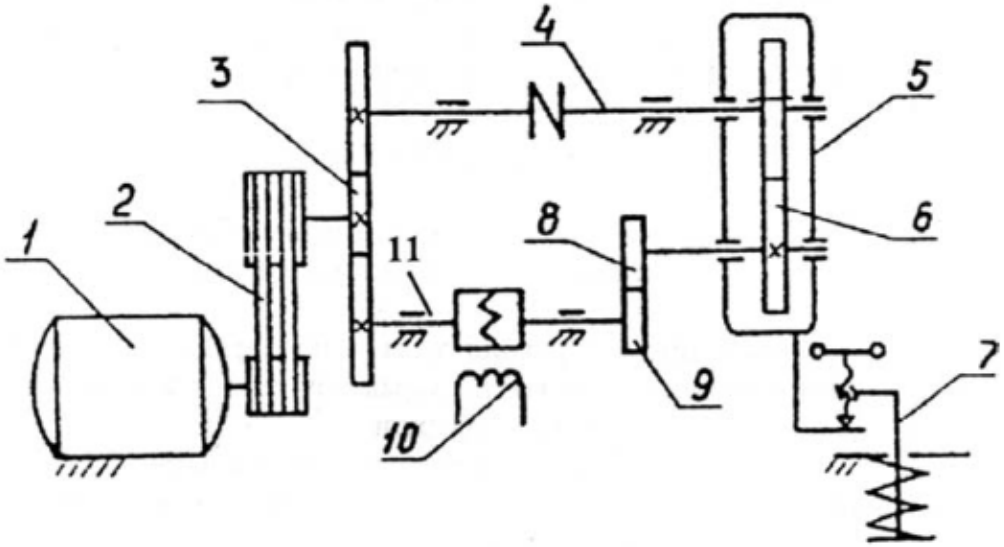
Рисунок 2.3.2 – Модельні трибосистеми СМЦ-2

Для визначення зносостійкості була використана схема диск-колодка, яка симулює роботу систем сухого і граничного тертя (гальмівні колодки та ін.). При використанні модельної трибосистеми втулка-вал можливо дослідження гідродинамічного опору тертя.

Машина тертя укомплектована пристосуванням для градуювання його силових систем. Для проведення випробувань в рідких середовищах передбачено використання спеціальних камер занурення.

Кінематична схема машини тертя представлена на рисунку 2.3.3. Обертання зразка 8 та контртіла 9 відбувається від електродвигуна 1 за допомогою клинопасової передачі 2 і шестерень 3. Клинопасова передача зі

змінними шківами, дозволяє проводити випробування при малих навантаженнях на зразок [36].



1 – електродвигун; 2 – клинопасова передача зі змінними шківами; 3 – шестерні привода зразка та контртіла; 4 – проміжний вал; 5 – каретка; 6 – змінні шестерні привода зразка; 7 – пристрій навантаження; 8 – зразок; 9 – контртіло; 10 – індукційний датчик моменту тертя; 11 - торсіон

Рисунок 2.3.3 – Кінематична схема СМЦ-2

В каретці 5, що повертається навколо осі валу 4, розташовані змінні шестерні 6, що працюють в масляній ванні, для приводу зразка. Передаточне відношення цих шестерень визначає ступінь проковзування зразка і контртіла при випробуваннях на тертя кочення з проковзуванням.

Момент тертя вимірюється безконтактним індуктивним датчиком 10 по скручуванню торсіонного валу 11, на якому закріплено контртіло. Реєстрацію моменту тертя виконується потенціометром типу КСП-2.

Для вимірювання крутного моменту на машині використовують безконтактний індуктивний датчик, що складається з двох частин: обертового ротора і нерухомого статора. Основною частиною ротора є торсіон. Під час випробування виникає момент тертя, який скручує вал нижнього зразка. Другий кінець валу з'єднаний з торсіоном датчика, який сприймає цей же

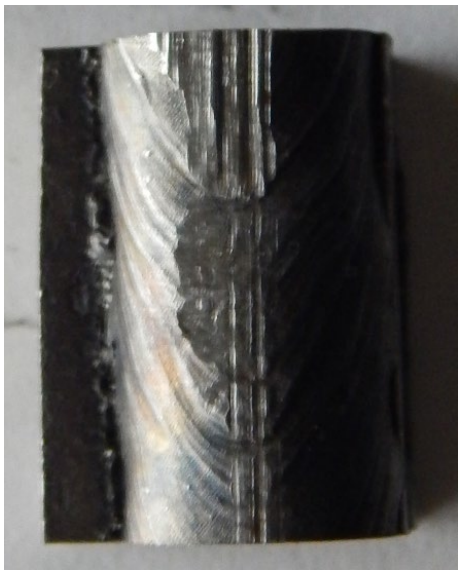
момент. Під його дією торсіон скручується, а крайні кільця ротора зміщуються відносно середнього кільця в різні боки на рівні кути. При цьому змінюється магнітний потік, отже відбувається зміна електрорушійної сили. Електричні сигнали подаються на потенціометр [36].

Для випробувань зносостійкості були підготовлені зразки довжиною 20мм і шириною 10мм, які вирізались із місця наплавлення, після чого шліфувались до отримання заданих розмірів. Верстати для виготовлення зразків: фрезерний – рисунок 2.3.4; шліфувальний – 2.3.5.

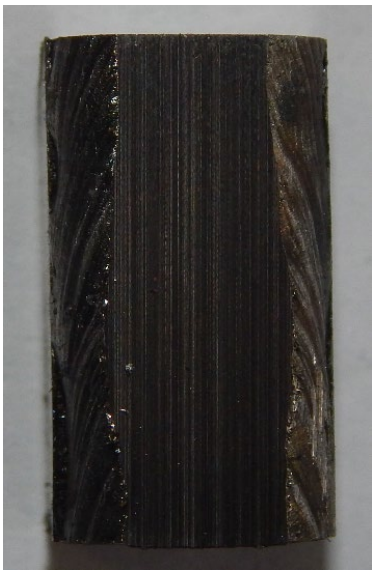
Рисунок 2.3.4 – Фрезерний верстат

Рисунок 2.3.5 – Шліфувальний верстат

Приклад підготовки зразка для випробувань зносостійкості наплавленого металу в умовах сухого тертя металу по металу показано на рисунку 2.3.6.



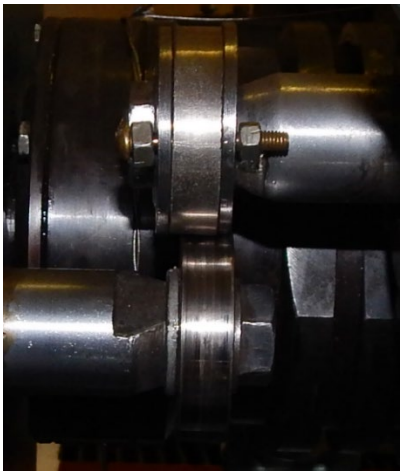
а) після фрезерування



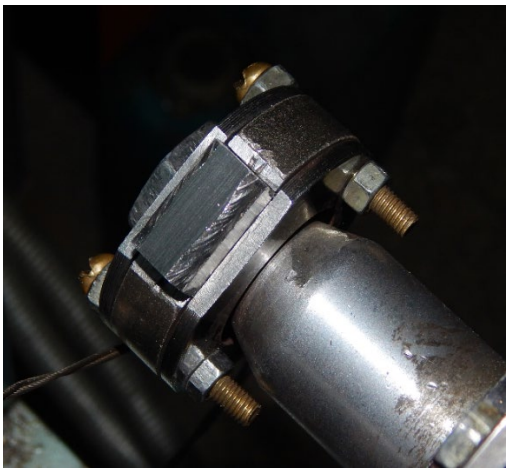
б) після шліфування

Рисунок 2.3.6 – Стадії підготовки зразків

Для визначення зносостійкості наплавленого металу використали тип диск-колодка (див. рис. 2.3.7). В якості контртіла використовували диск 50мм зі сталі У8 твердістю НВ 400-450. Умови випробувань: тиск на зразок Р = 0.1 МПа; швидкість тертя V = 0.8 м/с; температура випробувань Т = 20 С; тривалість випробувань – 100 хвилин з вимірами через кожні 10 хв.



а) схема диск-колодка



б) закріплений зразок

Рисунок 2.3.7 – Схема випробувань зносостійкості

Зразки зважували перед, після і під час випробувань на лабораторних терезах ВЛР-200 (див. рис. 2.3.8) з точністю до 0.001г. Ступінь зносостійкості визначали як різницю значень маси зразка до і після випробувань.

Рисунок 2.3.8 – Лабораторні терези ВЛР-200

Для вимірювання мікротвердості наплавленого металу було використано мікротвердомір ПМТ-3. Його загальний вид показано на рисунку 2.3.8.

Рисунок 2.3.8 – Мікротвердомір ПМТ-3.

Мікротвердомір ПМТ-3 являє собою мікроскоп, призначений для вимірювання мікротвердості металів, скла, абразивів, кераміки, мінералів та інших матеріалів.

Принцип дії приладу заснований на втисненні алмазної піраміди в досліджуваний матеріал під певним навантаженням і вимірювання лінійної величини діагоналі отриманого відбитка. Число твердості (Н) визначається як частка від ділення навантаження Р (кг) на бічну поверхню S (d мм^2) відбитка в припущенні, що кути відбитка відповідають кутам піраміди:

$$H = \frac{P}{S}.$$

Визначення мікротвердості потрібно проводити в наступному порядку:

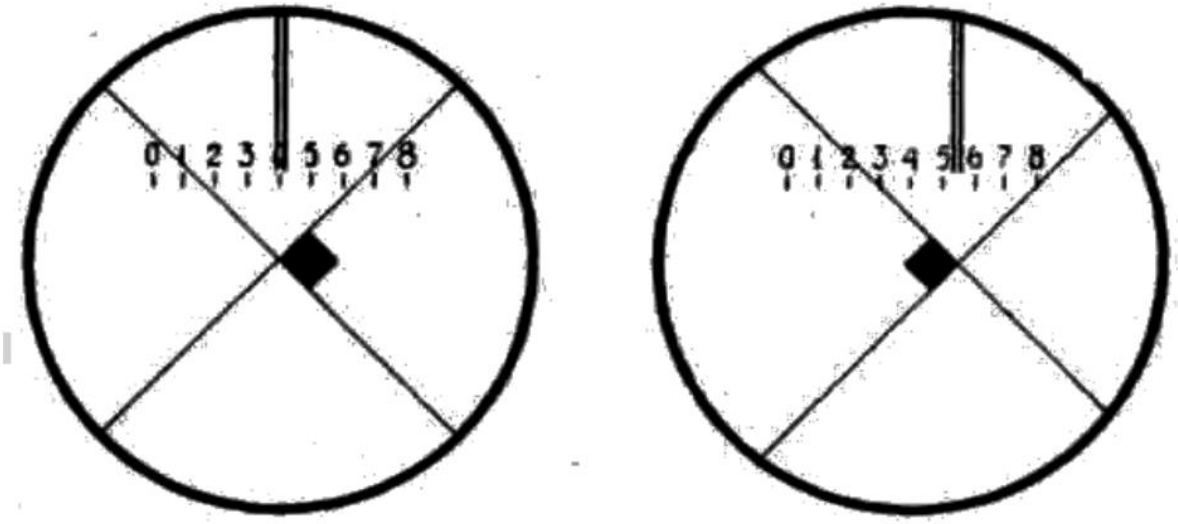
1. За допомогою ручного пресу закріпити предмет пластиліном на платівці так, щоб його досліджувана поверхня розташувалася паралельно робочій площині столика.

2. Помістити на потовщену частину штока вантаж.

3. Вибрати місце на предметі для втиснення відбитка. При дослідженні металевого предмета відстань від центру відбитка до краю предмета або між центрами сусідніх відбитків повинно бути не менше двох діагоналей відбитка, а при дослідженні мінералів - не менше п'яти діагоналей; товщина предмета не повинна бути менше півтора діагоналей відбитка. При дослідженні окремих структурних складових металевих сплавів діють ті ж правила. Кордоном предмета служить межа досліджуваного зерна.

4. Плавно повернути предметний столик проти годинникової стрілки до упору, не допускаючи поштовхів при підведенні до упору. Закріпити столик в цьому положенні гвинтом.

5. Повільним поворотом рукоятки проти годинникової стрілки опустити шток так, щоб алмаз торкнувся поверхні досліджуваного предмета. Рукоятку повертати приблизно на 180 ° протягом 10-15 сек. Після належної витримки під навантаженням (5 сек) повернути рукоятку у вихідне положення. Віджати гвинт і повернути предметний столик в попереднє положення до упору. Щоб уникнути удару об упор і зміщення предмета з встановленого положення, столик потрібно повертати дуже обережно.



а) б)

Рисунок 2.3.9 – Вид крізь окуляр мікрометра. [39]

7. Виміряти діагональ відбитка за допомогою окуляр-мікрометра. Гвинтами підвести відбиток до перехрестя, при цьому обидві сторони перехрестя повинні прилягати до двох сторін відбитка (рис.2.3.9, а). Після того як відбиток суміщений з перехрестям, потрібно зробити відлік по вимірювальному барабану окуляр-мікрометра. Потім обертати вимірювальний барабан до тих пір, поки перехрестя окуляра приводу не співпаде з протилежними двома сторонами відбитка (рис.2.3.9, б) і знову зробити відлік по окуляр-мікрометру. Різниця відліків, помножена на ціну поділки вимірювального барабана, дасть справжню величину діагоналі відбитка. Число твердості можна визначити по таблиці або підрахувати за формулою [39]:

$$H = \frac{1854P}{C^2},$$

де Н – число твердості в кг/мм^2; Р – навантаження в г; С – діагональ відбитку в мк.

2.4 Дослідження структури металу

Мікроскопічний метод дослідження металів і сплавів, або коротко мікроаналіз, полягає у вивченні будови (структури) за допомогою мікроскопа на спеціально приготованих зразках - мікрошліфах.

Будова металів і сплавів, досліджувана при мікроаналізі, називається мікроструктурою.

Приготування мікрошліфа складається з наступних операцій:

- вирізка зразка;
- шліфування та полірування до дзеркального блиску його поверхні, обраної для дослідження;

2.4.1 Травлення для виявлення структури.

Шліфи циліндричної форми мають діаметр 10 - 15мм, прямокутної - приблизно 12х12мм. Висота зразків 10-15мм. Якщо зразки мають невеликі розміри (дріт, тонкі листи, шматочки деталей тощо) то для приготування шліфа їх затискають в держаках або заливають в легкоплавкі матеріали (епоксидні компаунди, акрилові пластики, сірку тощо). У всіх випадках вага шліфів повинна бути невеликою, щоб не пошкодити механічні системи мікроскопа.

Вирізаний зразок шліфують на абразивному колі з періодичним охолодженням, щоб не було перегріву зразка.

Зразок шліфується на шліфувальному папері до повного видалення рисок, з поступовим переходом від паперу з розміром зерна абразиву 150-50 мкм до паперу мікронною зернистості (20-5 мкм). При переході з одного паперу на інший, більш тонкий, необхідно очищати зразок і міняти напрям шліфування на 90^{o} [37].

Шліфування зразків проводиться вручну, коли шліфувальний папір кладеться на рівну поверхню (скло, мармур), або на спеціальних верстатах з закріпленням шліфувального паперу на обертаючих дисках або стрічках.

Полірування зразків може здійснюватися кількома способами: механічним, хіміко-механічним і електролітичним.

Механічне полірування ведеться на обертових колах діаметром 200 - 250 мм, обтягнуті грубим сукном (попереднє полірування) або фетром (остаточне полірування). Абразивом служить водна суспензія окису хрому, алюмінію або інших оксидів, що періодично наноситься на сукно. Для твердих матеріалів при поліруванні використовуються алмазні пасти.

При хіміко-механічному поліруванні до складу поліруючої суміші вводиться хімічно активна речовина, що впливає на поверхню зразка і прискорює процес.

При електролітичному поліруванні зразок в якості анода поміщають в електролітичну ванну. Склад електроліту, а також режим полірування залежать від матеріалу. Перевага цього методу - збереження неспотвореної структури і відсутність наклепаного шару, що виникає при механічному поліруванні.

При дослідженні поверхні металу під мікроскопом можна виявити на загальному світлому полі окремі темні і сірі точки і лінії, які представляють собою як неметалеві включення (оксиди, сульфіди, шлаки, силікати, графи, нітриди тощо), так і не усунуті поліруванням дефекти поверхні зразка (раковини, мікротріщини, сліди обробки).

Для вивчення повної картини мікроструктури металу зразок піддають травленню. Перед цим поверхня мікрошліфа знежирюється спиртом. В результаті травлення мікрошліф отримує складний мікрорельєф, що характеризує будову металу, а в деяких випадках різні складові структури набувають різне забарвлення.

