

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

**Факультет інженерії та енергетики**

**Кафедра машиновикористання та сервісу технологічних систем**

**Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису**

**МЕЛЬНИК ВАДИМ ЛЕОНІДОВИЧ**

**УДК 621.373.826**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Обґрунтування режимів нанесення покриттів стійких до  
абразивного зношування**

**208 “Агроінженерія”**

**Подається на здобуття освітнього ступеня магістр**

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

**Керівник роботи**

**Куликівський В.Л.**

**кандидат технічних наук**

**Житомир – 2020**

## АНОТАЦІЯ

**Мельник Вадим Леонідович. Обґрунтування режимів нанесення покриттів стійких до абразивного зношування. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.**

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

Порошковий матеріал Stellite 6 наносився на поверхню сплавів лазерним методом. Для дослідження були використані два режими нанесення покриття лазером: 1,8 кВт та 1 кВт. В процесі дослідження визначали мікроструктур, хімічний склад та мікротвердість покриттів.

В результаті досліджень встановлено, що нанесення покриття при меншій потужності лазера (1кВт) забезпечує кращі фізико-механічні, хімічні та триботехнічні характеристики. Досягнення такого позитивного ефекту при меншій потужності обумовлено високим вмістом вуглецю і зміцненому шарі. Підвищений вміст вуглецю призводить до збільшення вмісту карбідів. Встановлено, що матеріал основи суттєво впливає на зносостійкість покриття, так зносостійкість покриття нанесеного на низьколеговані аустенітні сплави суттєво нижче в порівнянні з зносостійкістю покриття нанесеного на мартенситні та бейнітні сталі.

Результати досліджень дозволяють стверджувати, що при прогнозуванні фізико-механічних, хімічних та триботехнічних властивостей нанесених лазерним методом зносостійких покриттів необхідно враховувати властивості матеріалу основи.

*Ключові слова: порошковий матеріал, зносостійкість, поверхня, лазер, зміцнення*

## ANNOTATION

**Melnyk Vadym Leonidovych. Substantiation of abrasion-resistant coating modes.** – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 - Agricultural Engineering. - Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

Stellite 6 powder material was applied to the surface of the alloys by laser. Two modes of laser coating were used for the study: 1.8 kW and 1 kW. During the study, microstructures, chemical composition and microhardness of coatings were determined.

As a result of research it is established that coating at lower laser power (1 kW) provides better physical and mechanical, chemical and tribo technical characteristics. Achieving such a positive effect at lower power is due to the high carbon content and reinforced layer. Increased carbon content leads to an increase in carbide content. It is established that the base material significantly affects the wear resistance of the coating, so the wear resistance of the coating applied to low-alloy austenitic alloys is significantly lower compared to the wear resistance of the coating applied to martensitic and bainitic steels.

The research results allow us to state that when predicting the physical-mechanical, chemical and tribotechnical properties of wear-resistant coatings applied by the laser method, it is necessary to take into account the properties of the base material.

*Key words: powder material, wear resistance, surface, laser, hardening*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ ТА СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ.....	7
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	14
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РЕЖИМІВ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТІВ СТІЙКИХ ДО АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ.....	17
ВИСНОВКИ.....	24
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	25

## ВСТУП

Абразивний знос – одна з найважливіших і найдорожчих проблем, з якими стикаються промислово розвинені економіки. Абразивний знос коштує промисловим країнам 1...4% їх валового національного продукту. Це величезна проблема, яка виникає у таких галузях народного господарства як: добування корисних копалин, будівництві, сільському господарстві та інших. Абразивний знос ідентифікується як знос внаслідок проникнення твердих частинок або поверхневих нерівностей однієї твердої речовини на поверхню більш м'якої твердої речовини під час ковзання або контакту при ударі. Результатом є деформація або різання матеріалу більш м'якої поверхні. В сільському господарстві найбільше абразивному зношуванню піддаються робочі органи ґрунтообробних машин, саме тому пошук зносостійких матеріалів для підвищення їх зносостійкості є актуальною задачею.

**Мета і задачі дослідження.** Мета дослідження: підвищити зносостійкість деталей сільськогосподарських машин, які працюють в умовах абразивного зношування.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- Провести аналіз механізмів та характеру абразивного зношування;
- Визначити ефективні способи підвищення зносостійкості деталей машин, які працюють в умовах абразивного зношування;
- Визначити режими нанесення зносостійкого порошкового матеріалу.

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

**Предмет дослідження:** взаємозв'язок режимів нанесення та матеріалу основи зі зносостійкістю покриття отриманого нанесенням порошкового матеріалу лазерною технологією.

**Методи дослідження.** Основні дослідження виконанні з використанням методів механіки, прикладної фізики, трибології та електронної мікроскопії.

### **Перелік публікацій за темою роботи:**

1. **Мельник В. Л.** Аналіз механізмів абразивного зношування. Збірник тез VI-ї всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 9-10 квітня 2020 року. Житомир : ЖАТК. С. 144-146.

2. **Куликівський В. Л., Мельник В. Л., Слинько В. Д., Лібиховський В. Б., Мандра В. В.** Стійкість до абразивного зношування покриття на основі порошку Stellite 6. II Міжнародна науково-практична конференція *«Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі»* (02-27 листопада 2020 р.) [Електроний ресурс] – <http://www.tsatu.edu.ua/tsst/wp-content/uploads/sites/6/kulykivskyj-2020.pdf>

3. **Куликівський В. Л., Мельник В. Л.** Голощук В. О., Ворошилов Г. М., Гончарук В. А., Мандра В. В., Гордієнко В. С. Зносостійкі покриття на основі кобальту. Матеріали Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції *«Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту»*. 18-19 листопада 2020 року. Кропивницький : ЦНТУ. С.

**Практичне значення одержаних результатів.** Основні результати досліджень спрямовані на розробку зносостійких покриттів для забезпечення підвищення надійності деталей сільськогосподарських машин.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 25 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 26 сторінок комп'ютерного тексту містить 1 таблиця і 12 рисунків.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ ТА СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

Абразивне зношування це головна проблема всіх галузей народного господарства. Найбільше абразивному зношуванню піддаються деталі машин в гірничій галузі, будівництві та сільському господарстві. Під абразивним зношуванням розуміють проникнення твердих частинок або поверхневих нерівностей одного твердого тіла в поверхню більш м'якого твердого тіла. Результатом абразивного зношування є зняття стружки або подрипини більш м'якого матеріалу [1-4].

