

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

**Зварювальний факультет
Кафедра інженерії поверхні**

«На правах рукопису»
УДК 621.793.74

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ І.В. Смирнов
«__» _____ 20 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 132 Матеріалознавство

**на тему: «Вплив технології нанесення плазмових покриттів на
параметри пружності та електропровідності»**

Виконав:

студент II курсу, групи ЗП-71мп

Люшенко Євгеній Олегович _____

Керівник:

Д.т.н., професор

Копилов В.І. _____

Консультант з охорони праці:

Зав. каф. д.т.н. проф.

Левченко О.Г. _____

Рецензент:

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

Студент _____

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Зварювальний факультет

Кафедра інженерії поверхні

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 132 «Матеріалознавство» («Інженерія та нанотехнології покриттів»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ І.В. Смирнов

«___» _____ 20 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Люшенку Євгенію Олеговичу

**1. Тема дисертації «Вплив технології нанесення плазмових покриттів на параметри пружності та електропровідності»,
науковий керівник дисертації Копилов В.І. д.т.н., професор.**

затверджені наказом по університету від «13» листопада 2018 р. №4156-с

2. Термін подання студентом дисертації 18.12.2018р.

3. Об'єкт дослідження

4. Вихідні дані

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Консультанти розділів дисертації**

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Левченко О.Г. зав.каф д.т.н. проф.		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка

Студент

Єрко О.О.

Науковий керівник дисертації

Копилов В.І.

АНОТАЦІЯ

Люшенко Є.О. «Вплив параметрів технології нанесення плазмових покриттів на параметри пружності та електропровідності», магістерська робота на здобуття кваліфікації магістра за спеціальністю 132 «Матеріалознавство», Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. І. Скіорського», Київ, 2018 рік. Обсяг дипломної роботи складається з 95 сторінок друкованого тексту, 41 рисунка та 29 таблиць. Робота присвячена дослідженню впливу технології нанесення плазмових покриттів на параметри пружності і електропровідності.

У роботі проведено літературний огляд за даною проблематикою, виконано теоретичний розрахунок по представленим в роботі методиках підходу, виконано дослідження електрофізичних властивостей системи покриття-основа, проведено дослідження покриттів на згин, проаналізовано результати досліджень та зроблені висновки щодо отриманих науково-технічних результатів.

ADNOTACJA

Lyushenko E.O. „Wpływ parametrów technologii powłok plazmowych na elastyczność i parametrach przewodności” pracy magisterskiej uzyskiwania kwalifikacji stopnia 132 „Materiały” pana, Narodowy Uniwersytet Techniczny Ukrainy „Kijowskiego Instytutu Politechnicznego. I. Sikorsky, Kijów, 2018. Tom pracy składa się z 95 stron drukowanego tekstu, 41 rysunków i 29 tabel. Praca poświęcona jest badaniu wpływu technologii nakładania powłok plazmowych na parametry sprężystości i przewodności elektrycznej.

Przegląd literatury papier na ten temat, Teoretyczne obliczenia technik omówionych w podejściu przeprowadzili badania właściwości elektrycznych układów powłokowych opartych studiował powłok gięcie, przeanalizował wyniki badań i wnioski uzyskane na wyniki badań naukowych i technicznych.

SUMMARY

Liushenko E.O. "Influence of the parameters of the technology of applying plasma coatings on the parameters of elasticity and electrical conductivity", master's work for obtaining a master's degree in specialty 132 "Materials Science", National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute. I. Skirsky, Kyiv, 2018. The volume of the thesis consists of 95 pages of printed text, 41 figures and 29 tables. The work is devoted to the study of the influence of the technology of applying plasma coatings on the parameters of elasticity and electrical conductivity.

In this work a literary review was conducted on the given problem, theoretical calculation of the approaches presented in the work was presented, the study of the electrophysical properties of the coating-base system was performed, the research of the coatings on the bend was carried out, the results of the research were analyzed and conclusions were drawn regarding the obtained scientific and technical results.

ЗМІСТ

ВСТУП

1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ
 - 1.1 Механічні характеристики системи «основа-покриття».
 - 1.1.1 Розрахунок напруженого стану в системі «основа-покриття»
 - 1.2 Пружні властивості
 - 1.3 Теоретичні відомості електропровідності матеріалів.
 - 1.4 Мета та задачі дослідження
2. МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТІВ
 - 2.1 Матеріали для композиційних плазмових покриттів
 - 2.2 Обладнання та методи нанесення покриттів
 - 2.2.1 Плазмотрон для напилення
 - 2.2.2 Установа для випробування зразків на згин KOGEL
 - 2.3 Методика досліджень матеріалів з покриттям
 - 2.3.1 Методика визначення мікротвердості плазмових покриттів
 - 2.3.2 Методика експерименту вимірювання електроопору плівок
3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ СИСТЕМ «ОСНОВА-ПОКРИТТЯ»
 - 3.1 Механічні характеристики системи «основа-покриття»
 - 3.2 Розрахунково-експериментальна методика визначення фізико-механічних характеристик плазмових покриттів при випробуваннях на вигин
 - 3.3 Структурні і металографічні результати аналізу напилених покриттів
4. АДГЕЗІЙНА І КОГЕЗІЙНА МІЦНІСТЬ
 - 4.1 Розрахунок сили зчеплення
 - 4.2 Когезійна міцність плазмових покриттів
 - 4.3 Результати експериментальних досліджень адгезійно-когезійних властивостей металевих покриттів
 - 4.3.1 Дослідження міжфазного опору
 - 4.3.2 Дослідження структури контактної зони плазмових покриттів за допомогою методу електроопору
 - 4.3.3 Оцінка похибки вимірювань

4.3.4 Залежності електроопору металевих покриттів від пористості

4.3.5 Обговорення результатів впливу структурних особливостей на модуль пружності, адгезійно-когезійні властивості плазмових покриттів

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ)

5.2 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

5.2.1 Мікроклімат робочої зони

5.2.2 Освітлення ділянки напilenня

5.2.3 Електробезпека

5.2.4 Вимоги до приміщення

5.2.5 Вимоги до працівників, які допускаються до роботи на ділянки

5.2.6 Вимоги до вентиляції

5.3 Розрахунок місцевої вентиляції

5.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

5.4.1 Пожежна безпека

5.4.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

6. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

ДОДАТКИ

ВСТУП

В наш час технологія нанесення плазмових покриттів набула широкого поширення в промисловості. Це зумовлено очевидними перевагами над іншими, спорідненими до плазмових, методів нанесення покриттів.

Внаслідок поширення даних технологій, постає питання про дослідження їх впливу на фізико-хімічні властивості отриманих пар покриття-метал, а саме параметри пружності та електропровідності, з метою передбачення впливу технології нанесення покриття та можливого контролю зміни цих параметрів для підвищення конструктивних та експлуатаційних характеристик виробів.