Виявлення структури сплавів може проводитися шляхом хімічного або електрохімічного травлення, іонного бомбардування, методами вакуумного випаровування або окислення. Вибір методу виявлення структури, режиму травлення і складу травителей визначається природою сплаву і метою дослідження. Наприклад, залізовуглецеві сплави травляться в 4-5%-ому

розчині азотної кислоти в спирті. При цьому виявляються форма, розмір і розподіл структурних складових сплаву фериту, цементиту, перліту. Але зерна фериту і цементитні включення виглядають однаково світлими, і для їх поділу застосовують травлення гарячим розчином пікрату натрію, який забарвлює цементит в темний колір.

Створення мікрорельєфу при травленні визначаються тим, що реактив неоднаково діє на різні структурні складові сплаву. Навіть в однофазному сплаві зерна мають різне кристалографічне орієнтування, тому в поверхні мікрошліфа зерна будуть зрізані в різних кристалічних площинах, які будуть травитися неоднаково. Межі зерен металу, мають недосконалу кристалічну будову і збагачені домішками, мають протравлюватися сильніше. Більш глибоко протруєні ділянки сильніше поглинають світло і виглядають більш темними. У разі багатофазних сплавів ділянки будуть відрізнятися ще сильніше [37].

Процес одержання знімку мікрошліфа проводився на мікроскопі NEOPHOT 32, встановленому в 10 відділі інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона. Загальний вигляд мікроскопа представлений на рисунку 2.4.1.1.

Рисунок 2.4.1.1 – Загальний вигляд мікроскопа NEOPHOT 32

Включення мікроскопа виконується головним вимикачем приладу (6 Рис. 2.3.1.3). Контроль включення мережі контролюється світлодіодом.

Приготований шліф поміщається полірованою поверхнею на предметний столик (1 Рис. 2.4.1.1).

Вибір збільшення здійснюється за допомогою об'єктивів (8 Рис. 2.4.1.2) і окулярів (2 Рис. 2.4.1.1). Для зміни об'єктивів необхідно важелем швидкого підйому столика-тримача (5 Рис. 2.4.1.1) підняти столик. Потім поворотом револьвера з об'єктивами, встановити необхідний об'єктив під досліджуваний об'єкт. Опустити предметний столик. Зміна окулярів проводиться поворотом грибка зміни тубусних систем (2 Рис. 2.4.1.1) [38].

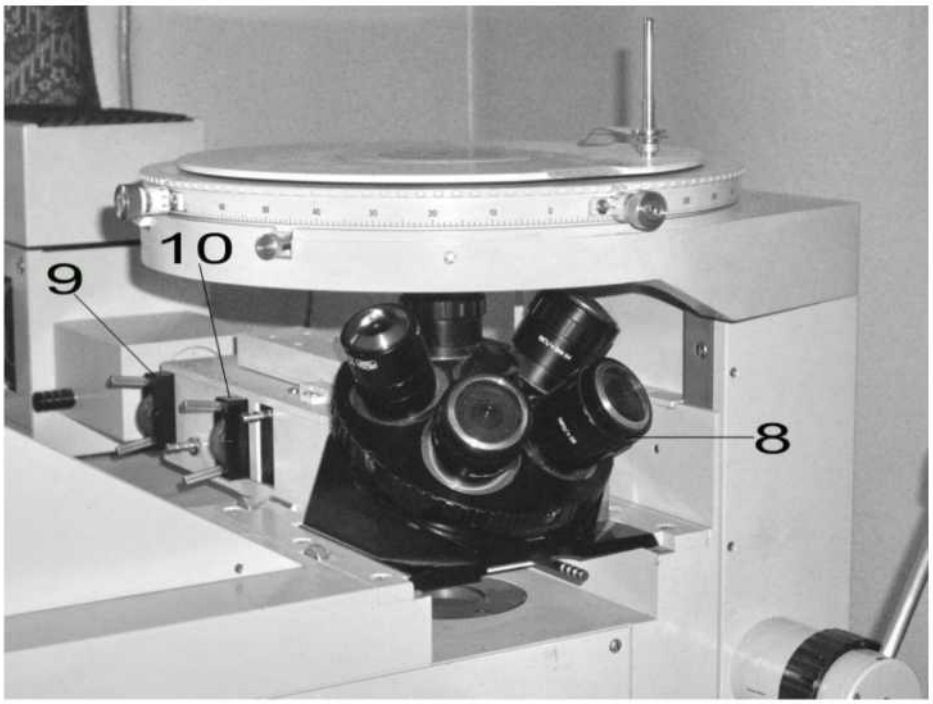


Рис. 2.4.1.2. – Зовнішній вигляд мікроскопа. Права частина.

Включення лампи освітлювача проводиться перемикачем 7 (Рис. 2.4.1.3), рекомендоване положення - «9У». Регулювання освітленості проводиться апертурною діафрагмою (9 Рис. 2.4.1.2) і діафрагмою поля (10 Рис. 2.4.1.2).

Рис. 2.4.1.3 – Зовнішній вигляд мікроскопа. Ліва частина.

Включення лампи освітлювача проводиться перемикачем 7 (Рис. 2.4.1.3), рекомендоване положення - «9В». Регулювання освітленості проводиться апертурною діафрагмою (9 Рис. 2.4.1.2) і діафрагмою поля (10 Рис. 2.4.1.2).

Налаштування різкості зображення проводиться за допомогою рукоятки грубого фокусування (3 Рис.2.4.1.1) і гнучким точним фокусуванням (4 Рис. 2.4.1.1) [38].

2.4.2 Документування одержуваної інформації

Вимірювання розміру зерна можливо двома методами. Перший метод: за допомогою застосування вбудованої в мікроскоп мікрометричною лінійки. Результати вимірювання заносяться до протоколу вимірювань. Другий метод: вимір розміру зерна із застосуванням програми «GoodGrains». Отримання електронного зображення мікроструктури проводиться наступним чином. Завдяки грибку оптичного розподільника зображення переводиться на цифрову відеокамеру. У програмі «GoodGrains», в меню «Файл», необхідно вибрати вкладку «Імпорт ...», а потім «Відео знімок ...». Зображення структури

у вікні, необхідно навести на різкість використовуючи грибок точного фокусування на мікроскопі, потім навести курсор на кнопку «Сфотографувати», після отримання зображення закрити вікно і вимикнути освітлювач. Електронне зображення структури необхідно розгорнути на повний екран і виставити масштаб зображення в панелі інструментів «Калібрування» (виставляється збільшення об'єктива та окуляра відповідно). Потім необхідно на панелі інструментів вибрати «Лінійка». Лінійкою проводиться вимірювання розміру зерен. Для збереження зображення, необхідно в меню «Файл» вибрати вкладку «Зберегти як.» І вибрати відповідний каталог.

2.4.3 Визначення розміру зерна

Зерна металів - це окремі кристали полікристалічного конгломерату, розділені між собою суміжними поверхнями - межами зерен. Зерна можуть бути рівновісні і не рівновісні. При наявності двійників зернами вважають кристали разом з двійниками.

Величина зерна - середня величина випадкових перетинів зерен в площині металографічного шліфа - визначається методами:

- візуального порівняння видимих під мікроскопом зерен із зразками шкал, з визначенням розміру зерна;
- підрахунок кількості зерен, що припадають на одиницю поверхні шліфа, з визначенням середнього діаметра і середньої площі зерен;
- підрахунку перетинів кордонів зерен відрізками прямих з визначенням середнього умовного діаметра в разі рівновісних зерен, кількості зерен в кубічному міліметрі в разі не рівновісних зерен;
- вимір довжин хорд під мікроскопом або з використанням мікрофотографій з визначенням відносної частки зерен певного розміру.

Зазначені методи застосовуються для оцінки величини зерна, що має форму, близьку до рівновісної.

Метод підрахунку перетинів кордонів зерен застосовується для оцінки величини зерна подовженої форми.

У разі визначення величини зерна в різнозернистій структурі середні розміри (діаметр, площа зерна) не є характеристиками оцінки структури.

Метод підрахунку зерен.

Метод полягає у визначенні кількості зерен на одиниці поверхні шліфа (мм^2) і розрахунку середньої площі зерна і середнього діаметра зерен.

Підрахунок зерен проводять на матовому склі камери мікроскопа або на мікрофотографіях, в яких поле зору обмежують однією з плоских фігур: окружністю, квадратом або прямокутником.

Підраховують число зерен, які потрапили всередину обраної фігури (n_1), і число зерен, які перетнули її межами (n_2) •

Загальна кількість зерен (n_g) на площі шліфа при збільшенні g підраховують за формулою:

$$n_g = n_1 + \frac{n_2}{2}$$ - для кола;

$$n_g = n_1 + \frac{n_2}{2} - 1$$ - для прямокутника або квадрата.

Кількість зерен m, що припадають на 1 мм^2 площі шліфа, при використанні будь-якого збільшення, визначають за формулою

$$m = 2\left(\frac{g}{100}\right) n_g$$

де n_g - загальна кількість зерен, що знаходяться всередині фігури, яка обмежує поле зору на шліфу або фотографії при збільшенні g.

Підрахунок зерен проводять не менше ніж в трьох характерних місцях шліфа і за отриманими результатами розраховують середнє арифметичне значення.

Середню площу перетину зерна (а) в мм визначають за формулою:

$$a = \frac{1}{m}$$

Середній діаметр зерна (d_m) в мм визначають за формулою:

$$d_m = \frac{1}{\sqrt{m}}.$$

При підрахунку кількості зерен допускається розбіжність результатів трьох визначень до 50% [38].

2.4.4 Метод підрахунку перетинів кордонів зерен

Метод полягає в підрахунку зерен, пересічених відрізком прямої, і визначенні середнього умовного діаметра - в разі рівновісних або кількості зерен в 1мм^3 - в разі не рівновісних зерен.

Підрахунок перетинів зерен в обох випадках проводять на матовому склі мікроскопа або мікрофотографіях, на яких проводять кілька відрізків довільної довжини (довжина відрізка, що відповідає довжині на шліфу, визначається за допомогою мітки в правому нижньому кутку фотографії). Довжину відрізків вибирають з таким розрахунком, щоб кожен з них перетинав не менше 5 зерен, при цьому збільшення підбирають так, щоб на досліджуваній поверхні було не менше 20 зерен. Зерна на кінцях прямій, не пересічені нею цілком, приймають за одну зернину.

Визначають сумарну довжину відрізків L, виражену в міліметрах натуральної величини на шліфу, і сумарне число пересічених зерен N.

Вимірювання проводять не менше ніж в п'яти характерних місцях шліфа.

При підрахунку кількості зерен допускається розбіжність результатів п’яти визначень не більше 50%.

Підрахунок кількості перетинів рівновісних зерен проводять на двох взаємно перпендикулярних відрізках прямих, проведених в кожному з п'яти місць шліфа.

Середній умовний діаметр зерна (d_L) в мм обчислюють за формулою:

$$d_L = \frac{L}{N}$$

де L- сумарна довжина відрізків, мм; N - загальне число зерен, пересічених відрізками довжиною L.

Число не рівновісних зерен в 1мм шліфа визначають на шліфах, виготовлених вздовж і впоперек головної осі симетрії. В цьому випадку відрізки прямих проводять паралельно осям симетрії.

Середнє число не рівновісних зерен (N_v) в 1мм обсягу шліфа обчислюють за формулою

$$N_v = 0,7 N_x N_y N_z$$

де 0,7 - коефіцієнт, що враховує не рівновісність зерен;

N_x- кількість перетинів кордонів зерен на 1 мм довжини в поздовжньому напрямку (вздовж осі витягнутих зерен);

N_y - кількість перетинів кордонів зерен на 1 мм довжини в поперечному напрямку;

N_z - кількість перетинів кордонів зерен на 1 мм довжини в перпендикулярному напрямку [37].

2.4.5 Метод вимірювання довжин хорд.

Метод заснований на вимірі лінійних розмірів відрізків - хорд, що відсікаються в зернах прямими лініями, і застосовується для визначення величини зерна в різнозернистій структурі.

Замір довжин хорд проводять:

- безпосередньо під мікроскопом за допомогою окуляра з лінійкою (метод рухомого шліфа) по одній або декількох лініях в довільному напрямку на шліфу;
- на мікрофотографіях.

Замір виробляють не менше ніж в п'яти найбільш типових полях зору, при цьому в кожному полі зору проводять не менше трьох прямих в довільному напрямку.

Загальна кількість вимірювань залежить від однорідності величини зерна, необхідної точності та достовірності результатів.

Так, наприклад, при прийнятій достовірності 90% і помилку 10% загальна кількість пересічених зерен має бути не менше 250, при достовірності 90% і помилку 5% -не менше 1000 [37].

3 ОПИС І АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Вплив нанопорошку карбіду титану на зносостійкість наплавленого металу в умовах сухого тертя

Після проведення випробувань на машині для тертя СМЦ-3 отримали результати, що записані в таблицях.

Таблиця 3.1.1 – Результати випробувань на зносостійкість зразків із TiC.

t, хв	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Зразок 1. Початкова маса = 24,327										
Δm, г	0,009	0,011	0,012	0,01	0,012	0,013	0,006	0,008	0,009	0,011
m, г	24,318	24,307	24,295	24,285	24,273	24,26	24,254	24,246	24,23	24,226
Σ Δm	0,009	0,02	0,032	0,042	0,054	0,067	0,073	0,082	0,09	0,101
Зразок 2. Початкова маса = 23,855										
Δm, г	0,005	0,005	0,0085	0,01	0,006	0,0085	0,013	0,011	0,011	0,004
m, г	23,85	23,845	23,8365	23,8265	23,8205	23,812	23,799	23,788	23,777	23,773
Σ Δm	0,005	0,01	0,0185	0,0285	0,0345	0,043	0,056	0,067	0,078	0,082
Зразок 3. Початкова маса = 23,391										
Δm, г	0,006	0,012	0,012	0,012	0,003	0,001	0,003	0,003	0,003	0,001
m, г	23,385	23,373	23,361	23,349	23,346	23,345	23,342	23,339	23,336	23,335
Σ Δm	0,006	0,018	0,03	0,042	0,045	0,046	0,049	0,052	0,055	0,056
Зразок 4. Початкова маса = 22,0										
Δm, г	0,01	0,005	0,0085	0,0055	0,003	0,0015	0,002	0,002	0,0015	0,0015
m, г	21,99	21,985	21,9765	21,971	21,968	21,966	21,964	21,962	21,961	21,959
Σ Δm	0,01	0,015	0,0235	0,029	0,032	0,0335	0,0355	0,0375	0,039	0,0405
Зразок 5. Початкова маса = 25,305										
Δm, г	0,0025	0,001	0,0035	0,001	0,007	0,0015	0,0055	0,004	0,0065	0,004
m, г	25,302	25,301	25,298	25,297	25,29	25,288	25,283	25,279	25,272	25,268
Σ Δm	0,0025	0,0035	0,007	0,008	0,015	0,0165	0,022	0,026	0,0325	0,0365

Під час виконання досліджень на тертя, для полегшення, замість пройденого шляху було занотовано час тертя, так як швидкість тертя встановлюється одна для всіх зразків.

Перший зразок було наплавлено без додавання нанопорошку, і використовували як порівняльний.

Для порівняльної характеристики під час вимірювань було використано нанопорошок аеросилу (SiO_2), вплив якого на наплавлений метал вже будо досліджено у роботах кафедри інженерії поверхні. Дані вимірювань цих зразків наведено в таблиці 3.1.2.

Таблиця 3.1.2 – Результати випробувань на зносостійкість зразків із SiO_2.

t, хв	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Зразок 6. Початкова маса = 22,977										
Δm, г	0,011	0,012	0,017	0,017	0,017	0,015	0,015	0,018	0,013	0,012
m, г	22,966	22,954	22,937	22,92	22,903	22,888	22,873	22,855	22,842	22,83
Σ Δm	0,011	0,025	0,04	0,057	0,074	0,089	0,104	0,122	0,135	0,147
Зразок 7. Початкова маса = 23,033										
Δm, г	0,015	0,012	0,0195	0,0155	0,013	0,016	0,0995	0,0125	0,008	0,007
m, г	23,018	23,006	22,986	22,971	22,958	22,942	22,842	22,83	22,822	22,815
Σ Δm	0,015	0,027	0,0465	0,062	0,075	0,091	0,102	0,1145	0,1225	0,1295
Зразок 8. Початкова маса = 23,789										
Δm, г	0,0045	0,0055	0,004	0,002	0,005	0,004	0,0055	0,0035	0,002	0,002
m, г	23,784	23,779	23,775	23,775	23,768	23,764	23,758	23,755	23,753	23,751
Σ Δm	0,0045	0,01	0,014	0,016	0,021	0,025	0,0305	0,034	0,036	0,038
Зразок 9. Початкова маса = 23,66										
Δm, г	0,005	0,003	0,003	0,0025	0,0045	0,005	0,005	0,004	0,002	0,005
m, г	23,655	23,652	23,649	23,646	23,642	23,637	23,632	23,628	23,626	23,621
Σ Δm	0,005	0,008	0,011	0,0135	0,018	0,023	0,028	0,032	0,034	0,039

Графічне порівняння зносостійкості наплавлених зразків показано на рисунках 3.1.1, 3.1.2 та 3.1.3.