Абразивне зношування поділяється на дві основні групи: зношування двох тіл (two body abrasive wear) та зношування трьох тіл (three body abrasive wear) (рис.1.1). При абразивному зношуванні двох тіл шоретка поверхня, жорстко закріпленні і абразивні частинки або інструмент взаємодіє з поверхнею видаляючи матеріал. При абразивному зношуванні трьох тіл абразивні частинки затримуються між двома поверхнями, які разом з абразивними частинками утворюють три тіла. Величина зносу при абразивному зношуванні трьох тіл, як правило, значно менша в порівнянні зі зношуванні двох тіл [5-9].

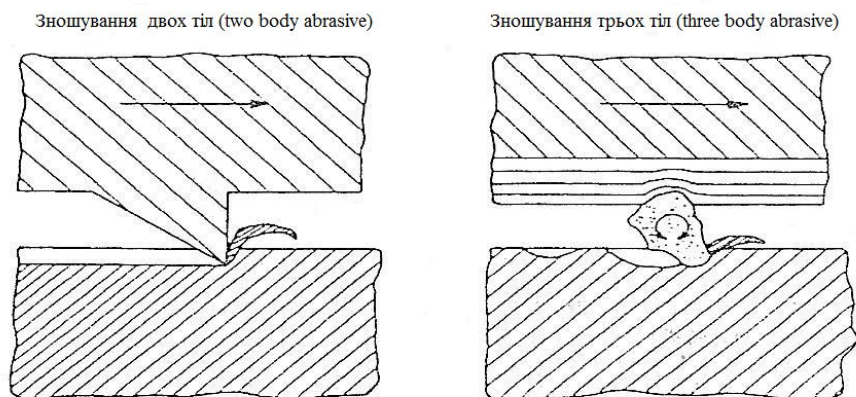


Рис. 1.1. Види абразивного зношування відповідно до міжнародної класифікації.

Фундаментальні дослідження по вивченню механізму та характеру зношування двох тіл (two body abrasive wear) представлені в роботі Хрущова М. М. та Бабічева М. А. [1]. В даній роботі встановлено, що в процесі зношування поверхні металів знос виникає в результаті двох процесів: зняття мікростружки та утворення канавок без видалення металу [1].

Деякі абразивні частинки контактують еластично з поверхнею металу, тоді як інші деформують поверхню і можуть видаляти матеріал. Встановлено, що нахил ріжучої поверхні, твердість матеріалу, форма ріжучої кромки та її орієнтація мають вирішальне значення для створення умов для зняття стружки. Критичний кут залежить від матеріалу і визначається коефіцієнтом тертя між контактуючими поверхнями, який у свою чергу залежить від форми частинок [1-3].

Знос матеріалу в режимі двох тіл – це складне явище, при якому одночасно протікають декілька процесів зношування. Основні механізми, що призводять до видалення матеріалу зазвичай ідентифікуються як «мікрооранка», мікрорізання та мікротріщини (рис. 1.2) [1-13].

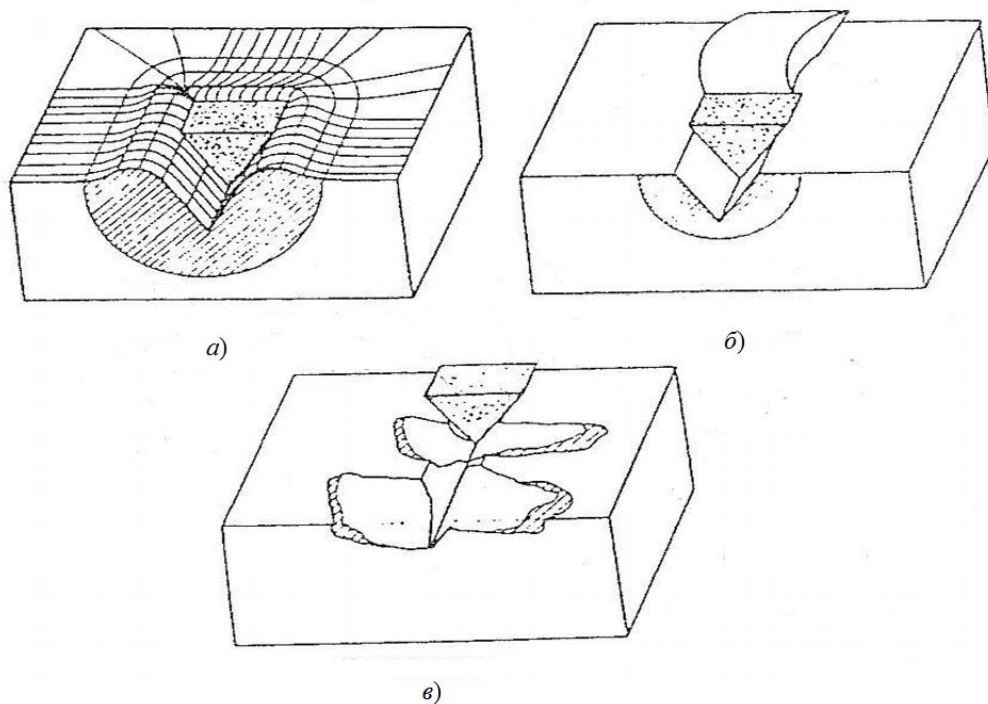


Рис. 1.2. Механізми абразивного зношування в режимі двох тіл: а) – «мікрооранка», б) – мікрорізання, в) – мікротріщини.



Під час «мікрооранки» матеріал пластично деформується і зміщується в сторони, утворюючи виступи вздовж канавок. Видалення матеріалу відбувається через низьку циклічну втому, при цьому багато абразивних частинок діють одночасно. Мікрооранка доволі часто може супроводжувати ріжучу дію або може бути попередником виникнення мікротріщини.

Під час протікання мікрооранки матеріал видаляється у вигляді мікростружки з поверхні матеріалу [2].

Під час абразивного зношування абразивні частинки прикладають висококонцентровані напруження в точках контакту, що призводить до виникнення і поширення мікротріщин. В результаті такого механізму зношування утворюється велика кількість спрацьованого матеріалу. Інтенсивність зношування в такому випадку набагато вища за два попередні механізми [6].

Зношування трьох тіл (three body abrasive wear) поділяється на закритий відкритий типи (рис. 1.3.) [1-13].