Контроль технології плазмового напилення та створення оптимальних композицій, можна реалізувати за умови встановлення взаємозв'язку між відповідними параметрами, що забезпечують формування конкретних макро- та мікроструктур, високий або підвищений рівень когезійної міцності самого багатофазного покриття, а також необхідну адгезію його до поверхні основного матеріалу. Як наслідок фізико-хімічних процесів формується плазмове покриття, що представляє собою багат шарову композицію у вигляді хаотично розподілених та пов'язаних між собою розплющеними частинками дискової форми з конкретними когезійними зв'язками [1].

Нанесення покриттів супроводжується також зміною тонкої структури, як поверхневих шарів, що прилягають до зони контакту, так і в глибинних в об'ємі основного матеріалу.

Роль та ефективність дій багаточисленних факторів на систему «основа-покриття» неоднозначна, та являє інтерес співставлення фізико-механічних характеристик, перш за все міцносних та деформаційних з параметрами електроопору композиційного матеріалу, а також можливість в наступному науково підійти до створення (проектуванню) багатофазного покриття відповідного складу шляхом застосування оптимальної технології напилення.

Покриття, отримані методом плазмового напилення, відрізняються

гетерогенною структурою, сформованою з дискових деформованих частинок (сплітів), характеризуються конкретними розмірами та відповідним ступенем зв'язків між собою. Технологія отримання такого плазмового покриття має під собою умову утворення в ньому дефектів, в тому числі дислокацій, мікротріщин, пор [1-3].

За рахунок неоднорідності, анізотропії, багатофазної структури плазмових покриттів виникають труднощі у виборі методів досліджень та подальшого аналізу можливостей досягнення високих фізико-механічних характеристик сформованих покриттів [4,5].

В процесі дослідження механічних та фізичних властивостей, а також для прогнозування можливого типу руйнування композиційної системи важливим, перш за все, є аналіз пружних характеристик плазмових покриттів. Це відноситься, перш за все, до адгезій них та когезій них властивостей покриттів, фізики та механіки їх руйнування, електропровідності, які в свою чергу, залежать від пружних характеристик та особливостей диско образної структури покриттів.

Пружні адгезійно-когезійні та міцності властивості є найбільш важливими параметрами покриттів та системи «основа-покриття» в цілому.

Актуальним також є питання, що зв'язані з дослідженням взаємозв'язку комплексу властивостей композиційного матеріалу, отриманого в процесу плазмового напилення.

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

1.1 Механічні характеристики системи «основа-покриття»

В умовах плазмового напилення, синтез та кристалізація компонентів призводять до формування складної структури композиційного покриття (КП), фазовий склад та властивості якого залежать від розвитку реакції, як в самому плазмовому потоці, так і на поверхні основи.

Покриття, сформовані в процесі напилення або модифікування, являють собою дисперсно-зміцнені композити у вигляді мікрогранул субмікросталічного типу з великою протяжністю кордонів зерен та субзерен, стабілізованих нанорозмірними складовими. Змінюється також мікроструктура та хімічний склад при поверхневих шарів основного матеріалу [4].

В полікристалічних матеріалах одним з головних параметрів структури, контролюючих механічні властивості, є розмір зерен. Залежність механічних характеристик таких матеріалів від розмірів зерна D описується співвідношенням Холла-Петча, і, відповідно дослідженням, зразки з малим розміром зерен (субзерен) мають підвищені міцнісні характеристики [5,6]:

$$\sigma_T = \sigma_{0n} + \frac{k}{\sqrt{D}} \quad (1.1)$$

Для опису, наприклад, напруження текучості, застосовуються також залежності, однотипні до виразу (1.1), що характеризуються параметрами які мають вигляд:

$$\sigma_T = \sigma_{0n} + \frac{\beta Gb}{L}, \quad \sigma_T = \sigma_{0n} + \frac{\alpha Gb}{\lambda} \quad (1.2)$$

де σ_{0n} , k , α , β – постійні величини для даного матеріалу; G и b – відповідно модуль зсуву та вектор Бюргерса матриці з розміром зерна D ; L – величина субзерен, що розміщені всередині зерен, параметр дислокаційної структури; λ – параметри, характеризуючи розподіл частинок в матриці.

З іншого боку, підвищенню міцносних характеристик матеріалів допомагають також наявність в його об'ємі дисперсних часток, другої фази (зміцнюючої). В двофазних (багатофазних) системах, кількість параметрів структури збільшується.

Для плазових покриттів зміцнюючий ефект проявляється при наявності ультра дисперсної або наноскладової фази. Структура, що сформована в процесі плазового наплення, казується на адгезійно-когезійних та міцносних властивостях композиційного матеріалу.

1.1.1 Розрахунок напруженого стану в системі «основа-покриття»

Напруження в покритті оцінюється, виходячи з умов сумісності деформаційного розтягу в поритті та при поверхневих шарів основи при випробування зразків з покриттями на трьох точковий вигин [7-9]:

$$\sigma_n = \frac{E_n}{E_o} \left[\frac{3P}{2b \left(\frac{H}{2} \right)^3} \left(\frac{l}{2} - \frac{H}{2\pi} \right) \frac{H}{2} + \frac{P}{\pi H b} + \frac{2P}{5\pi H b} \right] \quad (1.3)$$

, де $2d$ – відстань між двома зовнішніми опорами при вигині; b – ширина зразку; H – товщина основи; P – сила докладена до зразка і відповідає моменту появи тріщини.

У рівнянні (1) сила P відповідає посиленню, докладеного до зразка, при якому виникають відповідні тріщини в композиції. Таке навантаження виявлялось по діаграмі навантаження-переміщення, отриманої при випробуваннях на трьох точковий вигин зразка з покриттями.

1.2 Пружні властивості

Проведена достатньо велика кількість випробувань по виявленню фізико-механічних властивостей, а саме пружних та міцносних характеристик плазових (газотермічних) покриттів. Тим не менш, як показує досвід, на даний момент має місце недостатність зумовлених досліджень, експериментальних тестів та баз даних по властивостям

покриттів для проведення розрахунків та моделювання процесів формування покриттів [1,2,9,10].

Для виявлення модулів пружності багатокомпонентної композиційної системи використовувалось правило змішування, адитивності по значенням модулів E вихідних компонентів:

$$E_n = E_{n1}\xi_{n1} + E_{n2}\xi_{n2} + \dots + E_{ni}\xi_{ni} \quad (1.4)$$

, де E_n - модуль пружності композиції (системи основа-покриття); E_{n1} , E_{n2} - модуля пружності відповідних компонентів; ξ_{n1} , ξ_{n2} - об'ємні доли компонентів змішування.

Відомі роботи, де представлена методика та аналіз результатів експериментальних досліджень, а також рішення для виявлення модуля пружності ті міцносних характеристик при випробування зразків з покриттям мікроїдентування [11], при одноосьовому розтягу [9], на 3-х та 4-х точковий вигин [12].