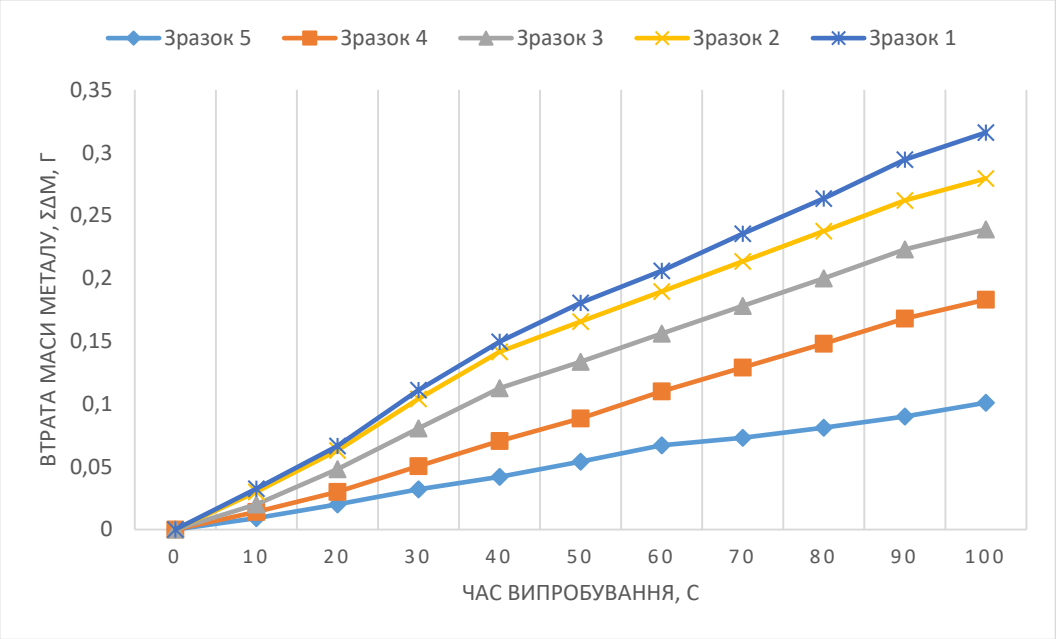


Рисунок 3.1.1 – Втрати маси металу зразків із TiC

На графіку помітна похибка вимірювань, і тому перейдемо до усереднених значень, для наглядної демонстрації впливу доданого нанокомпоненту на наплавлений метал.

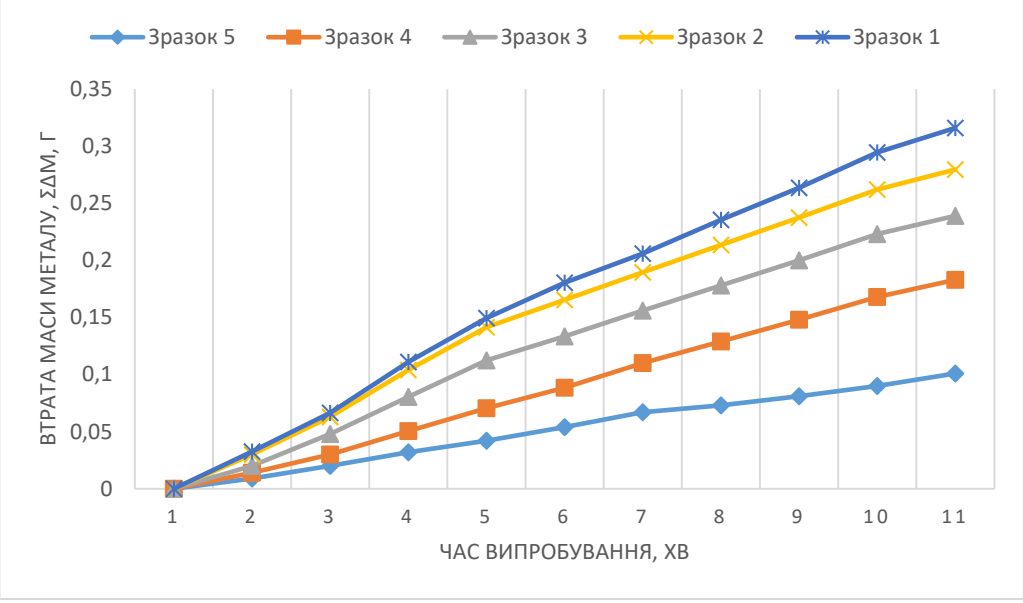


Рисунок 3.2.2 – Усереднені значення втрат маси металу зразків із TiC

При аналізі отриманих даних помітний позитивний вплив нанокомпоненту на наплавлений метал. Можемо відмітити, що помітна тенденція – із збільшенням відсотку вмісту карбіду титану в зразку збільшується і зносостійкість. П’ятий зразок (10% TiC) зношується майже в три рази повільніше ніж перший (без нанопорошку).

Використання порошку аеросилу було прийнято не тільки для порівняння із карбідом титану, але і для дослідження його впливу при наплавленні із дротом Велтек-Н300РМ-S. Графічне зображення характеристик зносостійкості зразків наведено в рис.

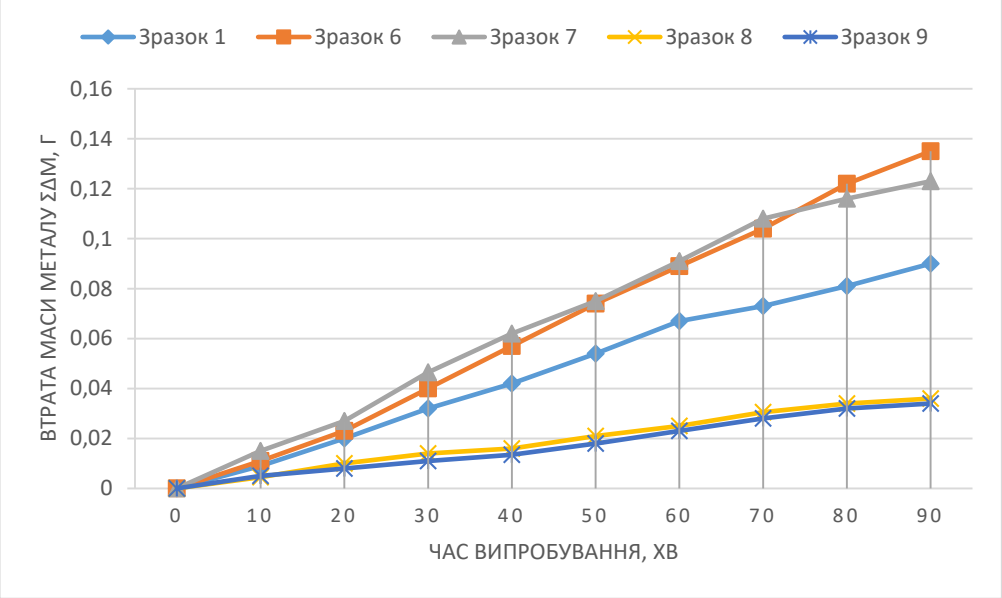


Рисунок 3.1.3 – Втрати маси металу зразків із SiO_2.

При аналізі отриманих даних можна помітити, що для зразків №6 та №7 введення нанокомпоненту мало негативний вплив на зносостійкість. Отримані дані потрібно більш глибоко дослідити.

Найкращі результати проявили зразки №8 та №9 із сумарною втратою металу 0,38 та 0,39 г відповідно, але все ж їх зносостійкість поступається перед зразком №5 із втратою металу 0.36 г.

Таким чином можна підтвердити позитивний вплив нанопорошку карбіду титану на зносостійкість наплавленого металу в умовах сухого тертя.

3.2 Вплив нанопорошку на структуру наплавленого металу

Після випробувань на зносостійкість було отримано знімки структури деяких із зразків. Знімки, що були зроблені, показали структуру металу, а також дозволили підрахувати кількість неметалічних включень.

Було зроблено знімки зразків №1, №4, №5, №9.

Структуру зразка №1 (без додання нанокомпоненту) зображено на рисунку 3.2.1.

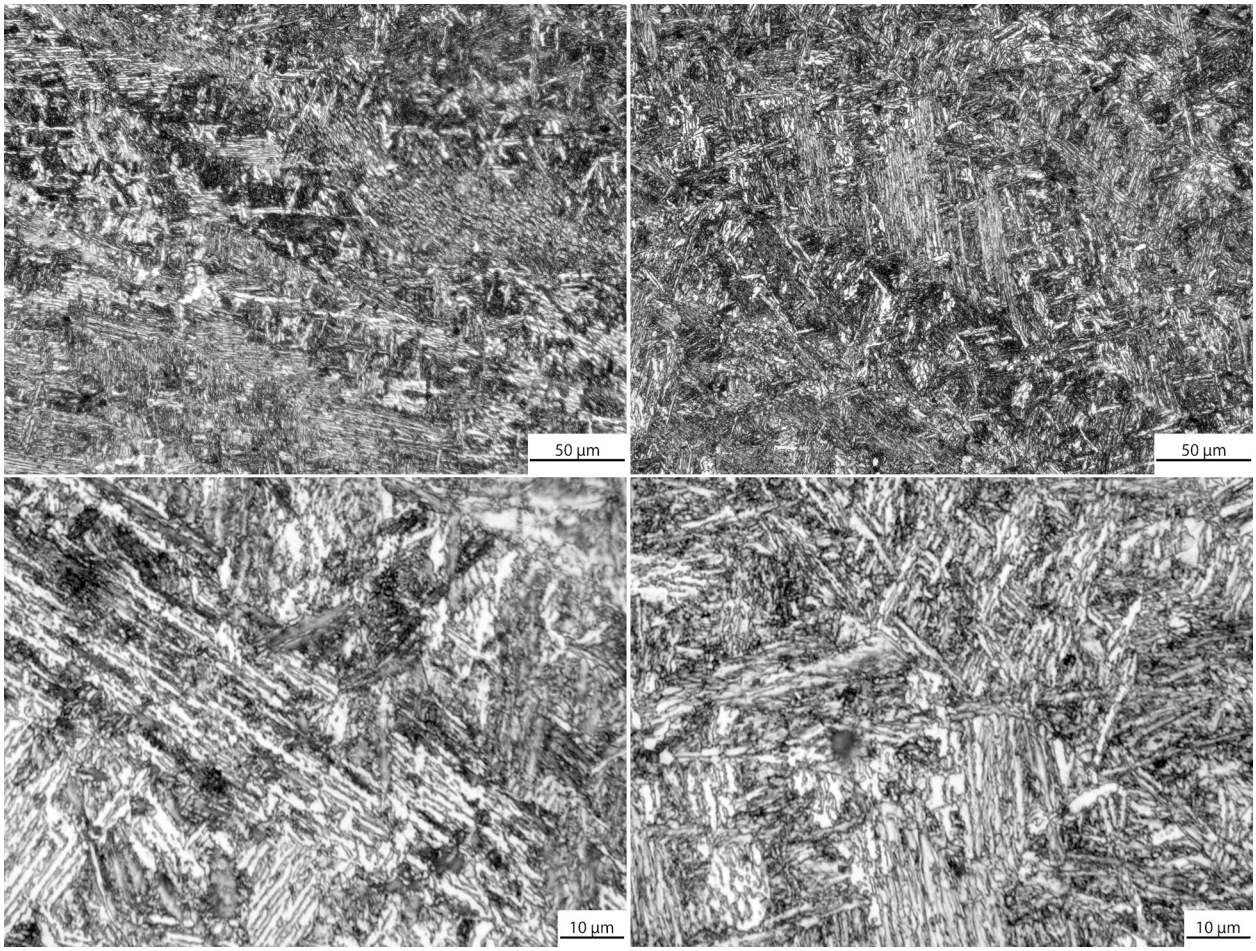


Рисунок 3.2.1 – Структура зразка №1 (без додання нанокомпоненту).

Структура основної сталі 09Г2С та наплавочного дроту початково мають ферито-перлітну структуру. Але при аналізі фотографій зразку №1, що зображено на рисунку, можна зробити висновок що структура більше приймає вигляд бейнітної. Бейніт, або голчастий тростит, утворюється при термічній обробці в результаті проміжних перетворень аустеніту. Аустеніт в свою чергу утворюється на межі розділу фаз ферит – цементит, яка з’являється при

термічній обробці евтектоїдної сталі [48]. Отже можна припустити, що структурні перетворення проходили в такій послідовності: ферит – аустеніт – бейніт.

По морфології бейніт поділяється на дві основні групи – голчастий і зернистий. Також бейніт розділяють на верхній і нижній. Верхній має перисту будову і складається із витягнутих частин фериту в формі пластин і із паралельних їм тонких частин цементиту. Нижній бейніт має голчасту будову, схожу на будову мартенситу, і складається із тонких частин карбіду, розміщеного в пластинках фериту перенасиченого вуглецем [48].

Отже, структурою контрольного зразку є нижній, голчастий бейніт.

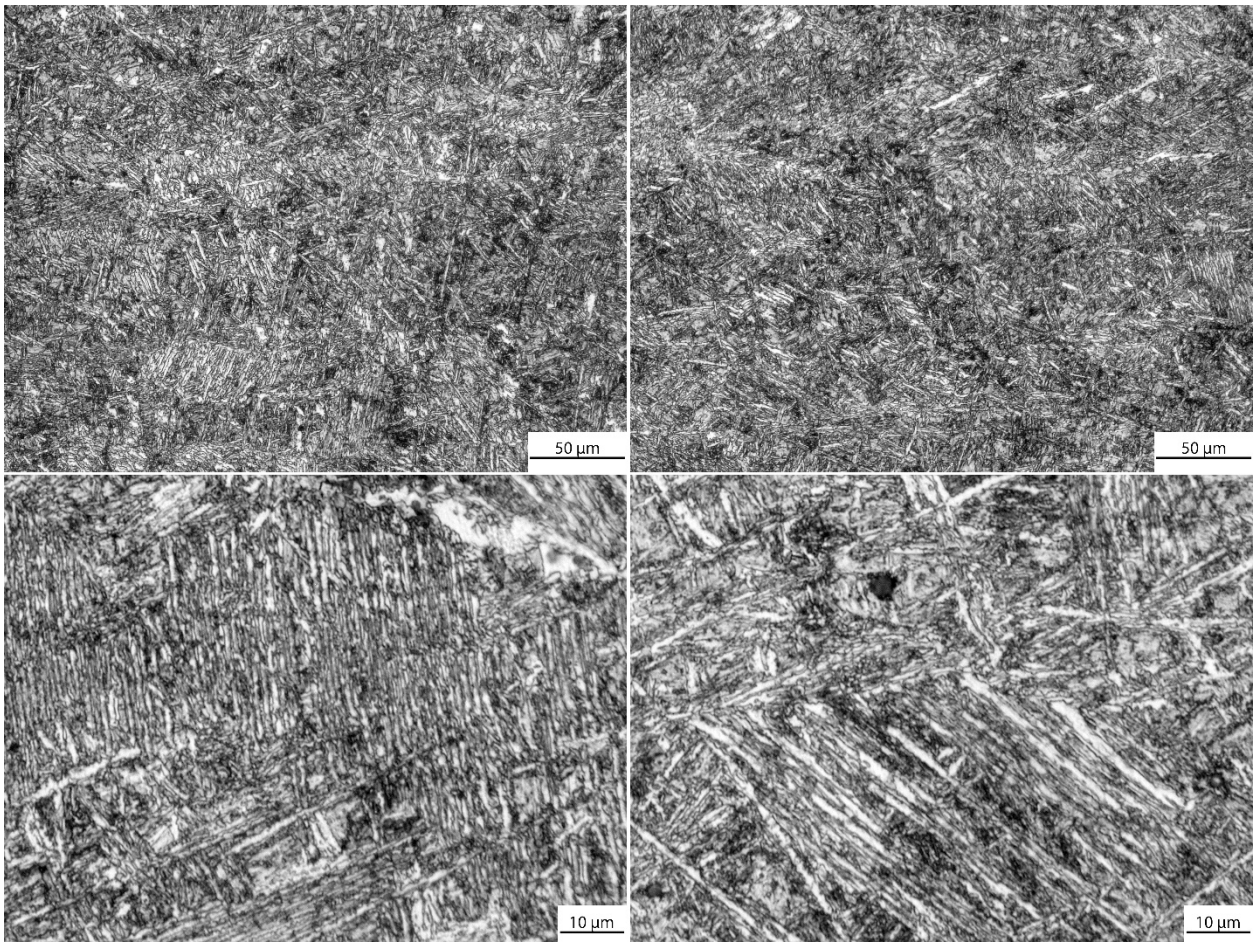


Рисунок 3.2.2 – Структура зразка №4 (5% TiC)

При порівнянні фотографій структури зразку №4 із доданням 5% TiC, що зображено на рисунку 3.2.2, можна відмітити зменшення ширини голок бейніту та збільшення їх довжини. Також помітне утворення зон однаково орієнтованих голок.