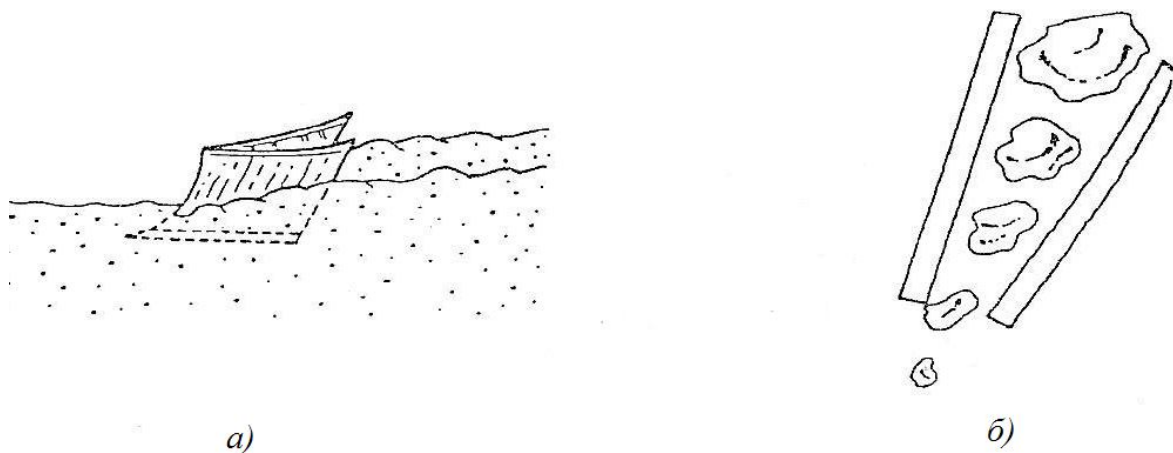


Рис. 1.3. Найбільш поширені механізми зношування при зношуванні трьох тіл (three body abrasive wear).

При закритому абразивному зношуванні абразивні частинки взаємодіють з двома поверхнями між якими вони знаходяться. В результаті частинки вдавлюються і осідають на більш м'якій поверхні, що в подальшому спричиняє абразивний знос. Цей тип зносу багато в чому нагадує ситуацію при зношенні

за схемою взаємодії двох тіл (two body abrasive wear). Прикладом закритого зносу є шокова дробарка (рис. 1.3, б) [9].

Зношування трьох тіл (three body abrasive wear) за відкритою схемою, відбувається коли дві поверхні знаходяться далеко один від одного або якщо лише одна з поверхонь бере активну участь у процесі зношування (рис. 1.3, а) [9].

В сільському господарстві зношування трьох тіл (three body abrasive wear) за відкритою схемою є доволі поширеним явищем (робочі органи ґрунтообробних машин, екскаваторів, подрібнювачі та ін.).

При виробництві робочих органів і деталей машин, які піддаються абразивному зношуванню найчастіше використовують конструкційні та леговані залізобуглецеві сплави з вмістом вуглецю до 1%. Встановлено, що незначне збільшення вуглецю в діапазоні від 0 до 0,8% значно покращує стійкість до абразивного зношування. При збільшенні вуглецю понад 0,8% стійкість до абразивного зношування зростає, але не так помітно. Більшість аустеніт марганцевих сталей належать до цієї категорії і завдяки високій в'язкості доволі часто використовуються для виготовлення деталей, які піддаються абразивному зношуванню [8].

Зносостійкість залізобуглецевих сплавів залежить від фізико-механічних, хімічних та трибо технічних властивостей таких як: твердіть, пластичність, здатність до зміцнення під час роботи, механічна стійкість, в'язкість та мікроструктури.

Ранніми дослідженнями встановлено, що збільшення твердості залізобуглецевих сплавів призводить до зростання стійкості до абразивного зношування. Це твердження справедливе за умови однакової мікроструктури та хімічного складу сплавів. Встановлено, що зміна мікроструктури призводить до зміни швидкості зношування. Експериментальні дослідження підтвердили, що найбільшою зносостійкістю до абразивного зношування володіють залізобуглецеві сплави, які мають мартенситну структуру [12].

Поверхні реальних тіл, виготовлених зі сталі, покритті твердими оксидними шарами незважаючи на це абразивні частинки мають здатність проникати в них. Одним із найбільш зустрічаємих абразивів в трибосистемах сільськогосподарських машин є кварцовий пісок. Він володіє твердістю від 85- до 1350 HV і здатен зношувати найтвердіші сталі. Абразив умовно можна вважати твердим, якщо його твердість перевищує на 20% твердість сталі під час зношування і на 50% в початкових умовах. В багатьох роботах вказується, що зносостійкість залізвуглецевих сплавів визначається не початковою твердістю, а твердістю зношеної поверхні. Саме тому зміцнення поверхні сталі може бути неефективним із-за зменшення поверхневою твердості в результаті абразивного зношування.

Мікроструктура залізвуглецевих сплавів має суттєве значення на стійкість до абразивного зношування, а такі особливості як фазова структура, включення, хімічна сегрегація дефектів кристалів, текстура зерен та мікроструктурна неоднорідність можуть суттєво впливати на зносостійкість сплавів.

Одним із найпоширеніших інженерних прийомів для підвищення стійкості до абразивного зношування є зміцнення робочої поверхні. Основна мета поверхневого зміцнення – покращити зносостійкість деталей, не впливаючи на більш м'який і в'язкий матеріал основи. Поверхневе зміцнення має ряд переваг перед зміцненням всього матеріалу деталі.

Існує два різних методи поверхневого зміцнення:

- Методи, що передбачають нанесення зносостійкого шару
- Методи, що передбачають модифікацію поверхні без будь якого нарощування або зміни розмірів [11].

Існують велика кількість способів нанесення зносостійких покриттів (електродуговий, лазерний, плазмовий, напилення та ін.).

Один із перспективних способів нанесення зносостійкого покриття на деталі сільськогосподарських машин, які піддаються абразивному зношуванню

є наплавлення порошкових матеріалі енергією лазерного випромінювання. Лазерне випромінювання підходить для локальної обробки матеріалів, оскільки тонкосфокусоване, гнучке випромінювання, яке володіє високою концентрацією енергії. Для зміцнення поверхонь необхідні лазери з високою потужністю (більше 1 кВт). З моменту впровадження лазерних технологій (середина 1960-х років) найбільшого поширення набули газові лазери на основі  $\text{CO}_2$  та ітрієві лазери. В останні роки набуває популярності ексімерний лазер. Ексімерні лазери – це газові лазери активним середовищем яких є фторид аргону або хлорид ксенону. Ці лазери використовуються в електронній промисловості і не можуть поставити під сумнів домінування лазерів на основі  $\text{CO}_2$  [14-18].