В наш час, для виявлення пружних властивостей покриттів найбільш поширеними є стандартні методи випробування шляхом мікроїдентування, та найбільш чуттєвими до глибини занурення є метод наноїдентування, в тому числі з використанням індентора Берковича [10]. В процесі мікроїдентування відбувається запис діаграми занурення в координатах (навантаження P – зближення h індентора та зразка). Спосіб засновано на аналізі початкової стадії кривої навантаження, коли деформація має суто пружний характер і підпорядковується герцівському співвідношенню. Для сферичного індентора радіусов R вихідний вираз для навантаження має вигляд:

$$P = \frac{4}{3} E^* R^{0.5} h^{1.5}, \quad (1.5)$$

, де $E^* = E_n \cdot E_i / [E_i (1 - \nu_n^2) + E_n (1 - \nu_n^2)]^{-1}$ – зведений модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона, індекси n та i відносяться до досліджуваного матеріалу (покриття) та матеріалу індентора, відповідно.

Побудувавши отримані дані в подвійних логарифмічних координатах або координатах $P = f \cdot h^{3/2}$, можна знайти спочатку E^* , а потім і E досліджуваного матеріалу, в тому числі і покриття.

Проте, визначення характеристик поверхневих НЕ гомогенних шарів,

зокрема плазмових покриттів не є тривіальним рішенням. У локальних місцях отримані дані можуть істотно відрізнятися для окремих фаз. При цьому повинна бути проведена апроксимація, що дозволяє оцінити загальну інтегральну характеристику трещинообразования. Для визначення модуля пружності E_p і коефіцієнта Пуассона μ_p плазмових покриттів проводять випробування при статичному одноосьовому розтягуванні. Під час розтягування зразка вимірюється поздовжня деформація основи ϵ_{zo} , поздовжня і поперечна деформація покриття ϵ_{zp} , ϵ_{xp} на одному і тому ж зразку.

Однак в більшості випадків функціональні плазмові покриття містять керамічні складові, що призводить у багатьох випадках до крихкого руйнування покриття. Шорсткість поверхні, наявність мікропор і мікротріщин, погана когезія між сплетамі в покритті сприяє зниженню пружних і міцності таких покриттів і композиції в цілому. Як впливає і аналізу нечисленних публікацій, виготовлення зразків для випробувань на розтяг є досить трудомістким. Крім того, при аналізі отриманих результатів не враховується вплив фізико-хімічних процесів взаємодії покриття і основи в межфазній зоні. Проте, методика добре апробована на прикладі різних видів покриттів. Результати досліджень пружних характеристик і особливостей руйнування в залежності від дефектності структури та геометричних параметрів покриттів (товщина, довжина) представлені в ряді робіт [9, 13].

Більш поширеними в порівнянні з випробуваннями композиційних матеріалів на розтяг є випробування на ізгі, результати яких дозволяють отримати і проаналізувати дані для розрахунку модуля пружності на лінійній ділянці. Розрахунок модуля пружності плоских зразків при вигині, коли записується крива «деформація-навантаження», в залежності від прикладеного навантаження, прогину зразка і його геометричних розмірів проводиться за формулою: [14]:

$$E = \frac{L^3}{4H^3B \times 1000} \frac{\Delta P}{\Delta f}, \quad (1.6)$$

де L - відстань між опорами; H , B - товщина і ширина зразка; P - прикладена зусилля; f - прогин зразка.

Застосування методів обробки результатів механічних статичних випробувань на вигин і мікроіндентірованіє, дозволяють отримати і проаналізувати не тільки пружні характеристики покриття, але розглянути процеси його руйнування у вигляді відшарування або розтріскування. На підставі результатів цих експериментів отримані дані по тріщиностійкості (в'язкості руйнування), адгезійної і когезійної міцності покриттів. Зокрема, метод індентування є одним з найпоширеніших методів, який дозволяє провести як якісний, так і кількісний аналіз руйнування композицій типу основа-покриття і визначити параметри тріщиностійкості (K_c). При використанні піраміди Віккерса розглядається освіту кілька можливих систем (морфології) тріщин - тріщини під вершиною индентора і по кутах його відбитка. Відповідно до системи тріщин Палмквіста, критичний коефіцієнт тріщиностійкості розраховується за рівнянням:

$$K_c = k \frac{P}{a \cdot l^{1/2}}, \quad (1.7)$$

, де k - коефіцієнт, що залежить від геометрії індентора і досліджуваного матеріалу; a - половина довжини діагоналі відбитка індентора Віккерса; l - довжина тріщини.

При дослідженнях на вигин розглядаються різні ділянки кривої деформації, за якими і розраховується інтенсивність вивільненої енергії або коефіцієнт інтенсивності напружень, а також проводиться аналіз адгезионно-когезионної міцності покриттів. З цих робіт слід, що, незважаючи на наявний чималий набір напівемпіричних залежностей для визначення параметрів покриттів, спостерігаються розбіжності в їх значеннях через труднощі обліку механізмів деформації і руйнування в кожному конкретному випадку. Проте, отримані дані використовуються в якості оціночних характеристик пошкоджуваності покриттів.

На величину когезионної міцності покриттів, а також величину адгезійного взаємодії покриття до основи впливають ряд факторів. До цих факторів, перш за все, відносяться співвідношення модулів пружності основного матеріалу і другої фази, нерівноважний стан кордонів різних ділянок всередині композиції, кордони між зернами або зерном і основою.

Одним з найбільш точних методів визначення нормального модуля пружності Юнга E (модуля зсуву G) є фізичний метод досліджень, заснований на вимірах загасання енергії пружних коливань в обсязі твердого тіла - метод внутрішнього тертя (ВТ). Класичним випадком є вираз, що встановлює взаємозв'язок між модулем пружності Юнга і резонансною частотою (f_2) коливань зразка, відповідно до залежності $G = K \cdot f_2$, де коефіцієнт K є функцією геометричних розмірів і маси зразка, а в разі крутильних коливань при використанні дротяних зразків залежить від моменту інерції крутильного маятника [2]. Даний підхід використовується для різних матеріалів, в тому числі і для композитів.

Однак для визначення пружних властивостей безпосередньо покриттів на зразках даний підхід не коректний. Для конкретних режимів (деформація, напруга, температура) зразків без покриття та з покриттям на підставі експериментальних даних про параметри внутрішнього тертя Q^{-1} можна отримати вираз для модуля пружності, а також коефіцієнта внутрішнього тертя безпосередньо покриття Q_n^{-1} в залежності від інших характеристик компонентів системи «основа-покриття» [2, 16].

При визначенні характеристик плазмових покриттів методом внутрішнього тертя (ВТ) проводяться вимірювання температурної і амплітудної залежностей внутрішнього тертя (T_3VT , A_3VT), при цьому виникають особливості аналізу і обробки результатів в порівнянні з чистими металами.

Розгляду коефіцієнта втрат $Q^{-1} = f(T, \gamma)$, як функції модулів пружності матеріалів покриття і основи, а також товщини покриття і основи, присвячена робота [16]. Використовуючи даний метод, після ряду перетворень, вираз для модуля пружності плазмового покриття, як функції модуля пружності матеріалів основи E_0 , товщини покриття h_p і основи h_0 , а також коефіцієнтів втрат (Q^{-1}) для системи «основа - покриття» набуде вигляду [2]:

$$E_n = E_0 \bar{h} (1 - \bar{h})^{-1} \sqrt{\left[1 + (Q_0^{-1})^2\right] \cdot \left[1 + (Q_n^{-1})^2\right]^{-1}} \times \\ \times (Q_n^{-1} - Q^{-1}) \cdot (Q^{-1} - Q_0^{-1})^{-1}, \quad (1.8)$$

де Q_0^{-1} , Q_n^{-1} - внутрішнє тертя в основі без покриття і в покритті; $= H_n /$

h_0 - відносна товщина покриття.