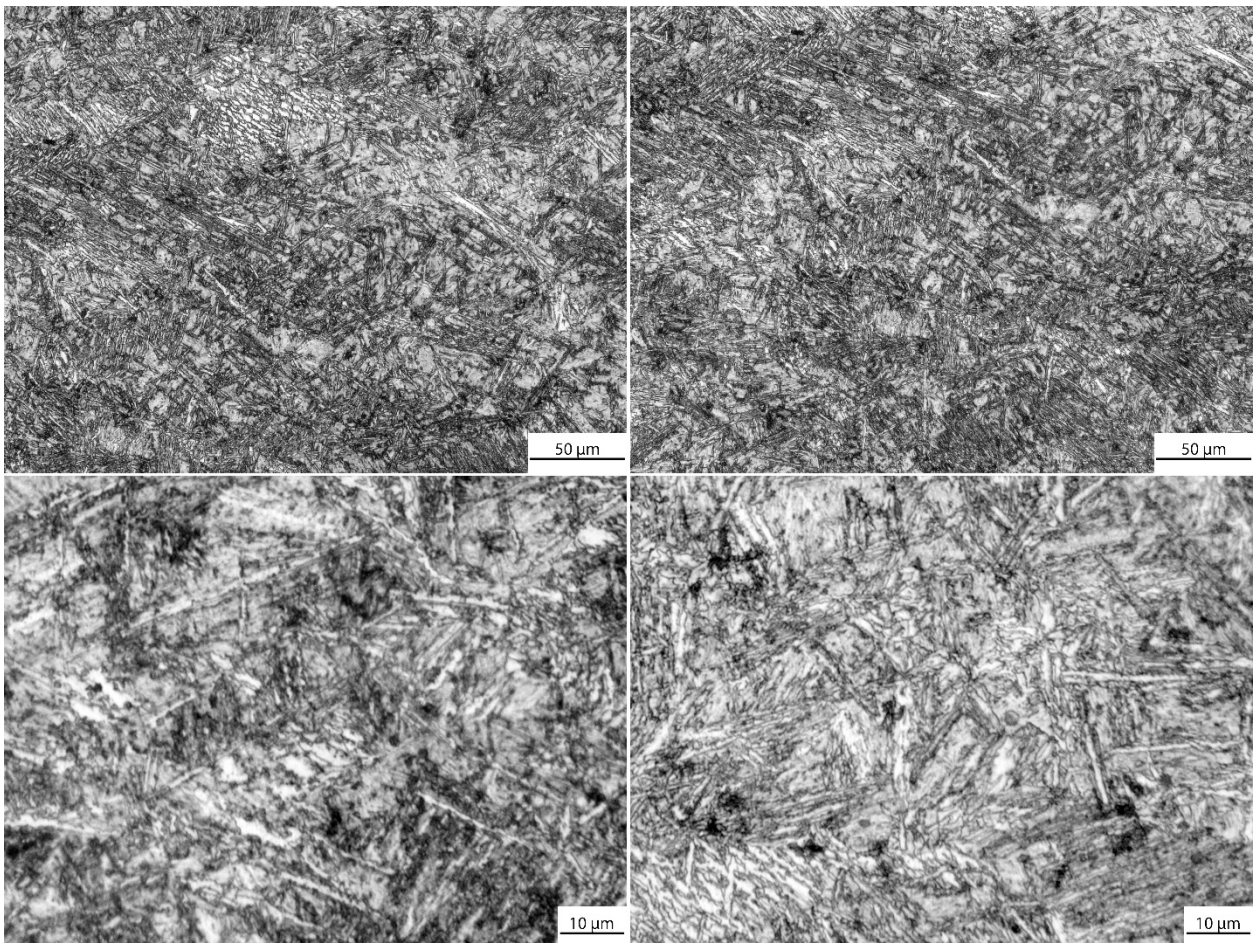


Рисунок 3.3.3 – Структура зразка №5 (10% TiC)

На фотографіях зразку №5 із добавленням 10% TiC, що зображені на рисунку 3.3.3, помітно ще сильніше подрібнення голок бейніту, але їх видовження не спостерігається. Стосовно орієнтованості голок помітне більш хаотичне їх розташування, навіть порівняно із контрольним зразком.

Структура зразку №9 із доданням 10% SiO_2, що зображена на рисунку 3.3.4, схожа на структуру зразка №4. Також помітне утворення зон однакової орієнтованості голок бейніту, та помітне їх видовження. Але на відміну від зразка №4 ширина голок бейніту схожа на таку, що були у зразку №1.

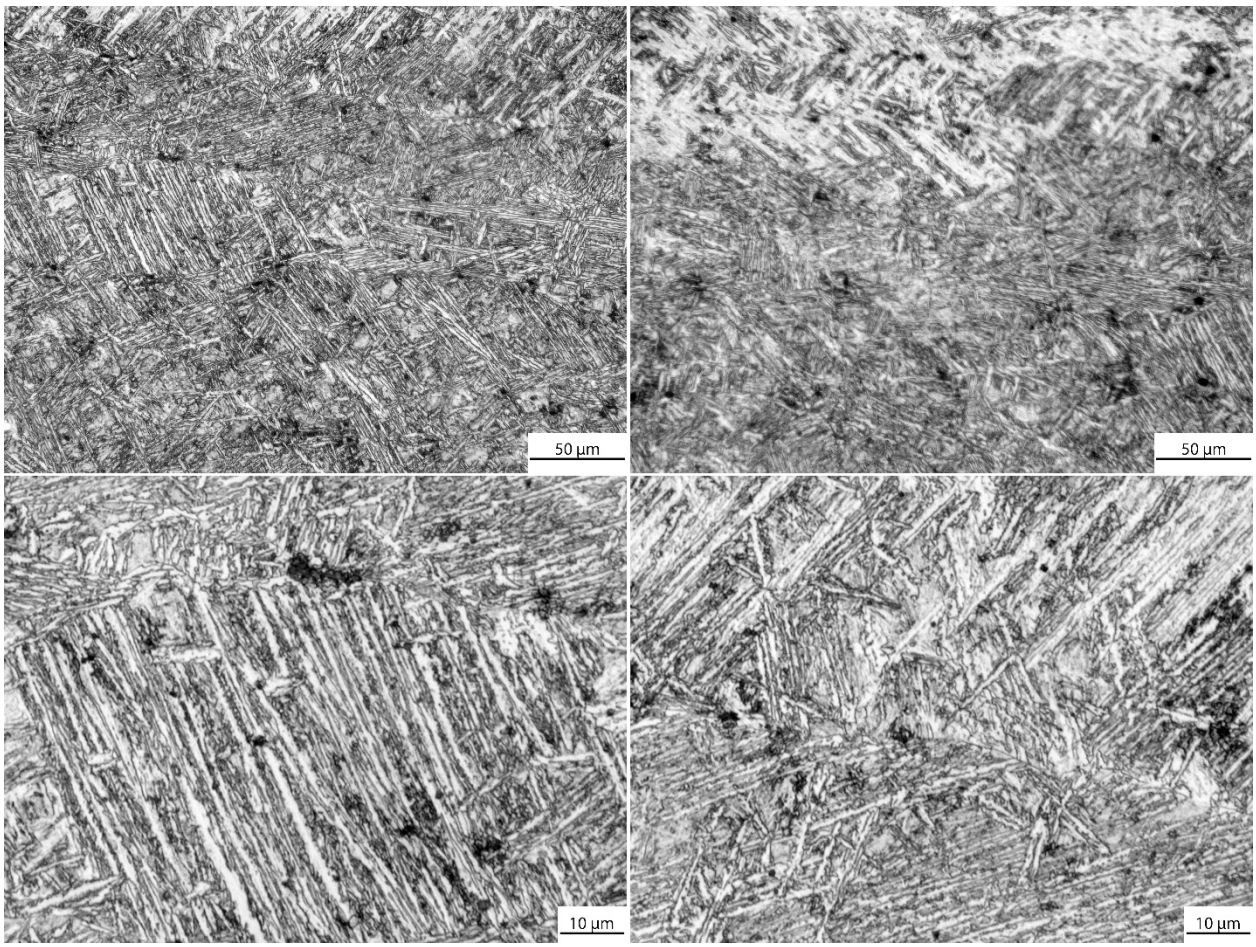


Рисунок 3.3.4 – Структура зразка №10 (10% SiO_2)

При аналізі цих фотографій помітний взаємозв’язок між зносостійкістю і структурою: чим більше подрібнена структура металу, тим більше його зносостійкість.

3.3 Вплив нанокарбідів на мікротвердість наплавленого металу

Результати вимірювань мікротвердості наплавленого металу при введенні в зварювальну ванну нанопорошку карбіду титану приведено в таблиці. Графічне порівняння отриманих даних показано на рисунку.

Таблиця 3.3.1 – Мікротвердість наплавленого металу

№ Зразка	Склад зразка	Виміряні значення твердості, ГПа					Середнє значення мікротвердості HV, ГПа
1	без добавок	2,54	2,54	3,22	2,97	2,74	2,8
2	0,5% TiC	3,51	3,51	4,64	2,97	3,83	3,69
3	1% TiC	3,51	2,97	2,97	3,83	3,51	3,34
4	5% TiC	3,83	3,83	4,2	4,2	4,2	4,05
5	10% TiC	3,83	3,51	3,83	3,83	3,51	3,7
6	1% SiO_2	3,51	3,22	3,51	3,22	2,74	3,24
7	5% SiO_2	2,97	2,74	3,22	4,2	3,22	3,27
8	7% SiO_2	2,97	2,74	2,97	2,97	2,97	2,92
9	10% SiO_2	2,74	3,22	3,51	3,51	3,51	3,3

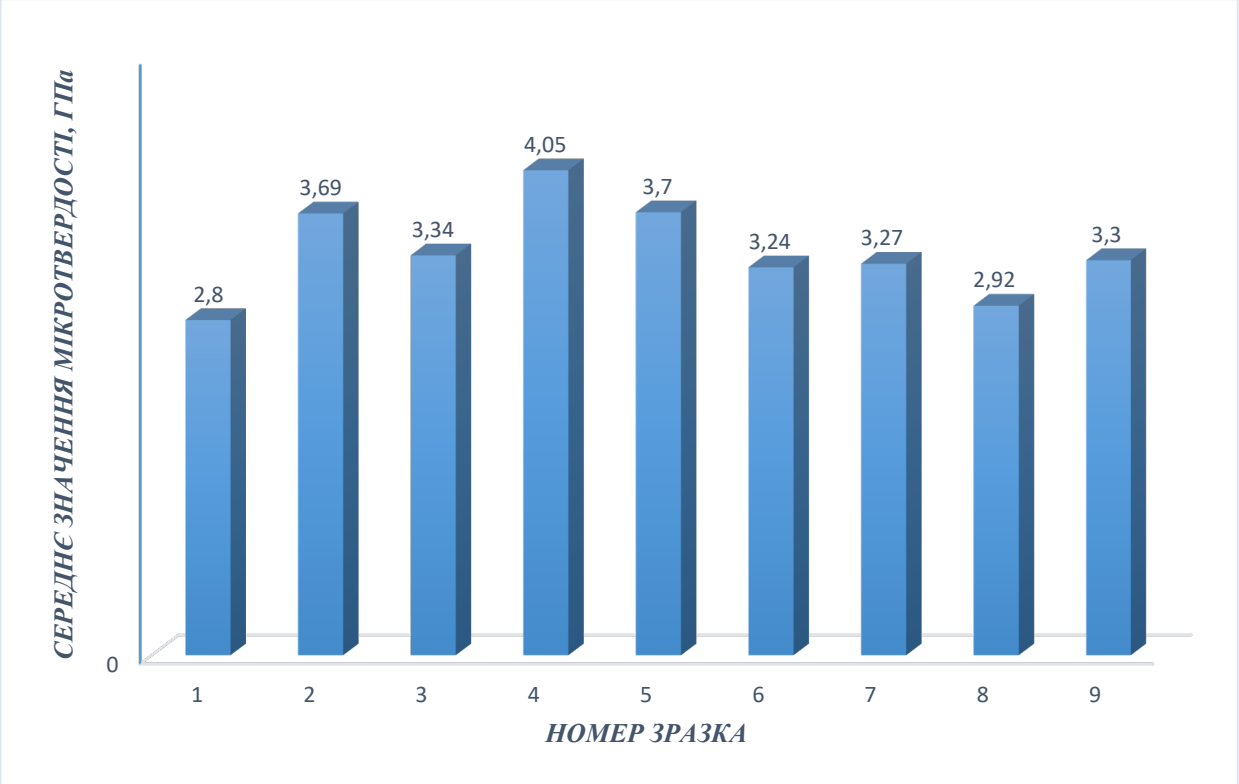


Рисунок 3.3.1 – Порівняння середніх значень мікротвердості зразків

Вимірювання показали, що із введенням нанопорошку як карбіду титану так і діоксиду кремнію мікротвердість зростає. Найвища мікротвердість у зразка №4 (5% TiC), при тому, що найбільш зносостійким є зразок №5. Таким чином залежність між мікротвердістю наплавленого металу і зносостійкістю в даному випадку не спостерігається.

3.4 Аналіз розподілу неметалевих включень в наплавленому шарі

Для обробки результатів розподілу неметалевих включень було обрано ті ж самі зразки, що і для визначення структури, а саме зразки №1, №4, №5, №9. Фотографії, зроблені для даного аналізу зображені на рисунках 3.4.1, 3.4.3, 3.4.5 та 3.4.7. Для оцінки кількості неметалічних включень на цих зображеннях було використано комп'ютерний метод підрахунку неметалічних включень. Після комп'ютерного підрахунку дані виглядають як довгий перелік розмірів діаметрів включень, і для зручнішого сприйняття ці дані виведені в графічні гістограми що зображені на рисунках 3.4.2, 3.4.4, 3.4.6, та 3.4.8. Зразки для визначення неметалічних включень були виготовлені згідно ГОСТ 1778-70 «Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений».