$\text{CO}_2$ -лазер – це газовий лазер, активне середовище якого являє собою суміш п'яти відсотків вуглекислого газу з залишком гелію та азоту. Лазер видає потужність на довжині хвилі 10,6 мм при рівнях потужності від десятих частин ват до двадцяти п'яти кіловат. Промінь подається від лазера до заготовки за допомогою серії дзеркал та лінз у промінній трубі.

Однією з вимог до ефективної роботи  $\text{CO}_2$ -лазерів є необхідність підтримувати температура газу приблизно на рівні 100-150 ° С. Тепло, яке генерується електричним розрядом, що використовується для збудження молекули вуглекислого газу, може розсіюватися за допомогою одного з трьох типів газового потоку: повільного осьового потоку, швидкого осьового потоку та поперечного потоку.

Як для повільних так і для швидких осьових лазерів потоки газу паралельні оптичним осьовим лазерам. У лазерах з поперечним потоком потік газу знаходиться через оптичну вісь. Головною перевагою лазерів з поперечним потоком є їх висока потужність (більше 10 кВт). Вони особливо підходять для зварювання та наплавлення [15].

## **Висновок по розділу 1**

Абразивний знос це найбільша проблем з якою стикаються промислово розвинені економіки. Абразивний знос коштує промисловим країнам 1...4% їх валового національного продукту. В сільському господарстві абразивний знос відбувається, в переважній більшості, в результаті взаємодії робочих органів машин з абразивними частинками ґрунту. Найефективніший спосіб зменшення абразивного зносу нанесення зносостійкого шару на поверхню тертя. Найперспективнішим способом нанесення зносостійкого шару є використання лазерного випромінювання.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В роботі досліджували зносостійкість покриття Stellite 6 в умовах абразивного зношування. Stellite 6 – це універсальний матеріал, який застосовується для наплавлення різних деталей або робочих органів, які працюють в умовах абразивного зношування. Мікроструктура Stellite 6 містить тверді карбіди  $M_7C_3$ . Стелітові сплави також містять тверду фазу Лавеса в більш м'якій матриці евтектичного або твердого розчину, що позитивно впливає на зносостійкість матеріалів в умовах абразивного зношування.

Порошок Stellite 6 наносили на поверхню сталей за допомогою лазерних технологій. Порошок поглинав енергію лазера і частково плавився, перш ніж потрапити на матеріал основи. Частина енергії лазера також поглинається матеріалом основи, викликаючи плавлення поверхні, утворюючи міцний металургійний зв'язок між матеріалом основи та зносостійким шаром.

Основною метою цього дослідження була оцінка характеристик абразивного зносу покриття Stellite 6, який наносився на різні сталі. Вплив потужності лазера на структуру та властивості покриттів також оцінювали за допомогою використання двох режимів лазера: 1 кВт та 1,8 кВт. Потенційні практичні результати цієї роботи полягають у наданні розуміння вибору матеріалів для оптимальної зносостійкості сталей з покриттям зі Stellite 6.

Початкова товщина покриття становила близько 0,35 мм для обох потужностей лазера. Потужність лазера змінювали регулюванням швидкості лазерного променя. Для вищої потужності лазера використовували меншу швидкість, зменшуючи швидкість розподілу порошку Stellite, щоб отримати товщину покриття, подібну до товщини нижньої потужності лазера.

Оскільки метою роботи було вивчити знос покриттів Stellite 6, необхідно було шліфувати та полірувати покриття, щоб отримати плоскі зразки. Плоскі зразки 37\* 20\*5 мм були підготовлені для кожного з матеріалів основи.

Вимірювання мікротвердості проводили з інтервалом 0,05 мм по товщині покриття за допомогою машини для випробування твердості Лесо М-400-Н1 із навантаженням 300 г. Потім зразки травили у змішаному розчині кислоти, щоб виявити мікроструктуру покриття стеліту. Мікроструктуру покриття вивчали за допомогою оптичного мікроскопа Leica DMRM.

Випробування на знос проводили з використанням штифтового (поршневого) режиму з 6-міліметровою кулькою з інструментальної сталі в якості штифта. Машина для випробування на знос показана на рис. 2.1. (дослідження проводили в умовах лабораторії кафедри теоретичної та прикладної фізики НАУ відповідно до договору про співпрацю між кафедрами).



Рис. 2.1. Машина тертя.

Швидкість випробування, кількість циклів та тривалість випробування були постійними: 50 об/хв, 10000 циклів та 200 хвилин. Випробування проводились із застосуванням прикладених навантажень 2 кг та 5 кг для зразків з покриттям, виготовлених з використанням двох потужностей лазера 1 та 1,8 кВт.

В табл. 2.1 представлено номінальний склад порошкового сплаву Stellite 6, який використовувався в процесі досліджень

Таблиця 2.1 – Хімічний склад порошкового сплаву Stellite 6

	Co	Cr	Fe	W	Ni	C	Si	Mn
Stellite 6	60	27	2,5	5	2,5	1	1	1

Планування експерименту та обробку експериментальних даних виконували за допомогою загальновідомих методик представлених в роботах [19-23].

### **Висновок по розділу 2**

Розроблена методика по дослідженню зносостійкості та фізико-механічних властивостей зносостійкого шару отриманого лазерним випромінюванням в результаті нанесення порошкового матеріалу Stellite 6.



### РОЗДІЛ 3

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РЕЖИМІВ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТІВ СТІЙКИХ ДО АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

Дані про знос для шести найпопулярніших зносостійких сплавів представлено на рис. 3.1, а також для нержавіючої сталі 08X13 та інструментальної сталі XB5 (60 HRC) для порівняння. Ці дані були отримані за допомогою випробування відповідно до стандарту ASTM G65B (сухий пісок/гумове колесо). У межах сімейства сплавів стелітів з рис. 3.1 видно, що стійкість до стирання є функцією вмісту вуглецю та вольфраму. Зі збільшенням вмісту вуглецю в хромовольфрамових стелітових сплавах зростає і вміст вольфраму, що призводить до збільшення вмісту карбїду і твердості.