У рівняння (1.8) входить ряд складових, які визначаються для конкретних режимів (деформація, напруга, температура) безпосередньо в експерименті ($Q-1$, Q_0-1), або розраховуються (Q_n-1).

Для визначення коефіцієнтів внутрішнього тертя безпосередньо в покритті Q_n-1 в рівнянні (1.8) можна скористатися рішенням Фавстова для опису декременту загасання енергії пружних коливань в системі «основа-покриття» δ_c при крученні в залежності від ряду параметрів:

$$\delta_c = \delta_o + \frac{\bar{G}(\delta_n - \delta_o)(R^4 - R_o^4)}{\bar{G}(R^4 - R_o^4) + R_o^4}, \quad (1.9)$$

, де δ_o , δ_n - декремент загасання коливань в основі і покритті; \bar{G} - відносний модуль зсуву; R і R_o - радіус циліндричного зразка з покриттям і без покриття, відповідно.

Вирішуючи спільно систему (1.8), (1.9) з урахуванням того, що коефіцієнт $Q_n-1 = \delta_n / \pi$, отримуємо вираз для коефіцієнта внутрішнього тертя безпосередньо покриття в залежності від параметрів системи. На рис. 1 як приклад наведено дані вимірювань внутрішнього тертя ($Q-1$) в зразках із заліза (крива 1) і системи «залізо - покриття» (крива 2), а також результати обробки цих вимірювань безпосередньо для покриттів (крива 3) з Mo і $NiAl$.

Розрахункові криві (4) - (7) на рис. 1, б характеризують втрати енергії в покриттях при різних можливих співвідношеннях модулів пружності покриття і основи $\bar{E} = E_n / E_0$. Обробка цих даних для покриття $NiAl$ призводить до лінійної залежності розсіювання енергії (загасання енергії) пружних коливань і співвідношення модулів пружності \bar{E} у вигляді:

$$Q_n^{-1} = 1,4 \cdot 10^{-2} - 4 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{E}. \quad (1.10)$$

Подальша комбінація (1.8) - (1.10) дозволяє визначити коефіцієнт внутрішнього тертя і модуль пружності відповідного покриття для конкретних умов вимірювань.

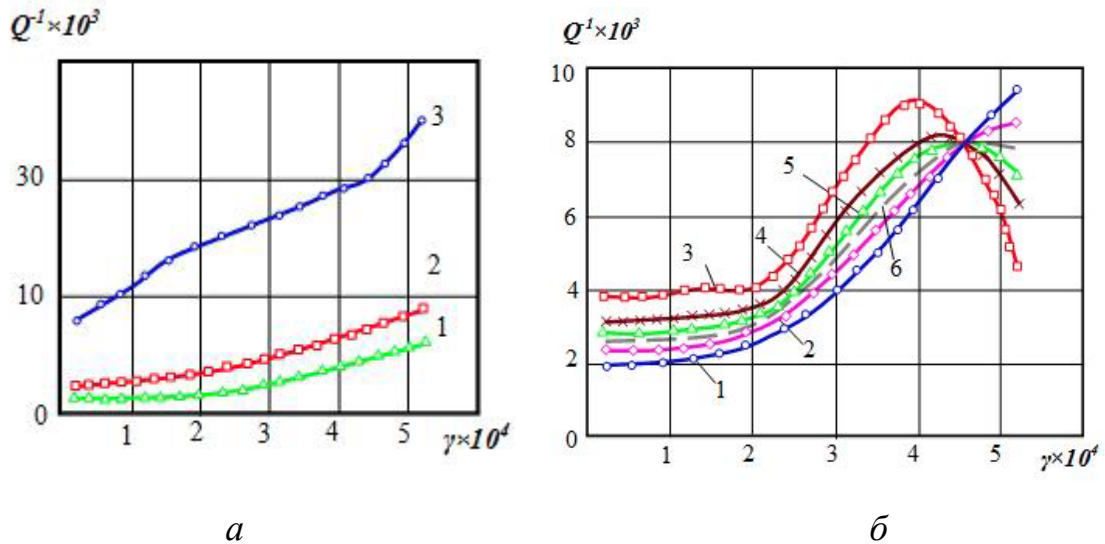


Рисунок 1. Внутрішнє тертя в зразках із заліза без покриттів (крива 1), зразків з покриттями (крива 2) і окремо покриттів (крива 3): а - Мо; б - NiAl; криві (4) - (7) розраховані для $\bar{E} = 0,5; 0,8; 1,0; 1,5$, відповідно.

1. 3 Теоретичні відомості електропровідності металів

Електропровідність являє собою можливість тіла пропускати електричний струм під дією електричного поля. Для характеристики даного явища застосовується величина питомої електропровідності σ . Як показує теорія, величину σ можна знайти через концентрацію n вільних носіїв заряду e , масу m , час вільного пробігу τ_e , час вільного пробігу λ_e та середню дрейфову швидкість носіїв заряду. Для металів в ролі вільних носіїв заряду виступають вільні електрони, з чого випливає:

$$\sigma = ne^2 \cdot \tau_e / m = (n \cdot e^2 / m) \cdot (\lambda_e / \langle v \rangle) = e \cdot n \cdot u \quad (1.11)$$

де u – рухливість носіїв, тобто фізична величина, чисельно рівна дрейфовій швидкості, зумовленої носіями в полі одиничної напруженості, а саме:

$$u = \langle v \rangle / E = (e \cdot \tau_e) / m \quad (1.12)$$

В залежності від σ усі різновиди речовин поділяються на провідники, діелектрики та напівпровідники.

З точки зору зонної теорії, ділення речовин на провідники, напівпровідники і діелектрики зумовлюється тим, як заповнена електронами

при 0 К валентна зона кристалу: частково, чи повністю.

Енергія, яка повідомляється електронам, навіть слабким електричним полем, порівнянна з відстанню між рівнями в енергетичній зоні. Якщо в зоні є вільні рівні, то електрони, порушені зовнішнім електричним полем, будуть заповнювати їх. Квантовий стан системи електронів буде змінюватися, і в кристалі з'явиться переважне (спрямоване) рух електронів проти поля, тобто електричний струм.

Якщо валентна зона заповнена повністю, то зміна стану системи електронів може статися тільки при переході їх через заборонену зону. Енергія зовнішнього електричного поля такий перехід здійснити не може.

Перестановка електронів усередині повністю заповненою зони не викликає зміни квантового стану системи, тому що самі по собі електрони невиразні.

У таких кристалах зовнішнє електричне поле не викличе появу електричного струму, і вони будуть непровідниками (діелектриками). З цієї групи речовин виділені ті у яких ширина забороненої зони $\Delta E \leq 1 \text{ eV}$ ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

Перехід електронів через заборонену зону у таких тіл можна здійснити, наприклад, за допомогою теплового збудження. При цьому звільняється частина рівнів - валентної зони і частково заповнюються рівні наступної за нею вільної зони (зони провідності). Ці речовини є напівпровідниками.