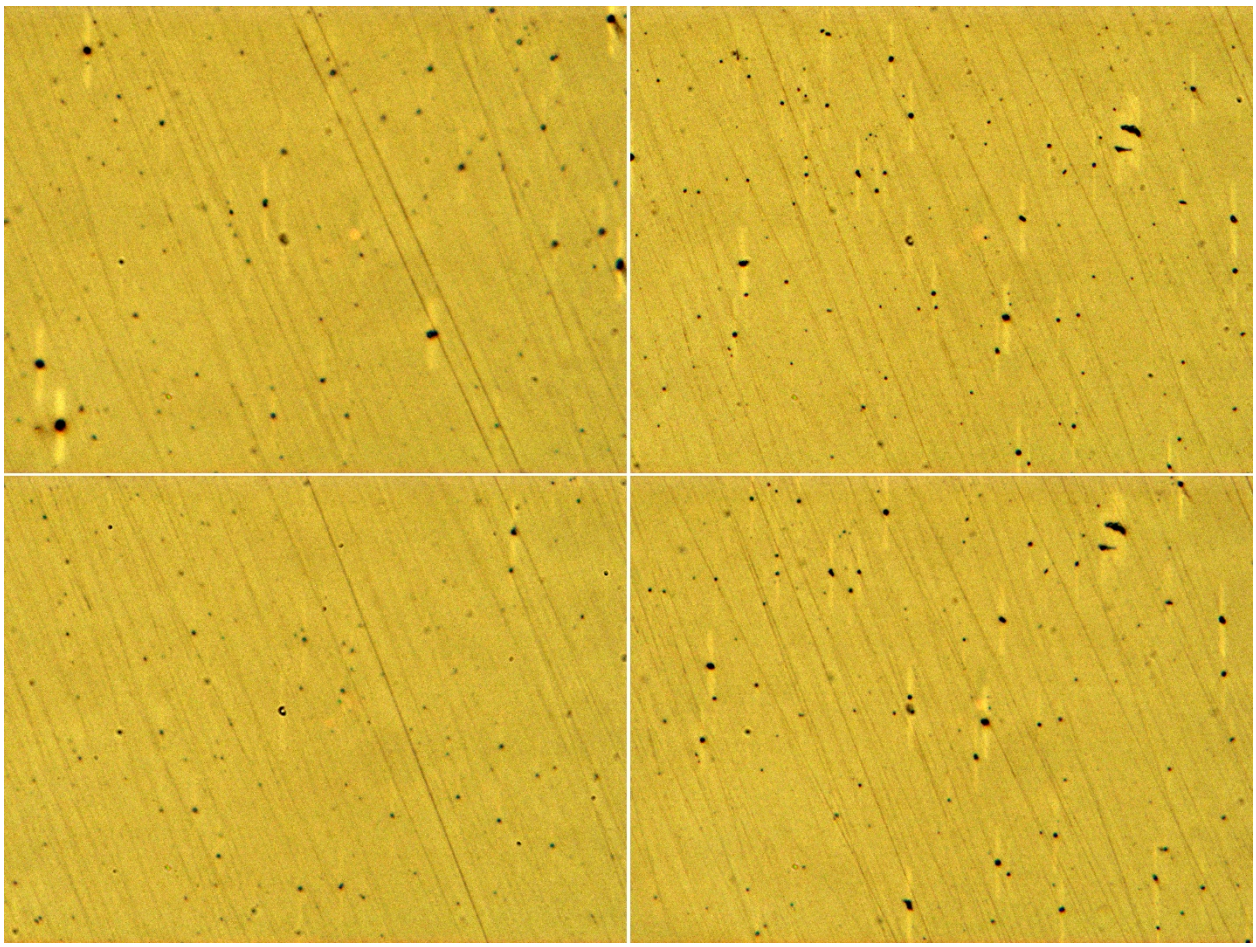


Рисунок 3.4.1 Неметалічні включення зразка №1

Після підрахунку було отримано такі дані:

d_{min} = 0.0746 мкм;

D_{max} = 2,0390 мкм;

$\Sigma_{вкл}$ = 471,00 шт

Доля включень = 0,29 %

де: d_{min} – мінімальний діаметр включення; D_{max} – максимальний діаметр включення; $\Sigma_{вкл}$ – загальна кількість включень.

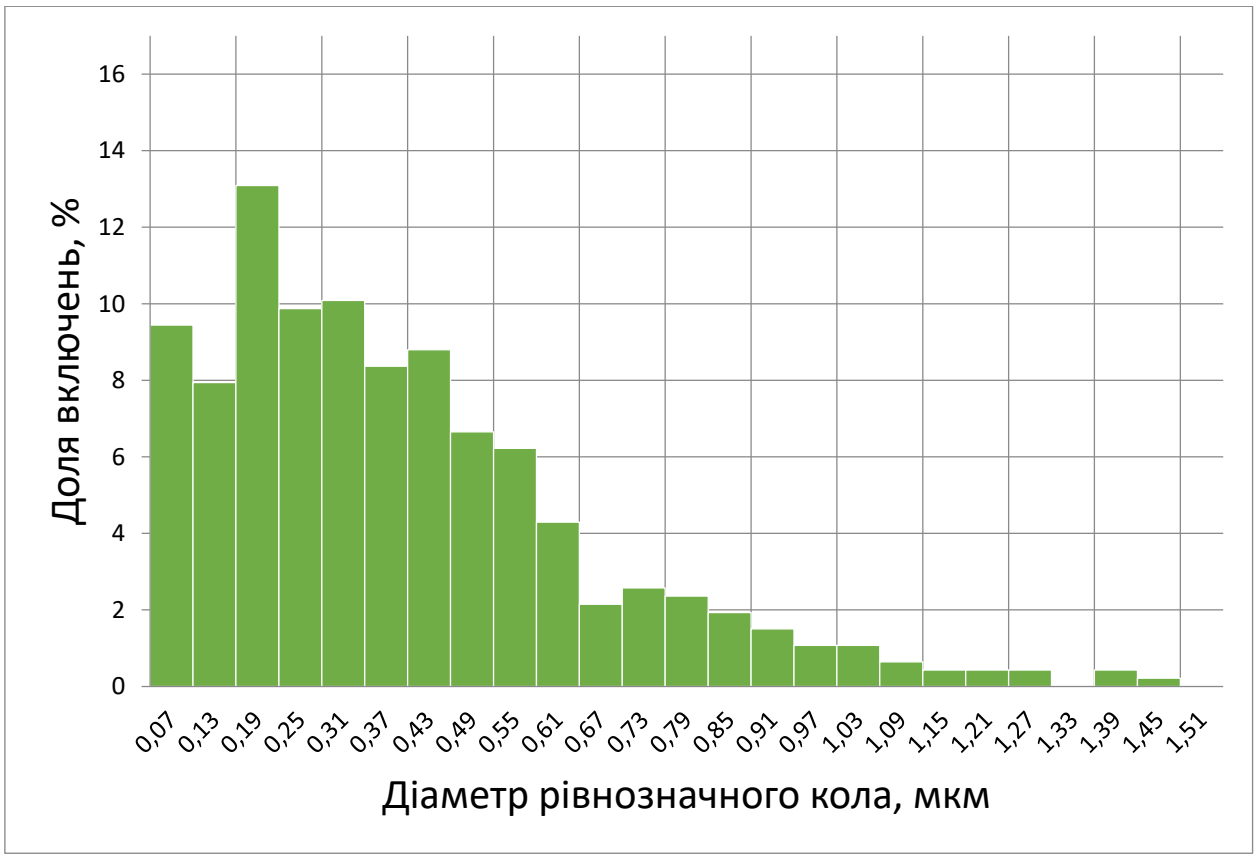


Рисунок 3.4.2 – Гістограма включень зразку №1

Гістограма зразку №1, що зображена на рисунку 3.4.2, показує що найбільша кількість включень має діаметр до 0,6 мкм. Включення на проміжку від 0,7 мкм до 0,6 мкм розподілені приблизно рівномірно.

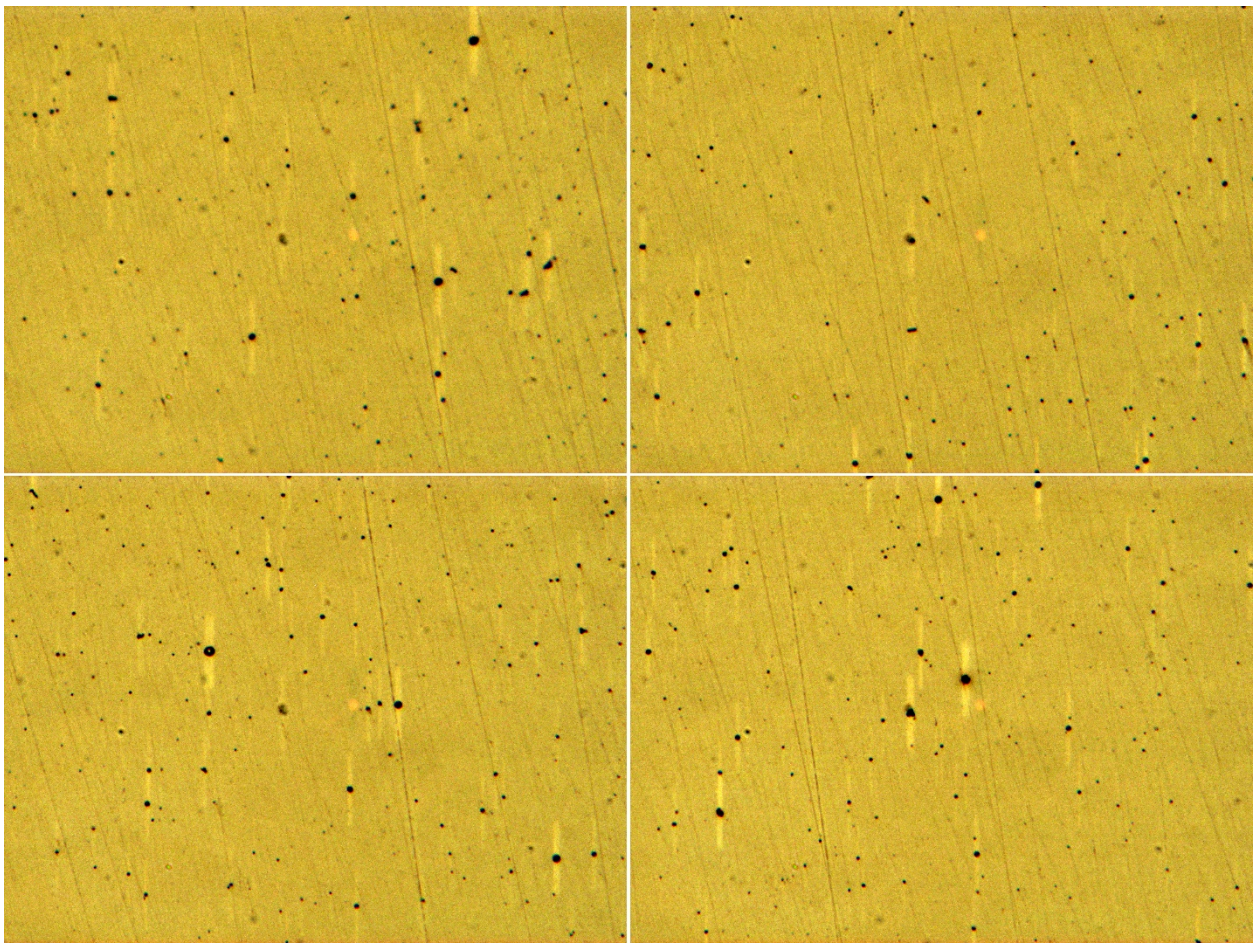


Рисунок 3.4.3 – Неметалічні включення зразка №4

Підрахунок даних по фотографіям зразку №4, що зображені на рисунку 3.4.3 дав такі результати:

d_{min} = 0.0746 мкм;

D_{max} = 1,9591 мкм;

$\Sigma_{вкл}$ = 584 шт

Доля включень = 0,30 %

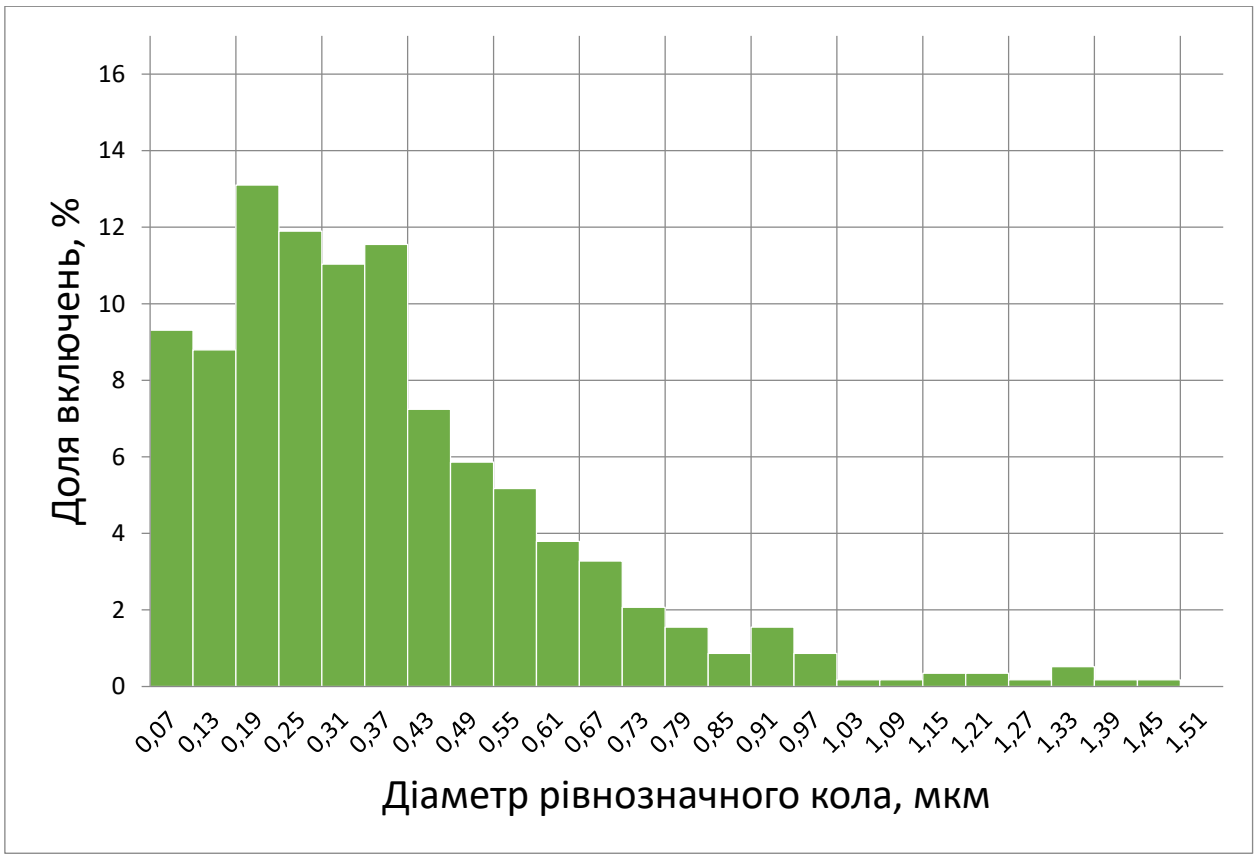


Рисунок 3.4.4 – Гістограма включень зразку №4

Гістограма даних зразка №4, що зображена на рисунку 3.4.4, показує що при введенні 5% карбіду титану бачимо невеликий приріст неметалічних включень, та слабке подрібнення діаметру включень, хоча різниця малопомітна.

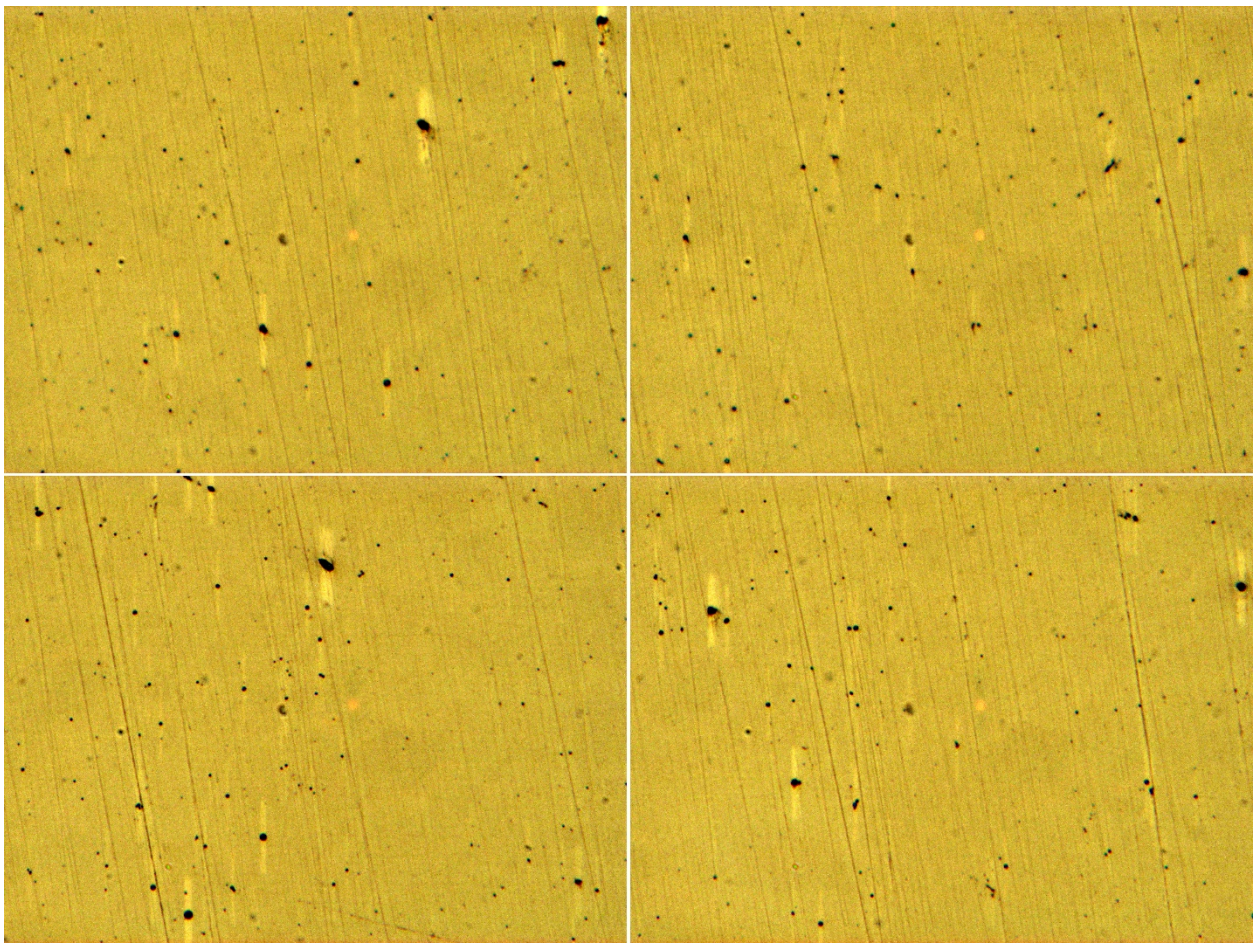


Рисунок 3.4.5 – Неметалічні включення зразка №5

Підрахунок даних по фотографіям зразку №4, що зображені на рисунку 3.4.5 дав такі результати:

d_{min} = 0.0746 мкм;