Сплави на основі кобальту не набули широкого використання для виготовлення деталей, які працюють при високих температурах, порівняно зі сплавами на основі нікелю. Все ж таки вони відіграють важливу роль завдяки своїй чудовій стійкості до сульфїдування та міцності при температурі вище, ніж у нікелі та нікелевих сплавах заліза. Кобальт також використовується, як легуючий елемент у багатьох високотемпературних сплавах на основі нікелю.

Хоча зносостійкі сплави на основі кобальту володіють деякою стійкістю до водної корозії, вони обмежені випаданнями карбїду на межі зерен, відсутністю життєво важливих легуючих елементів у матриці та у випадку литих і зварювальних накладних матеріалів, хімічною сегрегацією в мікроструктурі.

Завдяки своїй однорідній мікроструктурі та меншому вмісту вуглецю ковані високотемпературні сплави на основі кобальту більш стійкі до водної корозії, але значно відстають від сплавів нікель-хром-молібден за характеристиками протидії корозії.

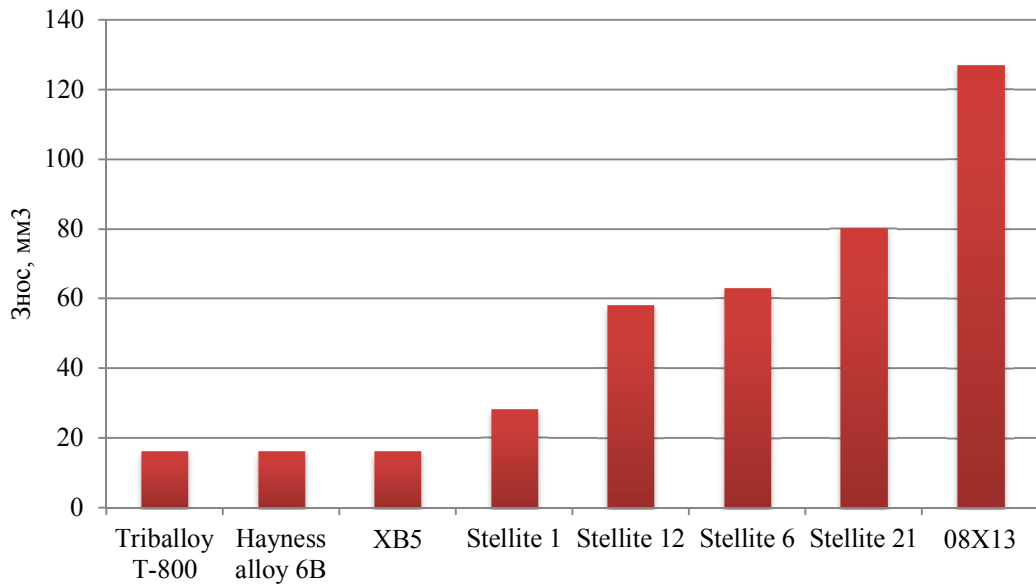


Рис. 3.1. Результати випробовування сплавів на основі кобальту на абразивну зносостійкість відповідно до ASTM G 65.

Мікроструктуру поперечного перерізу утвореного покриття досліджували за допомогою електронної мікроскопії. Збільшення потужності лазера призводить до зростання величини дендритної структури (рис. 3.2).

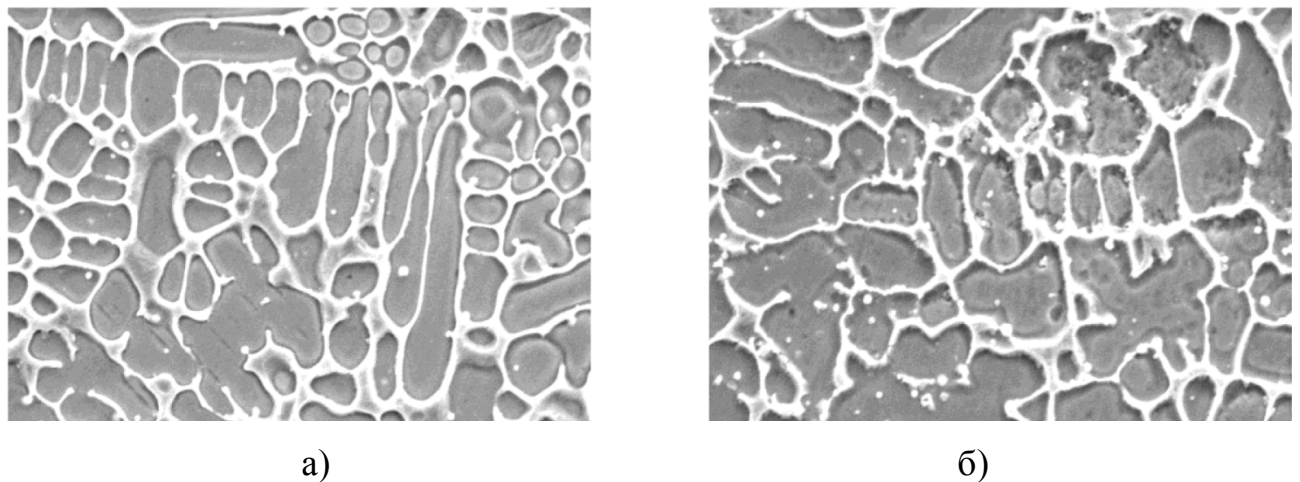
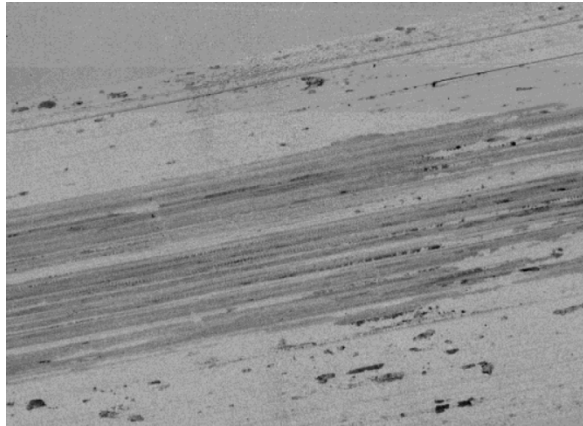
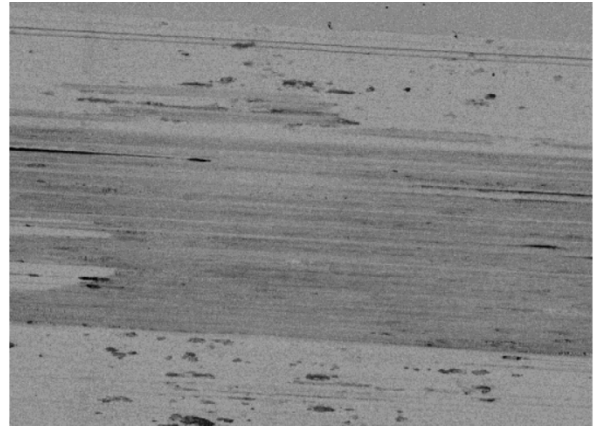


Рис. 3.2. Мікроструктура поперечного перерізу зносостійкого шару Stellite 6 отриманого лазерною технологією: а) – потужність 1 кВт, б) – потужність 1,8 кВт.