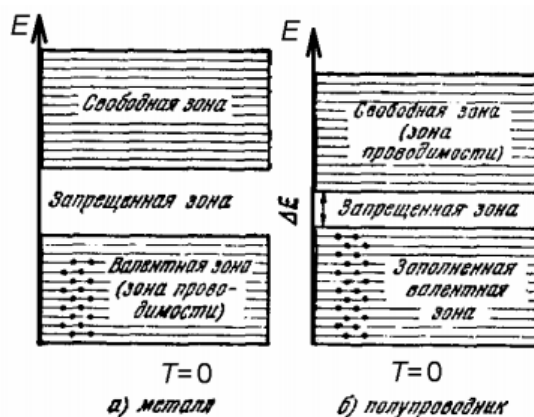


Рис.10.1

Рисунок 1.2 – Діаграма розподілу зон в: а) металах, б)напівпровідниках

Згідно виразу (1.11) зміна електропровідності (електричного опору) тіл з температурою може бути викликано зміною концентрації n носіїв заряду або зміною їх рухливості u .

Квантово-механічні розрахунки показують, що для металів концентрація n вільних носіїв заряду (електронів) дорівнює:

$$n = (1 / 3\pi^2) \cdot (2mE_F / \hbar^2)^{3/2} \quad (1.13)$$

де $\hbar = h / 2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж • с – нормована стала Планка, E_F – енергія Фермі.

Так як E_F практично від температури T не залежить, то і концентрація носіїв заряду від температури не залежить. Отже, температурна залежність електропровідності металів буде повністю визначатися рухливістю u електронів, як і впливає з формули (1.11). Тоді в області високих температур:

$$u \sim \lambda_e / \langle v \rangle \sim T^{-1} \quad (1.14)$$

а у області низьких температур:

$$u \sim \lambda_e / \langle v \rangle \sim \text{const} (T) \quad (1.15)$$

Ступінь рухливості носіїв заряду буде визначатися процесами розсіювання, тобто взаємодією електронів з періодичним полем решітки. Так як поле ідеальної решітки строго періодичне, а стан електронів - стаціонарне, то розсіювання (виникнення електричного опору металу) може бути викликано тільки дефектами (домішковими атомами, спотвореннями структури і т.д.) і тепловими коливаннями решітки (фононами).

Поблизу 0 К, де інтенсивність теплових коливань решітки і концентрація фононів близька до нуля, переважає розсіювання на домішках (електрон-домішкові розсіювання). Провідність при цьому практично не змінюється, як впливає з формули (1.15), а питомий опір:

$$\rho = 1 / \sigma \quad (1.16)$$

має постійне значення, яке називається питомою залишковим опором $\rho_{ост}$ або питомою домішковим опором $\rho_{прим}$, тобто:

$$\rho_{ост} \text{ (или } \rho_{прим}) = \text{const} (T) \quad (1.17)$$

В області високих температур у металів стає переважаючим електрон-фононних механізм розсіювання. При такому механізмі розсіювання електропровідність обернено пропорційна температурі, як видно з формули (1.13), а питомий опір прямо пропорційно температурі:

$$\rho_{ф} \sim T \quad (1.18)$$

Графік залежності питомої опору ρ від температури наведено на рис. 1.3.

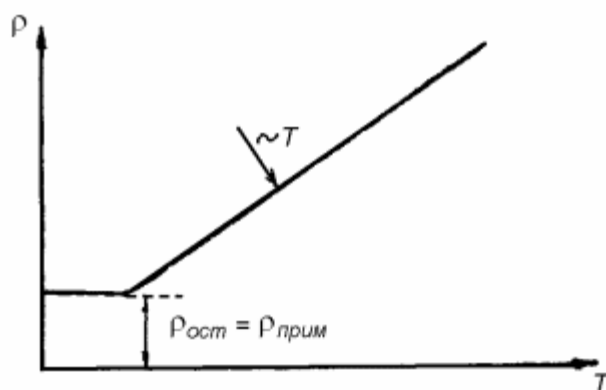


Рисунок 1.3 – Графік залежності питомого опору ρ від температури T

При температурах відмінних від 0 К і досить великій кількості домішок можуть мати місце як фононна, так і електрон-домішкові розсіювання; сумарне питомий опір має вигляд:

$$\rho = \rho_{прим} + \rho_{ф} \quad (1.19)$$

Вираз (1.19) являє собою правило Матіссена про аддитивності опору. Слід зазначити, що як фононна, так і електрон-домішкові розсіювання носить хаотичний характер.

1.4 Мета та задачі дослідження

Метою роботи є аналіз з залученням розрахунково-експериментальних

методів дослідження пружних та міцносних властивостей композиційних матеріалів, їх електропровідності, зв'язаних з особливостями формування структури та складу покриттів при плазмовому напилення.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні питання:

- Розробити розрахунково-експериментальну методику виявлення модуля пружності плазмових покриттів з застосуванням результатів на вигин;
- Порівняти отримані результати з даними інших, альтернативних, методів вимірювання, такими як мікроідентування, випробування на розтяг;
- Провести аналіз адгезійної і когезійної міцності плазмових покриттів з урахуванням фазового складу і особливості структури отриманих покриттів, а також міжфазної зони;
- Проаналізувати взаємозв'язок міцносних характеристик з електропровідністю композиційних покриттів.

2 МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТІВ

2.1 Матеріали для композиційних плазмових покриттів

Досліджувались плазмові покриття на основі порошків Mo, Ni, Al, NiCr, NiAl, Al₂O₃, NiCrBSi (ПГ-10) (фракція 20-40 мкм), напилюваних на вуглецеву сталь та сталь 08X18H10T, а також у вигляді композиційних систем на основі макропорошків Al₂O₃, NiAl, NiCr, та нанопорошків діоксиду кремнію SiO₂ (аеросил), алюмоаеросилу і титан аеросилу (Al₂O₃·SiO₂, TiO₂·SiO₂ – для спрощення названі AlaL та TiaL, відповідно), різний склад яких представлений у таблиці 2.1 [4].

Таблиця 2.1 Склади порошкових матеріалів

ОДНОКОМПОНЕНТНІ ПОРОШКИ				
ПОРОШОК		МАРКА (СКЛАД)		
Mo		ПМ-М (Mo – 99,8 %)		
Al ₂ O ₃		Г-0, ГОСТ 6912-74		
NiAl		ПН85Ю15 (Ni – 85 %, Al – 15%)		
NiCr		ПГ-10Н-01, ПГ-12Н-01		
ПОРОШКОВІ СУМІШІ				
СКЛАД	NiCr	NiAl	(Al ₂ O ₃ ·SiO ₂)	
NiAl – (Al ₂ O ₃ ·SiO ₂)	–	70	30	
			Al ₂ O ₃	SiO ₂
NiCr – (Al ₂ O ₃ ·SiO ₂)	70	–	80	20

В даному складі діоксид кремнію SiO₂ (аеросил) представлений у вигляді нанодисперсних частинок, привитих в процесі термомеханічного змішування до мікрочасток оксиду алюмінію Al₂O₃, утворюючи на його поверхні тонкий шар. Детально процес утворення такого роду з'єднань описаний у [9].