D_{max} = 2,0467 мкм;

$\Sigma_{вкл}$ = 740 шт

Доля включень = 0,33 %

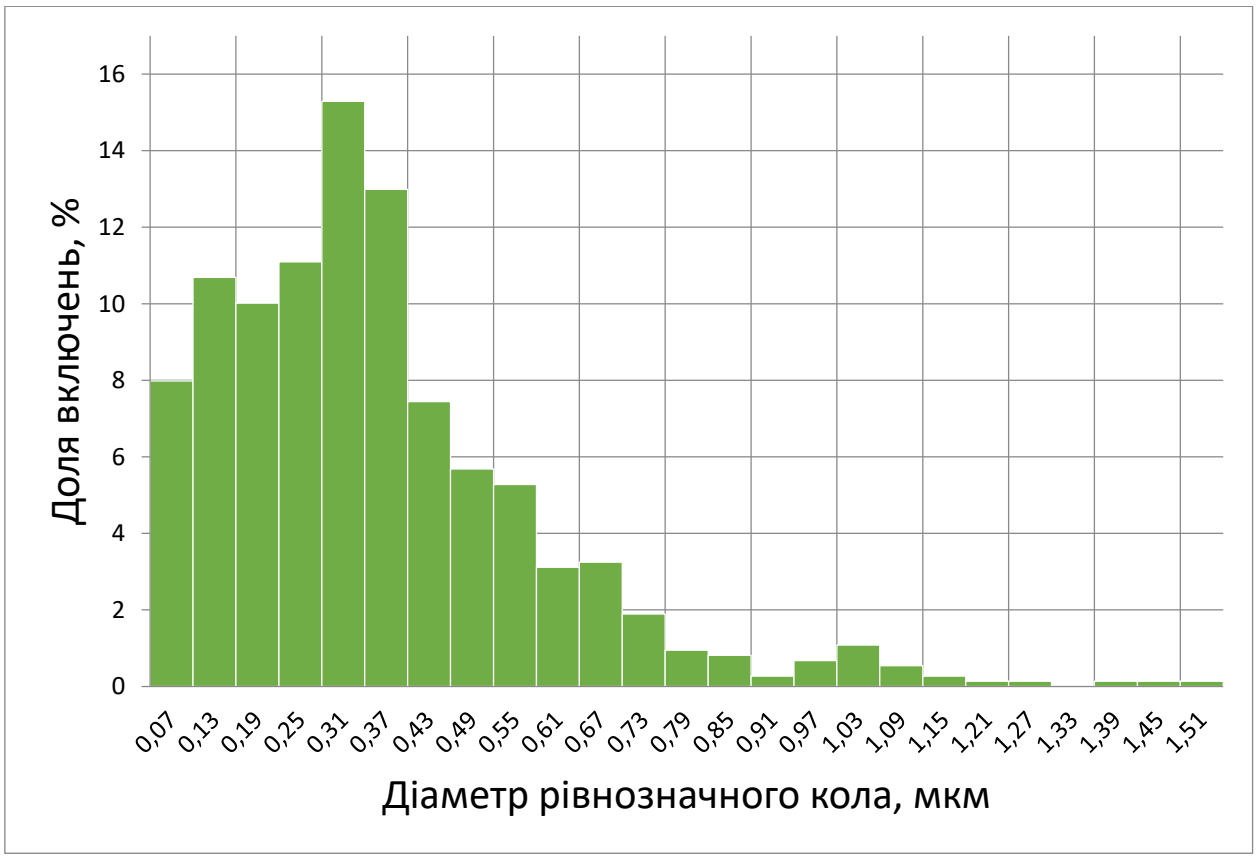


Рисунок 3.4.6 – Гістограма включень зразку №5

На гістограмі №5, що зображена на рисунку 3.4.6, що характеризує кількість неметалічних включень у зразку №5, із 10% карбіду титану, помітно збільшення кількості неметалічних включень відносно зразку №4. Можна зробити пропущення про прямо пропорційну залежність між кількістю введеного нанокомпоненту і кількості включень. Помітно утворення більшої кількості одноманітних включень, а саме розмірами від 0,31 до 0,43 мкм. Також, виходячи із цих даних, можна припустити що введення карбіду титану спричиняє утворення неметалічних включень саме такого розміру.

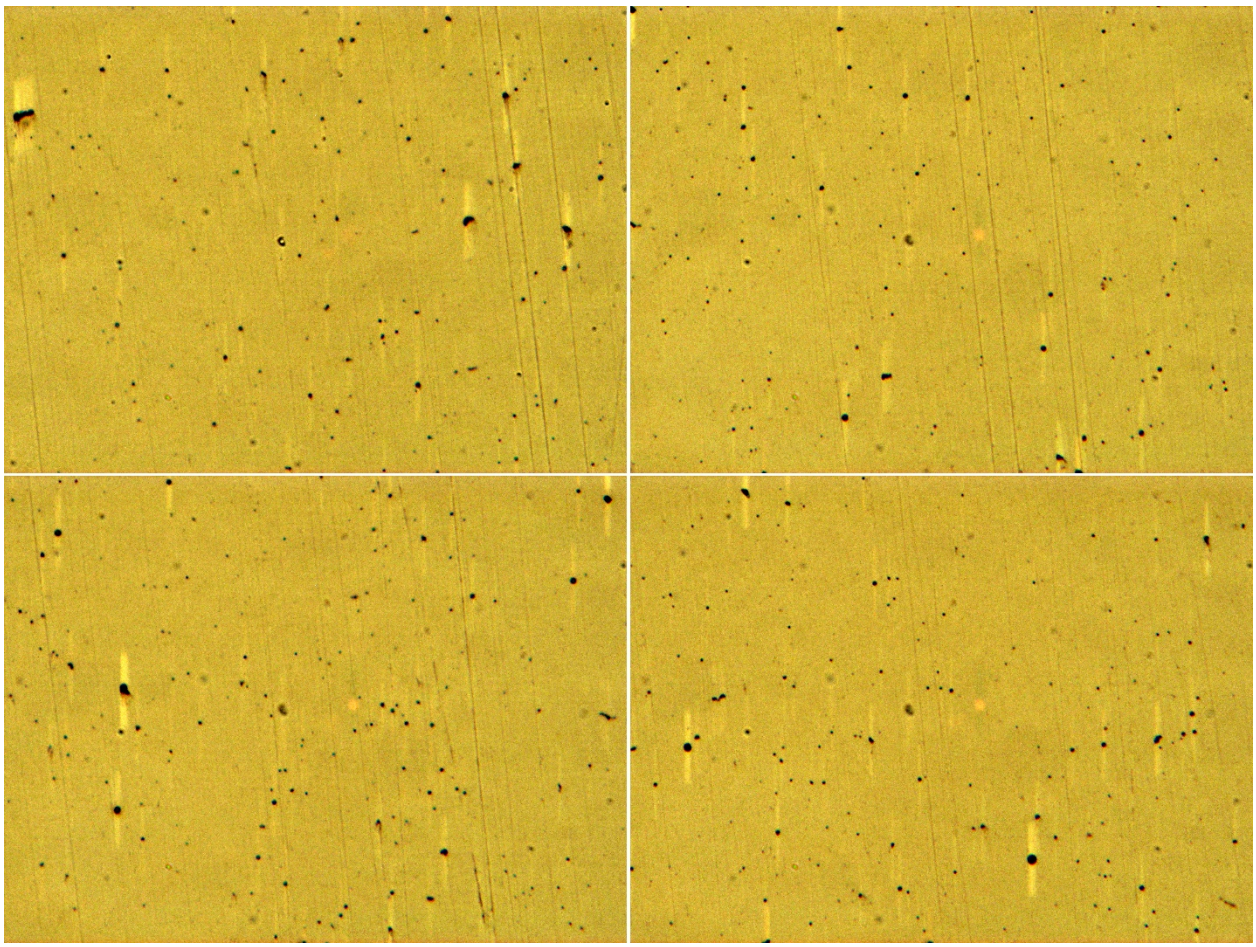


Рисунок 3.4.7 – Неметалічні включення зразка №9

Підрахунок даних по фотографіям зразку №4, що зображені на рисунку 3.4.7 дав такі результати:

d_{min} = 0.0746 мкм;

D_{max} = 1,6261 мкм;

$\Sigma_{вкл}$ = 658 шт

Доля включень = 0,34 %

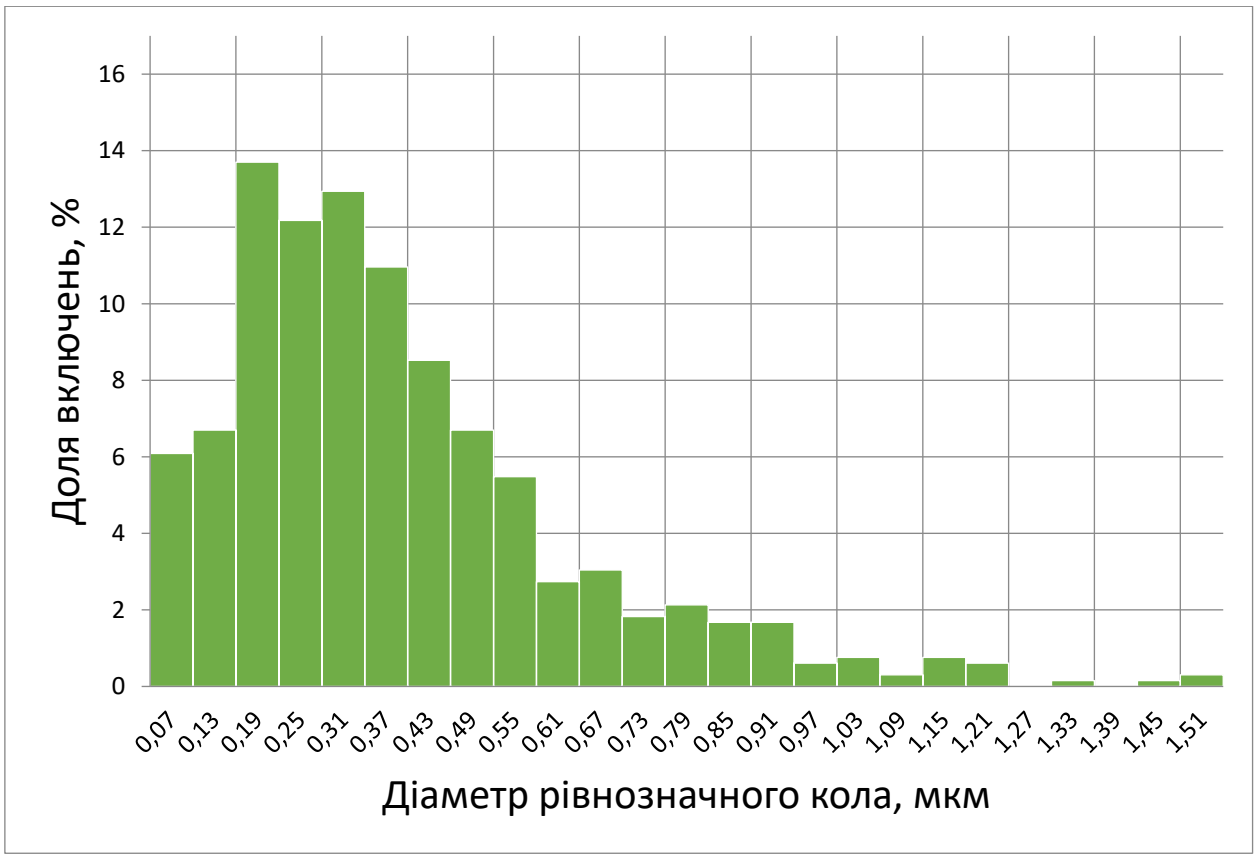


Рисунок 3.4.8 – Гістограма включень зразку №9

Гістограма неметалічних включень зразку №9, що зображено на рисунку 3.4.8, також демонструє збільшення кількості неметалічних включень відносно контрольного зразку і має найвищу їх долю серед випробуваних, але за розмірами ці частинки більше сконцентровані у проміжку від 0,19 до 0,49 мкм, також відрізняється зменшенням кількості частинок меншого діаметра.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Метою та завданням даного розділу є зменшення або в деяких випадках виключення небезпечного та шкідливого впливу процесів на працівників під час дугового наплавлення.

Під час дугового наплавлення під флюсом на працівника впливає комплекс шкідливих і небезпечних виробничих факторів: шкідливі речовини; інфрачервоне випромінювання в оптичному діапазоні; шум роботи установки; електричний струм; механізми і вироби, що рухаються.

Для забезпечення повної безпеки при наплавленні необхідно виконати комплекс заходів, що відповідають вимогам законів про охорону праці, санітарним нормам і іншим нормативним актам, інструкціям з безпеки праці. Також повинні враховуватися вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях.

4.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів

За своїм походженням та природою дії на організм людини шкідливі та небезпечні виробничі фактори поділяють на фізичні, хімічні, психофізіологічні, біологічні та соціальні [40].

Процеси зварювання, наплавлення, різання, напилення, пайка металів та інші споріднені процеси супроводжуються рядом шкідливих та небезпечних виробничих наслідків [41]. Хімічні і фізичні шкідливі та небезпечні виробничі фактори, які виникають під час дугового наплавлення приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Шкідливі та небезпечні виробничі фактори при наплавленні під флюсом [42]:

Шкідливі виробничі фактори: - шкідливі речовини; - інфрачервоне випромінювання в оптичному діапазоні - шум.	 XX XX X
Небезпечні виробничі фактори: - електричний струм; - механізми і вироби, що рухаються;	 XX XX
Примітки: XX - інтенсивний фактор; X - помірний фактор.	

При наплавленні в зону дихання працюючих можуть потрапляти зварювальні аерозолі, у складі яких присутні оксиди різноманітних металів (марганцю, титану, алюмінію, заліза тощо) та інші сполуки, а також токсичні гази (оксид вуглецю, оксиди азоту, озон, фтористий водень, та ін.) [45].

Разом з пилом в виробничому середовищі розповсюджуються шкідливі гази. Під час зварювального процесу в повітря робочої зони надходить суміш газів, що утворюються в результаті термічної дисоціації газошлакоутворюючих компонентів, які входять до складу зварювальних матеріалів.

Кількість, склад і токсичність зварювальних аерозолів залежать від хімічного складу зварювальних матеріалів і виду технологічного процесу [43].

Джерелами підвищеного шуму є зварювальне устаткування. Рівень шуму, що створюється дугою, залежить від режиму наплавлення. Крім шуму, створеного дугою та зварювальним обладнанням, на працюючих можуть здійснювати вплив і інші джерела шуму, що створюються при роботі технологічного обладнання.

Причиною ураження електричним струмом може бути дотик до відкритих струмоведучих частин, які перебувають під напругою: до знеструмлених струмоведучих частин, на яких напруга виникає випадково; до

неструмоведучих частин, що виявилися під напругою через дефекти ізоляції; враження електричною дугою і кроковою напругою.

Оскільки дипломна робота описує вплив нанопорошку на наплавлений метал, то одним із небезпечних факторів є наноматеріали, і їх використання супроводжується особливими ризиками. Необхідно встановити правила техніки безпеки відповідно до ризиків із метою зниження впливу шкідливих чинників на робітника або робітників.

З точки зору охорони здоров'я робітників найнебезпечнішим видом наноматеріалів є сухі наночастинки, їх скупчення і агрегати – саме в такому вигляді і поставляється нанопорошок, застосований при дослідженнях. При виготовленні свічок для наплавлення потрібно виконувати роботу вдягнувши захисні гумові рукавиці та захисний одяг, оскільки порошок нанорозмірного діапазону може потрапляти у відкриті пори шкіри, а також носити спеціальні респіратори, що можуть затримувати настільки дрібні частинки. Хоча в даний час немає загальноприйнятого керівництва, заснованого на наукових даних, про вибір захисного одягу та інших засобів захисту від впливу наночастинок, а також мінімальна кількість інформації про ефективність існуючих засобів індивідуального захисту, близько 84% роботодавців вимагають застосування даних засобів, при роботі з наноматеріалами. На робочому місці використання захисного одягу значно знижує вплив на шкірні покриви [44]. Для поліпшення умов праці також можна постійно очищувати повітря в приміщенні.