Зношена поверхня зносостійкого шару Stellite 6 отриманого лазерною технологією при потужності лазера 1 кВт виглядає більш гладкою порівняно з поверхнею отриманою при потужності лазера 1,8 кВт. Дана закономірність справедлива для всіх режимів дослідження (рис. 3.3. та рис. 3.4.).

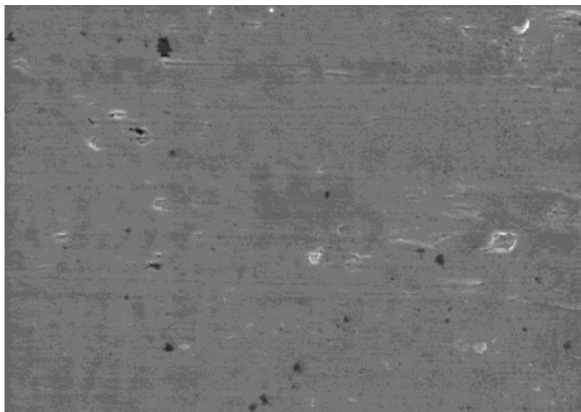


а)

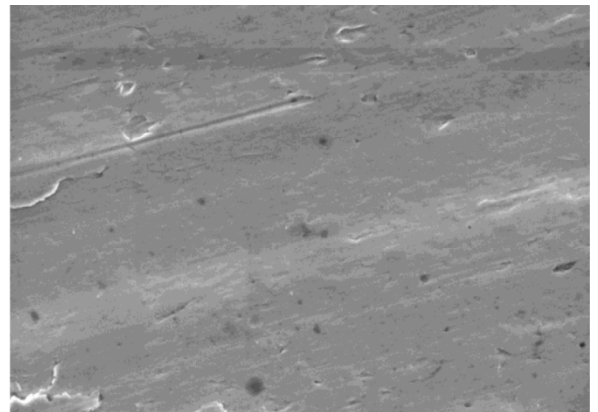


б)

Рис. 3.3. Мікроструктура поверхні тертя зносостійкого шару Stellite 6 отриманого лазерною технологією після проведення досліджень (навантаження 2 кг): а) – потужність 1 кВт, б) – потужність 1,8 кВт.



а)



б)

Рис. 3.4. Мікроструктура поверхні тертя зносостійкого шару Stellite 6 отриманого лазерною технологією після проведення досліджень (навантаження 5 кг): а) – потужність 1 кВт, б) – потужність 1,8 кВт.

При оцінці факторів, що впливають на інтенсивність зношування покриттів враховували: твердість покриття, вміст вуглецю в покритті, твердість зони термічного впливу та твердість основи.

Встановлені залежності величини зносу в залежності від твердості покриття (рис. 3.5) демонструють помітне зменшення втрат на знос зі збільшенням твердості покриття, як для випробувальних навантажень так і для потужності лазера.

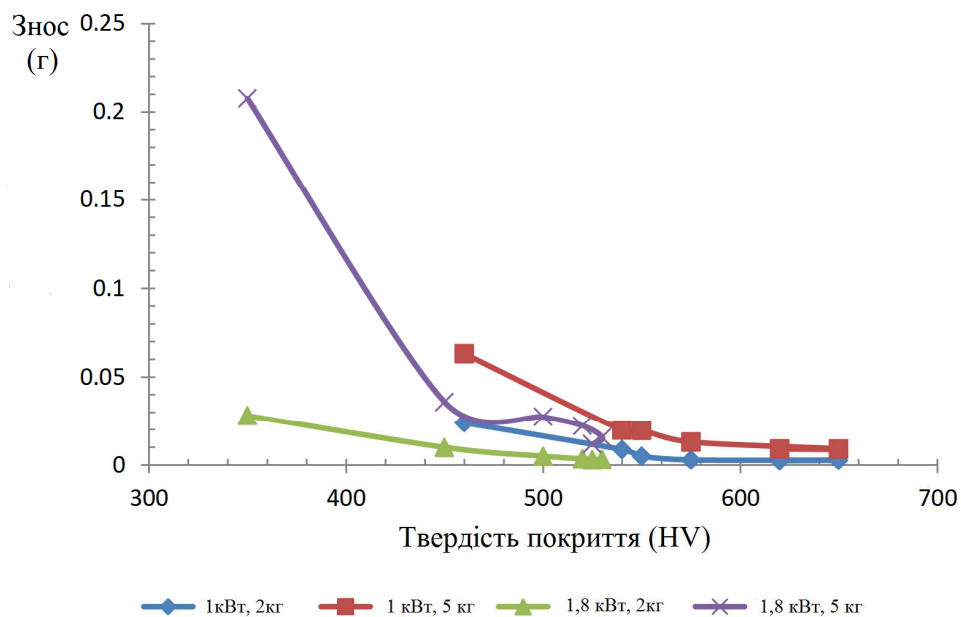


Рис. 3.5. Залежність величини зносу від твердості покриття для двох потужностей лазера та двох випробувальних навантажень

Результати досліджень величини зносу в залежності від розрахункового вмісту вуглецю представлені на рис. 3.6. Величина зносу суттєво зросла, коли вміст вуглецю в покритті опустився нижче 0,8% С і був вищим для покриттів 1,8 кВт, випробуваних при більших навантаженнях. Для нижчого випробувального навантаження в 2 кг різниця у втратах на знос із вмістом вуглецю була відносно несуттєвою до потужності лазера, що використовується для нанесення покриття. Однак більш високе випробувальне навантаження

призвело до помітного відхилення втрат на знос при потужності лазера нижче вмісту вуглецю в покритті приблизно 0,8%.

Очевидно, що зменшення вмісту вуглецю покриття через збільшення сили осадження призвело до значного збільшення втрат на знос.