При дослідженні фізико-механічних характеристик системи основа-покриття проводились випробування на розтяг, вигин, в'язкість руйнування

(тріщиностійкість) по стандартним методикам [5,6].

Покриття наносились на поверхню зразків плазмовим напиленням на модернізованій установці УПНС-304 (виробництво Україна) з плазмотроном, котрий забезпечував ламінарний витік плазмового потоку.

Фізико-механічні властивості, як самого покриття, так і композиції «основа-покриття», визначалися за результатами механічних випробувань на вигин, згідно з розробленими розрахунково-експериментальним методикам [5, 14, 20]. Зокрема, експерименти проводилися на установці моделі KOGEL (виробництво Німеччина), механічна частина якої була доповнена персональним комп'ютером, що має певне програмне забезпечення. Зв'язок комп'ютера і датчиків установки забезпечувалася за рахунок електронного блоку у вигляді АЦП ADC121S021.

Випробування проводилися на зразках розміром $100 \times 10 \times 1$ з плазмовими покриттями товщиною 50-150 мкм, нанесеними на одну сторону зразка.

Для визначення фізико-механічних характеристик системи основа-покриття запропоновані різні, як розрахункові, так і експериментальні методи досліджень.

Для випробувань на 3-х точковий вигин в якості основи використовувалися металеві пластинки довжиною 80 мм, шириною 8 мм і товщиною 1 мм. Покриття наносилось тільки на одну поверхню пластинки. Товщина покриття становила в середньому 50 мкм і варіювалася від зразка до зразка. При випробуваннях на вигин фіксувалася навантаження, при якій відбувалося розтріскування або відшаровування покриття під дією розтягуючих навантажень в ньому.

2.2 Обладнання та методи нанесення покриттів

2.2.1 Плазмотрон для напилення

В даній роботі будуть досліджуватись покриття, які були створені за допомогою плазово-дугового напилення, тому доречно буде привести плазмотрон для напилення.

Плазмотрон використовується для нанесення різних видів технологічних покриттів на зразки. Звичайний плазово-дуговий спосіб напилення покриттів характеризується такими показниками:

- можливість отримання покриття товщиною в межах від 50 мкм до 10 мм з матеріалів, які плавляться без розкладу при температурах плазового струменя;
- відносна мала теплова дія на поверхню основи (звичайне нагрівання її в межах $(50-150)^{\circ}\text{C}$), що дозволяє наносити покриття на широкий круг матеріалів, включаючи пластмаси, деревину, картон, і тому подібне;
- можливість гнучкої регуляції електричного і газового режиму роботи плазмотрону, зокрема в процесі напилення, дозволяє керувати енергетичними характеристиками напилюваних частинок;
- можливість використання для утворення струменя плазми газів різного роду: інертних (аргон, гелій), відновлювальних (водню), таких, що окислюють (повітря), що при використанні камер із захисним середовищем або вакуумом, а також при використанні захисних насадок, дозволяє регулювати властивості середовища, в якому нагріваються і переміщуються частинки напилюваного матеріалу.

До параметрів технологічного процесу плазового напилення, які характеризують режим роботи плазмотрону і визначають процес нагрівання розпилювального матеріалу, є ентальпія, температура і швидкість плазового струменя.

Із збільшенням потужності дуги N_d інтенсивно збільшується температура і ентальпія (H) плазового струменя. Вплив витрат плазмоутворюючого газу ($G_{пл}$) протилежний. Потужність дуги визначається, у свою чергу, двома параметрами - силою струму і напругою.

Напруга дуги залежить від довжини дуги, яка в основному визначається плазмоутворюючим газом і його витратами, а також конструкцією плазмотрона.

При певній напрузі потужність дуги регулюється гнучким параметром - силою струму дуги.

При незмінній потужності дуги збільшення витрат плазмоутворюючого газу знижує температуру нагрівання порошкових частинок, хоча підвищення швидкості частинок при цьому позитивно впливає на ефективність процесу.

Особливо важливий вплив на теплофізичні характеристики плазмового струменя надає вид газу. Так, високий ступінь нагрівання напилюваних частинок досягається при використанні в якості плазмоутворюючого газу азоту, або добавки до аргону водню або гелію, використання аміаку дозволяє підвищити теплову ефективність нагрівання порошку.

Для плазмового напилення використовують порошки грануляцією від 5 до 100 мкм. Із збільшенням розміру частинок виникають труднощі їх нагрівання до температури плавлення. Збільшення витрати порошку приводить до охолодження плазмового струменя. Звичайні витрати порошку 0,25...2 г/сек. Витрата транспортуючого газу частіше складає 10% від витрати плазмоутворюючого.

Для плазмового напилення дистанція напилення складає від 50 до 300 мм. Малі відстані не завжди забезпечують розігрівання частинок до температури плавлення і надання ним необхідної швидкості. Із збільшенням дистанції на основній ділянці струменя різко знижується її температура і швидкість. Відповідно спостерігається зменшення температури і швидкості частинок.

Тому для задоволення вимог плазмового напилення на кафедрі «Відновлення деталей машин» було розроблено спеціальний плазмотрон, який має ряд особливостей: ламінарний потік плазмового струменя та малий діаметр сопла (2–3 мм) дозволяють отримувати пляму напилення 3–6 мм; низька теплова потужність плазмового струменя дозволяє зменшити нагрів основи; значна довжина плазмового струменя забезпечує кращі умови для розплавлення оболонки та ядра порошку; обжимання двофазного потоку зовнішнім концентричним струменем газу забезпечує захист частинок від окислення. Схема плазмотрону представлена на

рисунку 2.1, а технічні особливості в таблиці 2.2, а також вольт-амперна характеристика плазмотрону на рисунку 2.2.