4.2 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

4.2.1 Вимоги до технологічного процесу наплавлення

Організація і робочі місця облаштовані згідно ДСТУ 2456-94. Робоче місце щодо розташування робочої поверхні, органів управління та контролю згідно вимогам ГОСТ 12.2.032-78, ГОСТ 12.2.033-78.

Вимоги безпеки праці до процесу дугового наплавлення мають відповідати ДСТУ 2456-94.

Обов’язковим є застосовування пристроїв місцевої витяжної вентиляції з системами очищення видаленого повітря від аерозолю та газів у відповідності з вимогами ДБН В.2.5-67:2013.

Допустимі рівні шуму встановлені ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку».

На обладнання, що гучно шумить, встановлюють, якщо це можливо за умовами його експлуатації, спеціальні звукоізолюючі кожухи. Зниження шуму вентиляційних установок, що обслуговують зварювальні ділянки і пости, досягається встановленням у всмоктувальних і нагнітаючих повітропроводах глушників шуму – трубчастих або пластинчастих.

Освітлення робочого місця організовано у відповідності до вимог ДБН Б.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення».

Для безпечного переміщення механізмів необхідно перевіряти їх надійність та правильність закріплення, а також надійність кріплення ходового механізму.

4.2.2 Вимоги до системи вентиляції

Для видалення аерозолів і газів, що утворюються при наплавленні в виробничому приміщенні застосовується загальнообмінна механічна вентиляція.

При проектуванні вентиляції необхідно дотримуватися таких вимог:

- вентиляція має забезпечувати необхідну чистоту повітря та параметри мікроклімату виробничого приміщення відповідно до ГОСТ 12.1.005-88;
- загальнообмінна вентиляція має забезпечувати ефективний баланс між об'ємами повітря, що надходять до приміщення та видаляються з нього;
- система вентиляції не повинна створювати додаткових шкідливих і небезпечних факторів (переохолодження, перегрів, шум, вібрація);
- вентиляційне обладнання не повинно знижувати продуктивність праці та впливати на якість продукції;

- вентиляція повинна забезпечувати економічність та надійність при експлуатації.

З метою запобігання забрудненню атмосфери шкідливими речовинами, які знаходяться в вентиляційному повітрі, згідно ДСТУ ISO 14001-2006 необхідно здійснювати регулювання параметрів повітряного середовища.

4.2.3 Засоби індивідуального захисту

Захисна одежа, яка використовується під час наплавлення та супутніх процесів згідно вимогам ДСТУ EN 470-1:2003 «Одяг захисний, який використовують під час зварювання та інших високотемпературних процесах. Частина 1. Загальні вимоги».

Спеціальне взуття повинно відповідати вимогам ГОСТ 12.4.032-77 «ССБТ. Обувь специальная кожаная для защиты от повышенных температурю. Технические условия». Забороняється працювати у взутті з відкритою шнуровкою чи металічними цвяхами в підошві.

4.2.4 Електробезпека

Зварювальне обладнання, що застосовується у технологічних процесах наплавлення використовується згідно таких нормативних документів: ДНАОП 0.00-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» та ДНАОП 0.00-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок».

Біля роз’ємів (затискачів) для підключення джерел живлення повинен бути напис «МЕРЕЖА!». На видному місці корпусу джерела живлення повинен бути напис «Без заземлення не вмикати!».

Вимоги до виконання захисного заземлення на всіх видах зварювального обладнання та гранично допустимі рівні напруги дотику та струмів, що можуть виникати на зварювальному обладнанні, мають відповідати ПУЕ-2017.

Зварювальне обладнання повинно бути обладнане вольтметром або сигнальною лампочкою, які вказають на наявність або відсутність напруги у зварювальному колі.

З’єднування джерел живлення зі зварювальними установками при дуговому наплавленні повинно здійснюватися кабелями. Окремі елементи зварювального кола, а також відрізки зварювальних кабелів при нарощувані довжини повинні бути з’єднані роз’ємними з'єднувальними муфтами. Струмопідвідні кабелі зварювального кола повинні бути по всій довжині ізольовані та захищені від механічних ушкоджень.

Зворотним проводом, що з’єднує зварювальні вироби з джерелом зварювального струму, можуть слугувати гнучкі, а також металічні шини достатнього перерізу, зварювальні плити і сама зварювана конструкція.

Кожен пульт керування повинен бути обладнаний апаратом ручного аварійного відключення. Зварювальні установки мають бути захищені запобіжниками або автоматами зі сторони мережі живлення.

Електрозварювальний інструмент не повинен мати відкритих струмоведучих частин, а рукоятки необхідно виготовляти із струмоізолюючих матеріалів. Забороняється залишати на робочому місці електрозварювальний інструмент, що знаходиться під напругою.

4.3 Розрахунок інженерного рішення

Згідно з ДСТУ 2456-94 при дуговому наплавленні повинна використовуватись місцева вентиляція. В якості місцевої вентиляції будемо використовувати пересувний фільтровентиляційний агрегат «Темп-2000» (див. рис. 4.3).

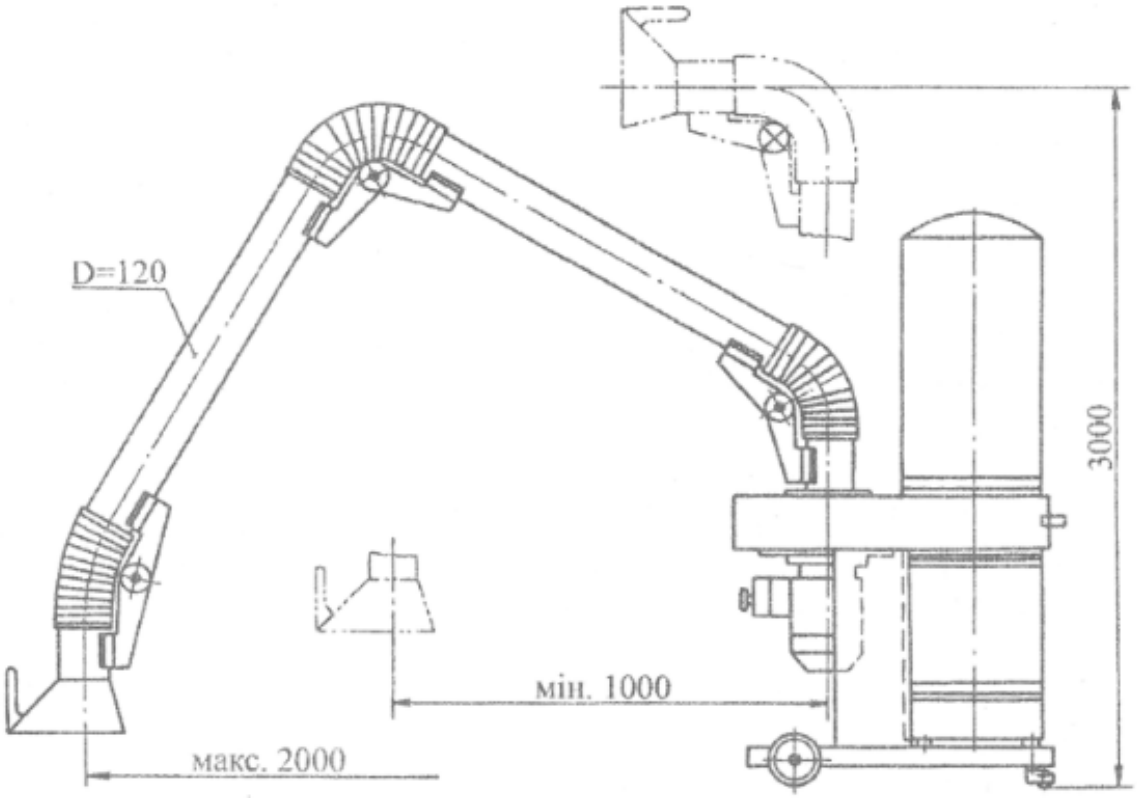


Рисунок 4.3 - Пересувний фільтровентиляційний агрегат «Темп-2000» [45].

Пересувні фільтровентиляційні агрегати дозволяють видаляти забруднене повітря з мінімальної відстані від місця наплавлення, очищати і повертати в приміщення, або викидати за його межі. Для використання пересувних фільтровентиляційних агрегатів не треба виконувати монтажні роботи, їх можна переміщувати в будь-яке місце, а всмоктуючий отвір повітропровода, шляхом його згинання і повертання завдяки спеціальному фіксуючому механізму, можна встановлювати на мінімальній відстані від зварювальної дуги.

Пересувні фільтровентиляційні агрегати характеризуються високим ступенем уловлювання шкідливих речовин та економією енергії за рахунок рециркуляції повітря.

Розрахунок об’єму повітря, яке необхідно видалити місцевою вентиляцією $L_{\text{м}}$, більш доцільно визначати, виходячи з заданої швидкості всмоктування біля джерела виділення шкідливих речовин, характеристики спектру швидкостей всмоктування для певної конструкції всмоктувального

отвору та наявності поверхонь, що огороджують зону всмоктування. В цьому випадку:

$$L_{\text{м}} = 3600 F_0 V_0, \quad (4.3.1)$$

де F_0 – площа відкритого перерізу витяжного отвору відсмоктувача, м^2; V_0 – швидкість всмоктування повітря в отворі відсмоктувача, м/с.

Площу F_0 визначають конструктивними особливостями технологічного обладнання та вибраного витяжного пристрою.

$$F_0 = \pi r^2, \quad (4.3.2)$$

де π – математична константа; r – радіус вхідного отвору відсмоктувача, 0.06 м.

$$F_0 = 3.14 \cdot 0.06^2 = 0.011 \text{ м}^2$$

Значення V_0 знаходять виходячи з умов забезпечення заданої швидкості повітря V_{x} в зоні наплавлення на відстані X (м) від центра всмоктуючого отвору.

Швидкість руху повітря, що створюється місцевими відсмоктувачами біля джерел виділення шкідливих речовин, для дугового наплавлення повинна бути не більше $V_{\text{x}} = 0.5$ м/с.

Для витяжних пристроїв найпростішої форми швидкість всмоктування повітря розраховується за формулою:

$$V_0 = 16 V_{\text{x}} (\text{X}/d)^2, \quad (4.3.3)$$

де d – діаметр вхідного отвору відсмоктувача, 0.12 м; X – відстань від всмоктуючого отвору до зони наплавлення, 0.12 м.

$$V_0 = 8 \cdot 0.5 \cdot (0.12/0.12)^2 = 4 \text{ м/с}$$

Об’єм повітря, яке необхідно видалити місцевою вентиляцією:

$$L_{\text{м}} = 3600 \cdot 0.011 \cdot 4 = 158 \text{ м}^3/\text{год}$$

4.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

До видів небезпеки, що можуть статися на виробництві, належать: пожежа; вибух (усередині обладнання, будівлях або навколишньому середовищі); розрив або руйнування обладнання; викид шкідливих речовин;

сполучення перелічених видів небезпеки. З метою запобігання виникненню та ліквідації надзвичайних (аварійних) ситуацій на підприємстві має бути план локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій. Під час аналізу небезпеки підприємства (об'єкта) потрібно визначити всі можливі аварійні ситуації і аварії, в тому числі й малоймовірні, з катастрофічними наслідками, які можуть виникати на підприємстві, розглянути сценарії їхнього розвитку і оцінити наслідки. Виявлення можливостей і умов виникнення аварій має виконуватись на основі аналізу особливостей роботи як окремого обладнання (апаратів, машин тощо), так і їх групи (технологічних блоків), а також з урахуванням небезпечних властивостей речовин і матеріалів (вибухопожежонебезпечних та шкідливих), що використовуються у виробництві. При цьому слід враховувати параметри стану речовин (температура, тиск, агрегатний стан тощо) і стан обладнання, які відповідають як нормальному технологічному режиму, так і режимам, які можливі при настанні й розвитку аварії.

4.4.1 Пожежна безпека

Згідно з НАПБ Б.07.005-86 приміщення, у яких виконуються зварювальні роботи, за вимогами вибухопожежної небезпеки належить до категорії Г (негорючі речовини й матеріали у гарячому, розжареному, розплавленому станах, процеси обробки яких супроводжуються виділенням променистої теплоти, іскор та полум´я; горючі гази, рідини, тверді речовини, які спалюються чи утилізуються у вигляді палива).

Пожежна безпека (ГОСТ 12.1.004-85) забезпечується:

- запобігання спалаху ізоляції при короткому замиканні за рахунок максимального струменевого захисту;
- запобігання утворенню горючого середовища за рахунок надійної герметизації обладнання, обмеженням застосування і зберігання горючих і вибухонебезпечних речовин;
- застосування пожежної сигналізації з датчиком ИДФ-І;
- використанням вогнегасників типу ОП-10А;

- ретельним оглядом робочого місця перед початком зміни.

При організації технологічного процесу дотримуються усіх вимог електростатичної іскробезпеки (ГОСТ 12.1.018-79).

Передбачається також аварійне зливання пожежонебезпечних рідин, аварійне втравлювання горючих газів із апаратури.

Рекомендована періодична очистка робочого місця цеху, апаратури від горючих відходів, відкладання пилу, вилучення пожежонебезпечних відходів виробництва, використання технічних миючих засобів

Пожежна безпека при електрозварювальних роботах повинна бути забезпечена регламентацією виконання, застосування і режиму експлуатації електрозварювальних установок та іншого обладнання, матеріалів і виробів, які можуть стати джерелами підпалення горючої середи. При ведені робіт по наплавленню в небезпечних зонах ставлять спеціальні пожежні пости. По закінченні зміни зварювальник повинен перевірити робочу зону і не залишати відкритого вогню. Слід бути обережним при переміщенні зварювальних проводів, оскільки особливу небезпеку викликає іскріння їх в місцях, віддалених від зварювальника. При виникненні полум’я в середині корпуса машини необхідно негайно залишити машину, виключити рубильник, відкрити двері машини і гасити полум’я сухим вогнегасником або сухим піском.

Приміщення обладнується засобами колективного та індивідуального захисту людей від небезпечних факторів пожежі та протидимного захисту.

На дільницях виробничого приміщення, де застосовується наплавлення, передбачаємо встановлення протипожежних щитів, укомплектованих вуглекислотними вогнегасниками, баграми, ломами, відрами, сокирами. Біля щитів передбачаємо наявність ящиків з піском, сухість якого регулярно перевіряється. Для гасіння можливих пожеж передбачаємо також використання азбестових покривал.

Для автоматичного виявлення пожеж в виробничому приміщенні, в якому виконується наплавлення, передбачаємо наявність датчиків, які

своєчасно сповіщають про виниклу пожежу і дають команду на вмикання автоматичної системи гасіння пожежі.

4.4.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У випадку пробою електричної напруги на корпус зварювального агрегату необхідно відключити рубильник і довести до відома про це майстра або начальника дільниці.

У випадку потрапляння кого-небудь під напругу, необхідно відключити зварювальний агрегат від мережі, покласти потерпілого на дерев’яний настил, підклавши під голову ватник, викликати лікаря за телефоном 103 і, якщо це необхідно, зробити постраждалому штучне дихання.

У випадку загорання зварювального агрегата необхідно відключити рубильник і приступити до гасіння пожежі за допомогою вогнегасника.

Кожен робітник і службовець, що виявив пожежу або загорання, зобов'язаний:

- негайно сповістити про це в пожежну охорону за телефоном 101;
- приступити до гасіння вогню пожежі наявними в цеху (на дільниці) засобами пожежогасіння (вогнегасник, пісок, пожежний кран тощо);
- викликати до місця пожежі посадових осіб (начальника цеху, дільниці).

У випадку отримання травми необхідно довести до відома про це майстра, начальника дільниці та звернутися в медпункт.

5 СТАРТАП-ПРОЕКТ

Стартап, за визначенням, – нещодавно створена компанія (можливо, ще не зареєстрована офіційно, але планує стати офіційною), що будує свій бізнес на основі інновацій або інноваційних технологій, не вийшла на ринок або почала на нього виходити і що володіє обмеженими ресурсами. Часто стартап-компанії називають «гаражними». Особливо часто термін «стартап» застосовується відносно інтернет-компаній та інших фірм, що працюють в сфері IT, проте, це поняття розповсюджується і на інші сфери діяльності [46].

Відповідно до визначення, стартапом може бути тільки створення продукту: програмного або поставленого на конвеєр фізичного. Адже тільки продукт, на відміну від послуги, можна відтворювати багаторазово, при цьому не збільшуючи штат співробітників пропорційно кількості продажів.