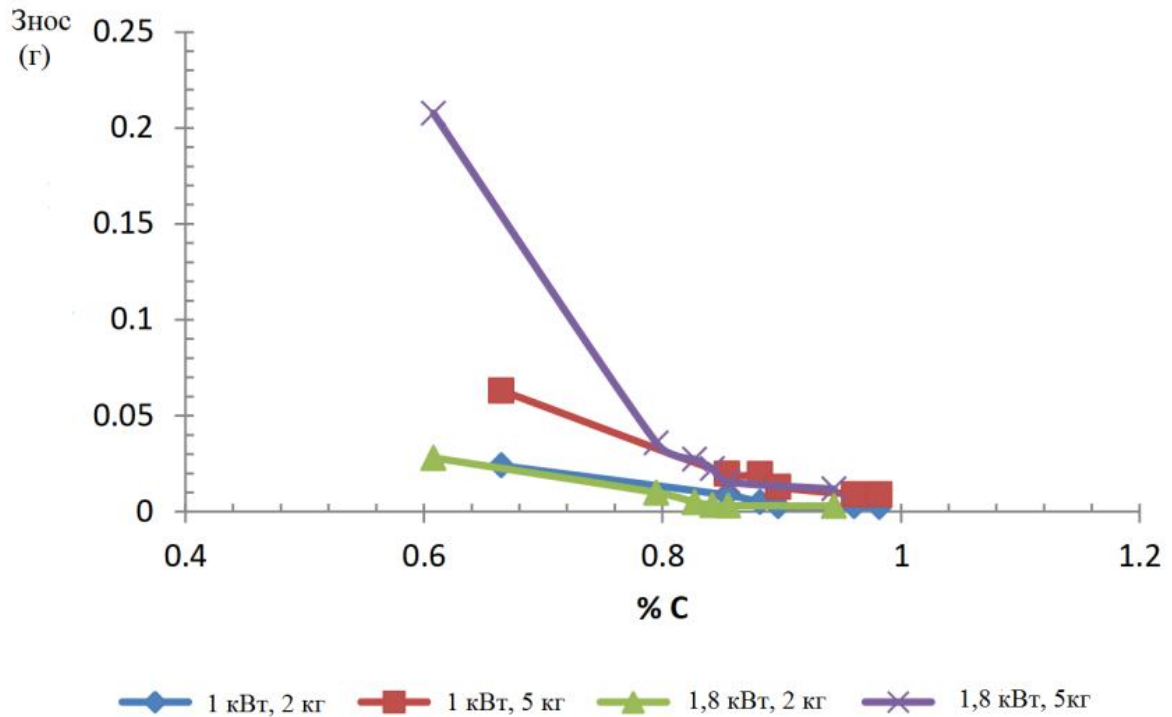


Рис. 3.6. Залежність величини зносу від вмісту вуглецю для двох потужностей лазера та двох випробувальних навантажень.

Залежність величини зносу від функції твердості основного матеріалу представлено на рис. 3.7. Графік показує, що втрати на знос відносно нечутливі до твердості основи для рівнів твердості, що перевищують приблизно 225 HV. Для більш м'якого матеріалу основи втрата на знос різко прискорюється, що вказує неефективність використання даних матеріалів в умовах абразивного зношування.

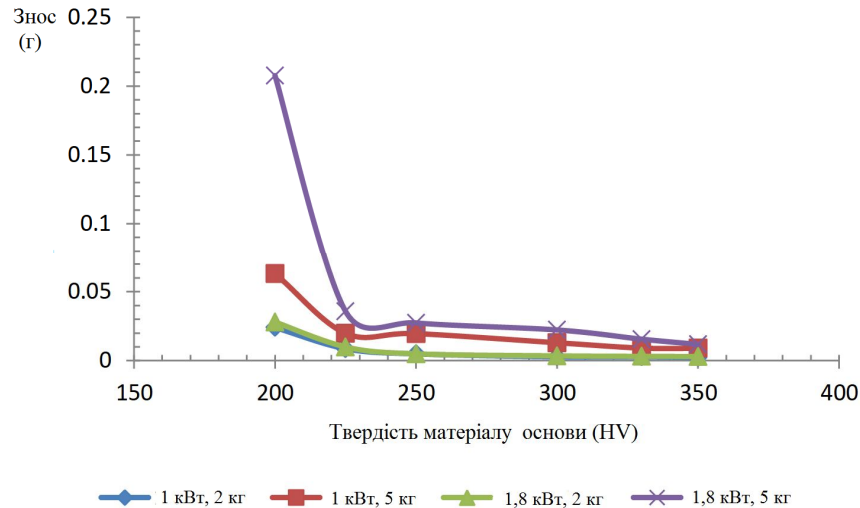


Рис. 3.7 Залежність величини зносу від твердості матеріалу основи для двох потужностей лазера та двох випробувальних навантажень

Найінтенсивніше процес абразивного зношування протікав при твердості зони термічного впливу нижче 425 HV. Різке збільшення втрат на знос, особливо при випробувальному навантаженні 5 кг, для покриттів з твердістю матеріалу основи нижче 450 HV вказує на те, що загартування основи впливає на зносостійкість покриття.

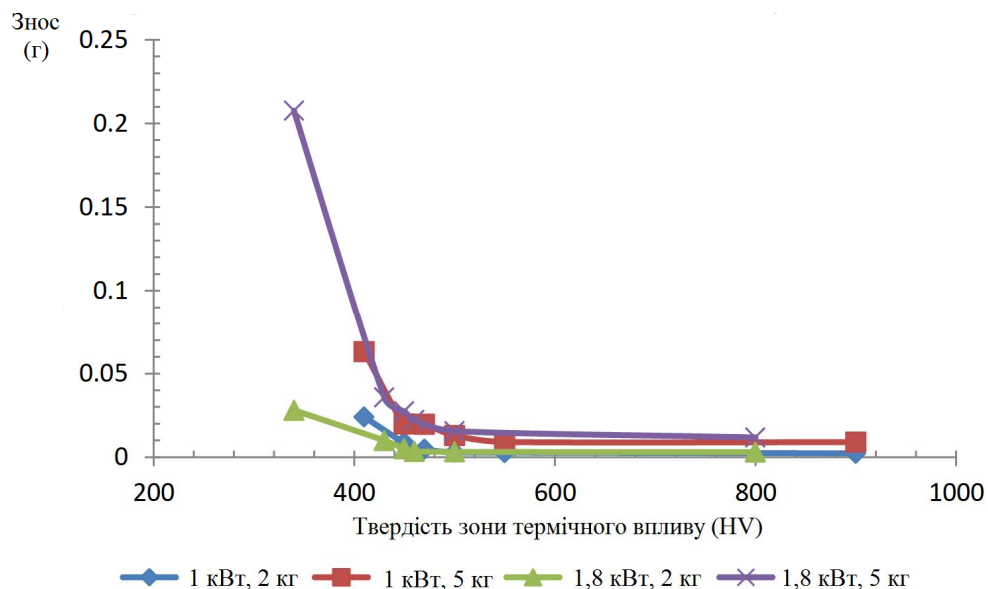


Рис. 3.8. Залежність величини зносу від твердості зони термічного впливу для двох потужностей лазера та двох випробувальних навантажень