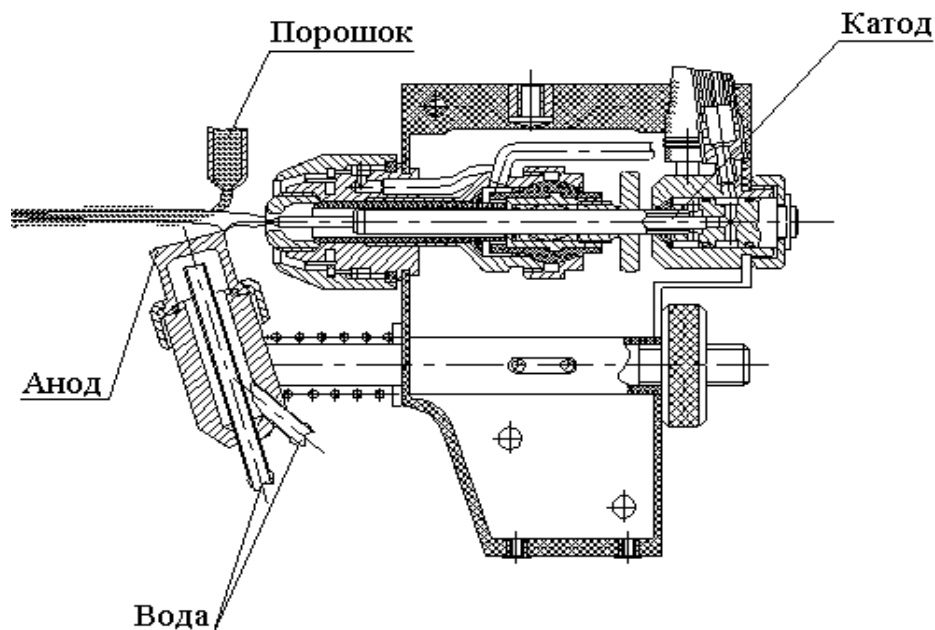


Рисунок 2.1 – Схема розробленого плазмотрону для напилення

Таблиця 2.1 Технічні характеристики плазмотрону

ПАРАМЕТР, ОД.ВИМ	ЗНАЧЕННЯ
Робочий струм плазмотрону, А	80-120
Робоча напруга, В	50-60
Потужність плазмотрону, кВт	До 8,0
Робочий газ	Аргон
Витрати плазмо утворюючого газу, л/хв.	2,0-3,0
Витрати захисного газу, л/хв.	1,0-4,0
Охолодження плазмотрону	Вода
Продуктивність, кг/год	0,5-4
КВМ*	0,6-0,8

* - КВМ – коефіцієнт використання матеріалу

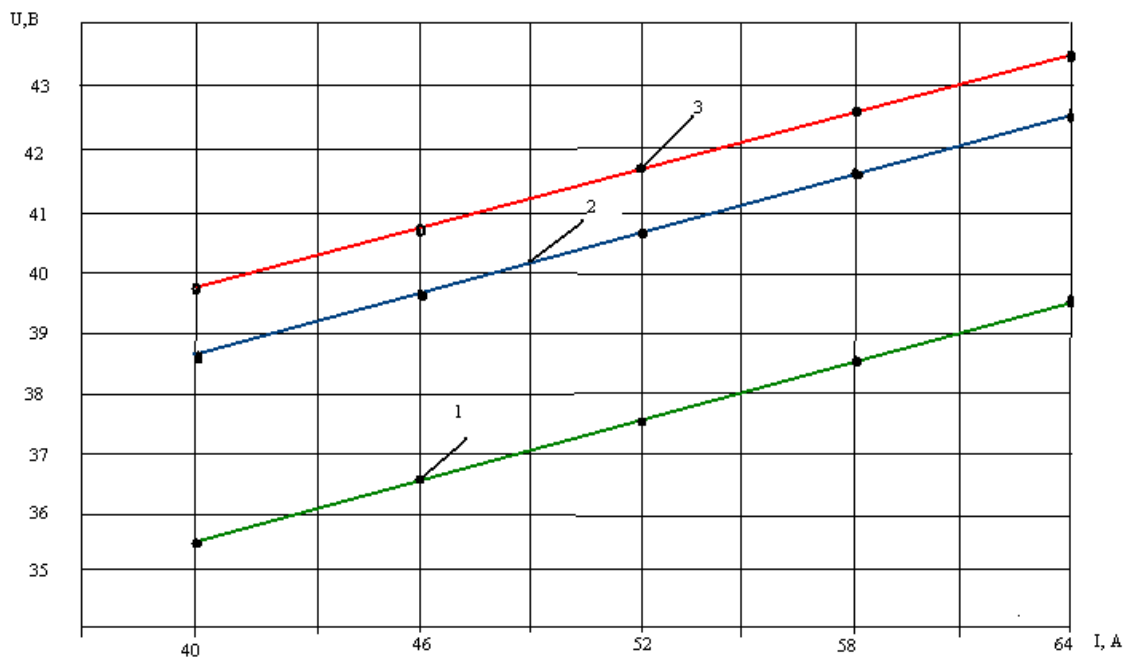


Рисунок 2.2 – Вольт-амперні характеристики плазмотрону (для діаметру спола 2мм, плазмо утворюючий газ (надалі ПУ) – аргон): 1 – витрата ПУ 1-50 л/год; 2 – витрата ПУ 2-65 л/год; 3 – витрата ПУ 3-80 л/год.

2.2.2 Установка для випробування зразків на згин KOGEL

Для виявлення механічних характеристик системи основа-покриття проводились випробування на розтяг та згин. На рис. 2.3 представлена установка для випробування зразків на згин KOGEL, що використовувалась у роботі.



Рисунок 2.3 – Установка для випробування зразків на згин KOGEL: а)персональний комп'ютер; б) механічна частина; в) панель керування; г) АЦП; д) джерело живлення АЦП.

У таблиці 2.2 наведено технічні характеристики представленої та використаної в роботі установки для випробування зразків на згин KOGEL.

Таблиця 2.2 Технічні характеристики установки KOGEL

ПАРАМЕТР, ОД.ВИМ.	ЗНАЧЕННЯ
Максимальне навантаження, Н	500
Діапазон регулювання швидкості руху стискаючого ролика, мм/с	0-0,5
Максимальні розміри зразків, що можуть досліджуватись, мм	140x15x5
Діапазон регулювання напруги датчиків руху та навантаження, В	0-4
Електроживлення установки, В	127,220
Габарити, мм	400x200x745
Вага, кг	25

На рис. 2.4 схематично зображено сам процес випробування на згин.

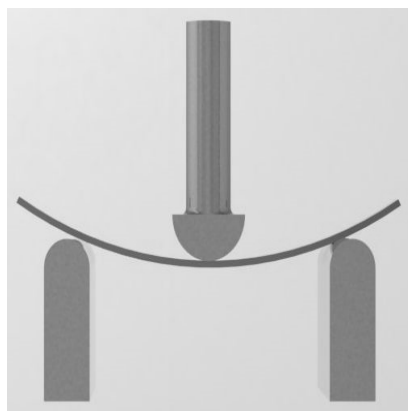


Рисунок 2.4 – Схема випробування на згин

2.3. Методика досліджень матеріалів з покриттям

2.3.1 Методика визначення мікротвердості плазмових покриттів

Основне призначення методу - дослідження твердості мікрооб'ємів поверхні зразка (окремих частинок і структурних складових). Вимірювання мікротвердості проводили на мікротвердомірі ПМТ-3. Як індентор використовують чотиригранну піраміду з квадратною основою. Кут загострення піраміди становить 136° . Зразками для вимірювань служать металографічні шліфи.

Статичне навантаження, яке становило 0,98 Н (100 гр) для

самофлюсівних покриттів та 1,96 Н (200 гр) для керамічних, прикладали до піраміди, яка втискувалася у поверхню зразка, що досліджувався. Тривалість дії навантаження становила 3–15 с. Відбитки робили вибірково на більш однорідних ділянках поверхні, загальна кількість на кожному зразку складала 6–8 точок. Після зняття навантаження вимірювали параметри відбитка, який залишився, і розраховували мікротвердість матеріалу за допомогою таблиць за ГОСТом 2999-75 або за формулою:

$$H = 1,854 P / d^2 \quad (2.1)$$

де P - нормальне навантаження, яке прикладено до алмазного індентора;
 d - середнє арифметичне довжин обох діагоналей відбитка.