Для розроблення стартап проекту було обрано деталь яку можна виготовити із застосуванням даного способу наплавлення – гальмівний диск.

5.1 Маркетинговий аналіз стартап-проекту

Ідея проекту у застосуванні наплавлення із введенням нанокомпоненту для створення більш витривалого гальмівного диску із недорогої сталевої основи. Найчастіше, виробники гальмівних дисків наголошують, що для безпечного їх застосування товщина самих дисків має бути не меншою ніж 5 мм (цифра іноді відрізняється). Отже для матеріалу основи візьмемо відносно дешеву сталь, і наплавимо зносостійкий шар із застосуванням нанопорошку карбіду титану.

Найчастіше гальмівні диски виготовляють з чавуну. Популярність цього матеріалу пояснюється хорошими фрикційними властивостями і невисокою вартістю виробництва. Поряд з цими перевагами, чавун має ряд істотних недоліків, які обмежують його використання в деяких типах транспортних засобів - спортивних машинах і мотоциклах. При регулярних інтенсивних

гальмуваннях, що викликають значне підвищення температури (400 С і вище), можливо викривлення диска, а якщо на його перегріту в таких режимах поверхню потрапляє вода, наприклад, з калюжі, чавунний диск покривається мережею тріщин і іноді навіть розсипається. Крім того, такі диски дуже важкі. Щоб уникнути цих недоліків, диски, більшою мірою мотоциклетні і значно рідше автомобільні, почали робити із нержавіючих сталей. Більш слабкі фрикційні властивості цього матеріалу компенсували збільшенням діаметра дисків і їх робочої поверхні. Для виготовлення цієї відповідальної деталі гальмівної системи використовують і звичайну сталь, яка, як і нержавіючі сталі, не настільки чутлива до перепадів температур і володіє кілька гіршими фрикційними властивостями, ніж чавун. Для збільшення коефіцієнту гальмування диск із менш фрикційними властивостями роблять більшого діаметру.

5.2 Організація стартап-проекту

Для початку виробництва необхідний перелік обладнання та матеріалів для виготовлення дисків. Спочатку механізація проекту може стосуватись тільки наплавлення, інші операції будуть робитися вручну. Отже, очистка, різання та підготовка матеріалу для наплавлення буде потребувати тільки робочого персоналу та ручного інструменту. Для надання диску необхідної форми необхідно проточити його на фрезерному верстаті.

Для наплавлення потрібна апаратура, що вказана у розділі 2. Перелічимо її: Автомат АД-231, Джерело живлення ВДУ – 1201К. Для фінішної обробки використаємо фрезерно-гравірувальний верстат з ЧПУ CNC-1325-A.

При умові використання лише одного автомату для наплавлення умовно можемо розрахувати кількість дисків, що будуть виготовлені за одну годину. При ідеальних умовах час на зміну однієї заготовки на іншу буде займати не більше однієї хвилини, а отже увесь інший час вважатимемо часом наплавлення.

Диск має розмір внутрішнього діаметра 165 мм, а зовнішнього 265 мм, ширина наплавляємої частини 100мм. Ширина валика, яку отримували при наплавленні дорівнювала 10мм, отже для наплавлення потрібно 10 проходів. Просумувавши суму довжин наплавлених цілець отримаємо загальну довжину наплавленого валику – 6,56 м. При швидкості наплавлення у 16 м/год кількість наплавлених дисків буде досить малою для ефективного застосування обладнання, і тому має сенс використання багатоелектродного наплавлення або наплавлення стрічкою.

5.3 Фінансово економічний аналіз

Для аналізу ринкових можливостей звернемося до існуючого асортименту гальмівних мотоциклетних дисків. Ціни на 1 диск можуть бути досить різноманітними: від 327 грн до 8469 грн [47].

Як матеріал основи використаємо таку ж сталь як і в дипломній роботі. Лист сталі 09Г2С товщиною 5 мм та габаритними розмірами 1500х6000 коштує 11340 грн [49]. При вирізанні з одного листа вийде 110 заготовок для дисків. Отже 1 заготовка буде коштувати 104 грн.

Провівши розрахунки визначили, що для наплавлення одного диска ми витратимо 0,25 кг наплавочного дроту. Ціна 1 кг дроту близько 70 грн. Враховуючи коефіцієнт на втрати вирахуємо, що на виготовлення 1 диску буде затрачено 0,27 кг зварювального дроту. Отже, вартість наплавленого шару для одного диску буде коштувати 19 грн.

Для розрахунку електроенергії будемо враховувати час на підготовчі та фінішні операції рівним часу наплавленню, і не будемо враховувати простій обладнання. При роботі на неповній потужності джерело зварювального струму використовує близько 18 кВт електроенергії за годину. Фрезерний верстат має потужність 4,2 кВт, і врахуємо витрати на освітлення та ручний інструмент – приведемо до однієї цифри, нехай це буде 2 кВт. Отже сумарно виробництво гальмівного диску займає 25 хвилин (поки 1 заготовка

наплавляється, інша оброблюється на фрезерному верстаті або ручним інструментом), а сумарні витрати на електроенергію дорівнюють 24,2 кВт за годину. Отже для виготовлення одного диску буде затрачено 10,1 кВт електроенергії. На сьогоднішній день 1 кВт електроенергії коштує 1,74 грн, і після підрахунку отримаємо, що при виробництві одного гальмівного диску на електроенергію буде витрачено 18 грн.

Отже попередньою ціною виготовлення 1 диску буде 141 грн, без врахування витрат на заробітну плату.

Було визначено потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформовано орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи в таблиці.

Табл. 5.3.1 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Заміна зношених гальмівних дисків, та їх встановлення при виробництві	Водії мотоциклів Ремонтні майстерні Підприємства по виготовленню мотоциклів	Низька ціна Можливість купівлі великої кількості товару	- до продукції: надійність, довговічність безпечність - до компанії-постачальника: гарантійний термін на строк служби

Із урахуванням характеристик ідеї проекту та вимог споживачів до товару визначено перелік факторів конкурентоспроможності і проведено аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту в таблиці.

Табл. 5.3.2 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з проектом						
			–3	–2	–1	0	+1	+2	+3
1	Надійність							**X**	
2	Безпека				**X**				
3	Ціна		**X**						
4	Маса деталі							**X**	
5	Серійне виробництво					**X**			

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту було складання SWOT-аналізу методу підвищення зносостійкості (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities)), що наведено у таблиці, на основі ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін.

Таблиця 5.3.3 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: 1. Менша собівартість матеріалу 2. Покращені умови безпеки 3. Простий спосіб введення добавки	Слабкі сторони: 1. Більші витрати матеріалу 2. Відносно низька швидкість наплавлення 3. Необхідність додаткового фрезерування
Можливості: 1. Впровадження в найрозповсюдженіші методи відновлення деталей – наплавлення дешевими матеріалами 2. Відсутність необхідності придбання додаткового обладнання або додаткового навчання робітників 3. Можливість подальшого розвитку як способів введення так і регулювання масової частки добавок	Загрози: 1. Підприємства України дуже неохоче йдуть навіть на малі зміни в технічних процесах 2. Висока конкуренція серед інших нанорозмірних добавок – гарно себе проявляють оксиди

Наявність таких переваг при даному методі наплавлення дозволяє зробити висновок, що такий метод підвищення зносостійкості конкурентоспроможний, але для покращення часу на виготовлення деталі доцільно використовувати більш продуктивні методи наплавлення.

ВИСНОВКИ

В ході проведення роботи та експериментів дослідно встановлено:

1. Нанокомпоненти (як карбід титану так і аеросил) сприяють підвищенню зносостійкості наплавлених покриттів. Використані технологічні схеми дійсні і дають результат.
2. Введення нанокомпонентів підвищує мікротвердість наплавленого металу, але залежність між мікротвердістю та зносостійкістю не спостерігається.
3. Структурні дослідження показали, що введення нанокомпонентів суттєво структуру металу не змінює, а позитивний вплив на зносостійкість металу полягає у подрібненні його структури.
4. Введення нанокомпонентів викликає утворення нових неметалічних включень із розмірами переважно до 0,6 мкм.
5. Аналіз стартап-проекту показує, що застосування даної технології з точки зору економічної доцільності є можливим і перспективним.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гаркунов, Д.Н. Триботехника. Износ и безызносность / Д.Н. Гаркунов. – М.: МСХА, 2001. – 616 с.
2. Венцель, С.В. Смазка и долговечность двигателей внутреннего сгорания / С.В. Венцель. – Киев: Техника, 1977. – 207 с.
3. Хрущов М.М., Бабичев М.А. «Абразивное изнашивание», НАУКА, 1970.
4. Тененбаум М.М. «Сопротивление абразивному изнашиванию» М.: Машиностроение, 1976. - 271 с.
5. Б. И. Костецкий, Износостойкость деталей машин. К.; Москва, 1950
6. Виноградов, В.Н. Абразивное изнашивание / В.Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, М. Г. Колокольников. – М.: Машиностроение, 1990. – 221 с
7. Аргатов И. И., Дмитриев Н. Н. Основы теории упругого дискретного контакта. СПб.: Политехника, 2003. 233 с.
8. Журавлёв В.Ф. О модели сухого трения в задаче качения твердых тел // ПММ, 1998, т. 62, вып. 5, с. 762-767.
9. Painlevé P. Leçons sur le frottement. Paris: Hermann, 1895 [Пэнлеве П. Лекции о трении. М.: Гостехиздат, 1954. 316 с.
10. Дмитриев Н. Н. Начало движения тел по плоскости с ортотропным трением // Динамика и устойчивость механических систем. СПб.: СПбГУ, 1995. С. 14-20.
11. Sommerfeld A. Vorlesungen über theoretische Physik: Bd. 1: Mechanik. 2. Aufl. Leipzig: Akad. Verl., 1944 [Зоммерфельд А. Механика. М.: ИЛ. 1947. 391с.].
12. Карапетян А. В. О моделировании сил трения в динамике шара на плоскости // ПММ, 2010, т. 74, вып. 4, с. 531-535.
13. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Выпуск 1. Современная наука о природе. Законы механики — Эдиториал УРСС. 1960, с 215-216.
14. Зенкин Н. А. Повышение эксплуатационных характеристик композиционных материалов путем оптимизации упрочняющих

технологий: монография / Н.А. Зенкин, В.И. Копылов. - К.: Глав. спец. ред. лит. языками нац. меньшинств Украины, 2002. - 272 с.

15. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. «Інженерія поверхні» - К.: Наукова думка, 2007. - 557 с.
16. Рябцев И. И. Гармонизация стандартов на наплавочные материалы в соответствии с требованиями европейского стандарта EN 14700 «Сварочные материалы - Сварочные материалы для наплавки» / И.А. Рябцев, Н.А. Проценко // Сварщик, 2007. - № 5. - С. 30-36.
17. Рябчиков И.В, Панов А.Г., Корниенко А.Э. О качественных характеристиках модификаторов // М. Сталь. – 2007. – №6. – с. 18 – 23.
18. Гладкий П.В. Микролегирование и модифицирование износостойкого наплавленного металла. / П.В. Гладкий, Г.С. Микаелян // Наплавленный металл. Состав, структура, свойства. – К.: ИЭС им. Е.О. Патона, 1992. – С. 33-36.
19. Новые материалы. Под ред. Ю.С. Карабасова – М.: МИСИС, 2002 – 736с.
20. Алымов М. И. Механические свойства нанокристаллических материалов/ М. И. Алымов. – М.: МИФИ, 2004. – 32 с.
21. Vinogradov A.Yu., Agnew S.R. Nanorystalline Materials: Fatigue / in Encyclopedia of Nanotechnoogy/ A.Yu. Vinoradov, S.R. Agnew. – N.Y.: Marcel Dekker, 2004.– P.2269–2288.
22. D.V. Shtansky et al.: Surface and Coatings Tecnology, 2001.– Vol.148, № 2–3.– 204–213 pp.
23. Соколов Г. Н. Влияние нанодисперсных карбидов WC и никеля на структуру и свойства наплавленного металла / Г.Н. Соколов, А.С. Трошков, В.И. Лысак и др // Сварка и Диагностика. - 2011.– №3 - с. 36-38.
24. Еремин Е. Н. Применение наночастиц тугоплавких соединений для повышения качества сварных соединений из жаропрочных сплавов / Е.Н. Еремин // Омский научный вестник. - 2009. - №3. - с. 63-67.

25. Паршин С. Г. MIG-сварка стали с применением наноструктурированных электродных материалов / С.Г. Паршин // Сварочное производство. - 2011. - №10. - с. 27-31.
26. Соколов Г. Н. Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама / Г.Н. Соколов. П.В. Лысак. А.С. Трошков. П.В. Зорин и др. // Физика и химия обработки материалов. - 2009. - №6. - с.41-47.
27. Черепанов А. Н. Лазерная сварка стали с титановым сплавом с применением промежуточных вставок и нанопорошковых инокуляторов /А.Н. Черепанов, Ю.В. Афонин, А.М. Оришич // Тяжелое машиностроение. - 2009. - №8. - с. 24 - 26.
28. Кипарисов С.С., Левинский Ю.В., Петров А.П. Карбид титана / - М.: Металлургия, 1987. - 218 с.
29. Гарбузова А.К., Галевский Г.В., Руднева В.В., Ширяева Л.С. / Анализ современного состояния производства и применения карбида титана / - М.: Металлургия, 1987. - 218 с.
30. Макаренко А.Г., Самборук А.А., Ермошкин А.А., Борисенкова Е.А. / Самораспространяющийся высокотемпературный синтез карбида и нитрида титана из гранулированной шихты // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. №3. С 42 – 48.
31. Пат. 2175988 РФ, МПК С22 В 34/12 Способ получения карбида титана / С.В. Александровский, Д.В. Ли, Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова № 2000110870/02; Заявл 27.04.2000, опубл. 20.11.2001.
32. Пат. 2149076 РФ, МПК С 01 В31/30. Способ получения порошков тугоплавких соединений на основе титана / Г.П. Швейкин, Институт твердого тела Уро РАН. № 98117637/02; Заявл. 25.09.1998, опубл. 20.05.2000.
33. Пат. 2066700 РФ, МПК С 01 В31/30. Способ получения карбида титана / С.В. Александровский, С.В. Мушков, Г.Г. Семянников, Л.М. Бердникова,

Е.Н. Пинаев; Березниковский титаномагниевый комбинат. №93001453/02; Заявл. 11.01.1993, опубл. 27.03.1996.

34. Пат РФ, МПК С 01 В31/30. Способ получения карбида титана / А.Г. Мержанов, В.А. Дрозденко, И.П. Боровинская, М.С. Прозорова, Л.С. Попов, В.П. Петренко, В.И. Ратников. Институт структурной макрокинетики АН СССР. № 4450193/02; Заявл. 28.06.1988, опубл. 27.08.2003.
35. Кипарисов С.С., Левинский Ю.В., Петров А. П., Карбид титана: получение, свойства, применение, М., 1987. Ю. В. Левинский.
36. Машина испытательная модели СМЦ-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации Гб 2.779.005 ТО, 1975г.
37. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография – М.: Советская Энциклопедия, 1963. – 624с.:с илл. 1л. табл.
38. Грачёва Т.А., Кузьмичева Т.А., Писклов А.В. / Определение характеристик поликристаллических материалов методами оптической микроскопии / Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2010г, 19с
39. Микротвердомер ПМТ-3. Инструкция по пользованию.
40. 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.
41. Охорона праці: Методичні вказівки до розділу дипломних проектів і робіт для підготовки спеціалістів та магістрів за напрямком 7(8).050504 «Зварювання» усіх форм навчання / укладач О.Г. Левченко. - К.: НТУУ «КПІ», 2012. - 28 с.
42. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: навчальний посібник / О.Г. Левченко, О.І. Полукаров. - К.: Основа, 2014. - 352 с.
43. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: навчальний посібник / О.Г. Левченко. - К.: Основа, 2010. - 240 с.

44.И.В. Анциферова, И.А. Эсаулова, А.И.Зенков Контроль возможных рисков при использовании нанопорошков для создания условий безопасности на рабочем месте. // Естественные и технические науки. - 2012. - № 3(59). - С. 402-404., ВАК

45.Левченко О. Г. Сварочные аэрозоли и газы: процессы образования, методы нейтрализации и средства защиты. – Киев: Наукова думка, 2015. − 248 с.

46. wikipedia.org/wiki/Стартап

47. motoprox.com

48.Гуляев А.П. Металловедение. - М.: Металлургия, 1977. - УДК669.0(075.8)

49.Сортамент продукции базы металлопроката «КТ-СТАЛЬ» Украина, г. Киев, ул. Гарматная 5.