Всі чотири фактори є незалежними, але тісно взаємопов'язані між собою. Твердість покриття сильно пов'язана з вмістом вуглецю, яка у свою чергу залежить від вмісту вуглецю в матеріалі основи внаслідок ефекту «розведення». Крім того вміст вуглецю в основі є основним фактором, що визначає його здатність до гартування, а отже і твердість зони термічного впливу.

### **Висновки по розділу 3**

В результаті проведених досліджень встановлені режими нанесення матеріалу Stellite 6 лазерною технологією та необхідний матеріал основи для забезпечення підвищення стійкості до абразивного зношування.

## ВИСНОВКИ

Порошковий матеріал Stellite 6 наносився на поверхню феритних та аустенітних сталей лазерною технологією. В результаті досліджень встановлено, що оптимальна потужність лазерного випромінювання, для нанесення порошкового матеріалу Stellite 6, повинна складати 1 кВт для всіх сталей. Можна зробити висновок, що більш висока зносостійкість покриттів отриманих при меншій потужності лазера, зумовлена більш високою твердістю, яка виникає внаслідок меншого розведення і пов'язаного з цим більш високого вмісту С в покритті. Вуглець підвищує твердість за рахунок зміцнення твердого розчину та збільшення утворення карбідів сплавів. Збільшення зерен або інші типи реакцій під час затвердіння покриття можуть бути основною причиною пом'якшення замість ефекту підвищення твердості

Встановлено, що втрати на знос у залежності від твердості покриття відповідають експоненціальному співвідношенню з високим коефіцієнтом кореляції. Подібне тісне прилягання з експоненціальним співвідношенням було знайдено для втрат на знос та розрахункового вмісту вуглецю в покритті. Цей результат узгоджується з лінійним співвідношенням, встановленим між твердістю покриття та вмістом вуглецю.

Встановлено також, що тип основного матеріалу на який наносять покриття впливає на зносостійкість покриття Stellite 6. Зокрема, низьковуглецеві аустенітні основи демонстрували високу інтенсивність зношування покриття, тоді як мартенситні сталеві основи демонстрували значно більшу зносостійкість покриття. Ці результати не суттєво корелювалися з експоненціальною залежністю між інтенсивністю зношування та твердістю, особливо для зони впливу нагрівання.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хрущев М. М., Бабичев М. А. Исследования изнашивания металлов. Москва: Машиностроение., 1960. 352 с.
2. Горячева И. Г., Добычин М. Н. Контактные задачи в трибологии. Москва : Машиностроение, 1988. 256 с.
3. Bhushan B. Introduction to Tribology Second Edition. John Wiley & Sons, 2013, 711 p. OI: 10.1002/9781118403259.
4. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. Москва : Физматлит, 2013. 352 с.
5. Демкин М. Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. Москва : Наука, 1970. 297 с.
6. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. Москва : Мир, 1989. 510 с.
7. Костецкий Б. И .Трение, смазка и износ в машинах. Київ : Техніка, 1970. 396 с.
8. Костецкий Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении. Київ : Техніка, 1976. 296 с.
9. Крагельский И. В. Некоторые понятия и определения, относящиеся к трению и изнашиванию. Москва : Изд-во АН СССР, 1957.
10. Трение и износ в машинах. Москва : Машгиз, 1962.
11. Kajdas C., Hiratsuka K. Tribocatalysis, Tribochemistry, and Tribocorrosion. Pan Stanford Publishing, 2018. 337 p.
12. Pihtili H. Tribology in Engineering. InTech. 2013. 249 p.
13. Бирюков В.П. Основы трибологии. Учебное пособие. Москва : Российский университет транспорта (МИИТ), 2018. 175 с.
14. Alfano R.R. The Supercontinuum Laser Source: The Ultimate White Light Springer Science+Business Media New York, 2016. 435 p.

15. Dickey F. M., Lizotte T. E. Laser Beam Shaping Applications : 2nd Edition. CRC Press, 2017. 442 p.
16. Shimoda K. Double-resonance spectroscopy of molecules by means of lasers. Laser Spectroscopy of Atoms and Molecules. Topics in Applied Physics, 1976, Volume 2/1976, 197-252.
17. Yap C.Y., Chua C.K., Dong Z.L., Liu Z.H., Zhang D.Q., Loh L.E., Sing S.L. Review of selective laser melting: Materials and applications. Applied Physics Reviews 2. 2015. 041101. P. 21.
18. Изжеуров Е. А., Угланов Д. А., Гришанов В. Н. Газовые лазеры с высокочастотной накачкой Самара : СГАУ, 2007. 100 с.
19. Червоний І.Ф. Техніка металургійного експерименту Запоріжжя: ЗДІА, 2019. 190 с.
20. Назаренко Л.А. Планування і обробка результатів експерименту Конспект лекцій. Харків: ХНАМГ, 2018. 163 с.
21. Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Лук'яненко Ю.В. Основи теорії планування експерименту Лабораторний практикум. Вінниця: ВНТУ, 2006. 167 с.
22. Горват А.А., Молнар О.О., Мінькович В.В. Методи обробки експериментальних даних з використанням MS Excel: Навчальний посібник. Ужгород: Видавництво УжНУ "Говерла", 2019. 160 с.
23. Гасюк І.М., Кайкан Л.С. Статистичні методи обробки результатів фізичного експерименту Івано-Франківськ : видавництво Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2011. 159 с.
24. 1. ASTM G65: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. 2016. 14p.
25. Meriaudeau, F., Truchelet, D., Grevey., Vannes, A. B. Laser Cladding Process and Image Processing, Laser in Engineering 6, 1997. P. 161-187.