2.3.2 Методика експерименту вимірювання електроопору плівок

Електроопір визначається подвійним містом опору; схема вимірювальної ланки приведена на рисунку 2.4, а електрична схема для вимірювання електроопору покриттів на рисунку 2.5.

Зразок 2 з напиленим шаром 1 стискається електродами 3, зроблених із міді, і оправками 4 гвинтової струбцини, стискаюче зусилля від якого передається крізь поверхні. Значне зусилля, що прикладається (постійне в процесі вимірювання) забезпечує зменшення похибок при вимірюванні перехідних контактних опорів. Струмові кінці 5, достатньо масивні для проходження струму до 20 А без нагріву, кріпляться шляхом роз'ємних луджених притискаючих з'єднань. Потенціальні тонкі кінці 6 і 7 приварюються один до зразка, інший до електроду.

Електроопір між потенціальними кінцями:

$$R_{12} = R_M + R_{\Pi} + R_K + R_0, \quad (2.2)$$

де R_M – опір матеріалу зразка (основи); R_{Π} – опір матеріалу покриття; R_K – контактний опір на ділянці між покриттям і основою; R_0 – опір на контакті між електродом і шаром покриття.

Значення опорів, які входять в рівняння (2.2), крім опору в зоні контакту R_K , для стандартної системи являються постійними. В той же час

по зміні опору R_K можна дати оцінку процесам, які обумовлюють і адгезійні властивості системи основа-покриття.

Оскільки значення електроопорів незначні, необхідно враховувати різні фактори, які можуть чинити вплив під час вимірювання або внести похибку при багатократних вимірюваннях. Відомо, що від якості підготовки поверхні і величини контактуючого навантаження залежить електроконтактний опір на границі між двома поверхнями [3,21,22]. В даному випадку це може виражатись в значенні R_0 . Тому, щоб суттєво не змінилось, необхідна постійна якість обробки поверхні і однакового зусилля стиснення. Шорсткість поверхні повинна бути практично однаковою. При постійному стискаючому навантаженні значення R_0 практично однакове при багатократних змінах. Постійними також залишаються і значення опору R_M .

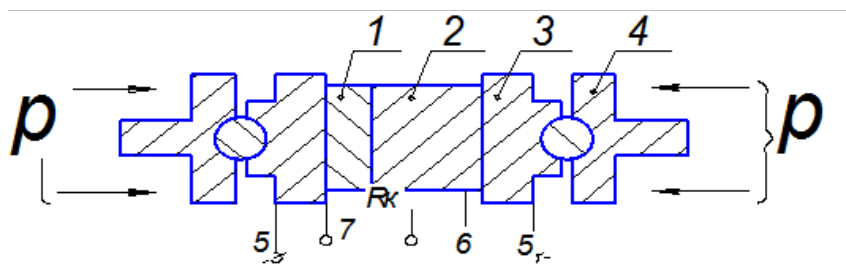


Рисунок 2.5 Схема ланки для вимірювання контактних електроопорів
1 - зразок з покриттям; 2- контактна фольга; 3- затискачі - струмовідводи;
4- діодний мостик; 5- понижуючий автотрансформатор; - понижуючий зварювальний трансформатор.

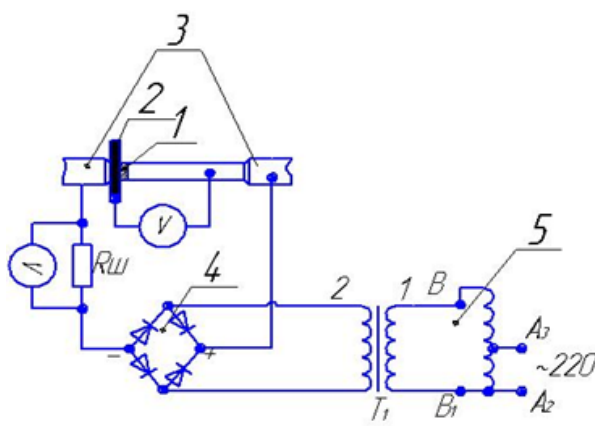


Рисунок 2.6 Електрична схема для вимірювання електроопору покриттів.

Враховуючи дію приведених факторів на виміряний електроопір, значення R_K можна установлювати наступним чином. Оцінюючи R_{12} при

двох значеннях товщини покриття, перед другим вимірюванням зшліфовуємо покриття на певну величину. Визначаючи R_{12} при двох товщинах покриття, отримуємо систему рівнянь:

$$R'_{12}(0) = R'_M + R'_H + R'_K + R'_0; \quad (2.3)$$

$$R''_{12}(0) = R''_M + R''_H + R''_K + R''_0.$$

Тут штрихи відповідають порядку вимірювань: $R'_M = R''_M$, $R'_K = R''_K$, $R'_0 \approx R''_0$. Таким чином, система (2.3) дає можливість обчислити електроопір R_K , оскільки R'_H як $R'_H = \alpha R''_H$ (коефіцієнт α показує, в скільки разів попередній шар покриття більше останнього).

Знаючи $R''_H = \frac{R'_{2,3} - R''_{2,3}}{\alpha - 1}$, знаходимо значення R_K .

$$R_H = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.4)$$

де l - товщина покриття; S - площа перерізу зразку.

Встановлено, що питомий опір покриттів може відрізнятись на два порядку більше опору компактних матеріалів може суттєво відрізнятись.

Аналізуючи даний процес можна сказати, що густина струму на поверхнях, які мають плівку, менша густини струму на вихідній сталій поверхні без плівки. Збільшення адгезійної міцності відповідає зниженню густини струму при поляризації електрода.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ СИСТЕМИ «ОСНОВА-ПОКРИТТЯ»

3.1 Механічні характеристики системи «основа-покриття»

В таблиці 3.1 представлені дані о мікротвердості, міцності на згин та на розтягнення для ряду композицій з плазмовими покриттями без наступного напилення обробки, а також з пройденою відповідну термодифузну обробку. Для деяких матеріалів у якості порівняння вказані значення міцності зчеплення покриттів з основою.

Таблиця 3.1 Фізико-механічні характеристики багатокomпонентних композиційних покриттів

ПОКРИТТЯ	Режим ОБРОБКА	σ_{uz} , МПа (Сталь 20 $\sigma_{uz}=242$ МПа)	σ_{θ} , МПа (Ст. 3 - $\sigma_{\theta}=475$ МПа)	H_{μ} , ГПа	$\sigma_{сц}$, МПа
AlNi+Al ₂ O ₃ +SiO ₂	н	363	524	4,6	41
Ni-B-Nb-SiO ₂	н	358	529	3,5	53
	о	243	610	10,0	-
ПГ-10Н-01 + Al ₂ O ₃ + SiO ₂	н	315	477	6,5	59
	о	330	510	6,9	-
ПГ-12Н-01 + TiO ₂ +SiO ₂	н	295	533	8,0	-
	о	410	620	9,0	-
ПГ-12Н-01 + Mo + TiO ₂ +SiO ₂	н	280	540	5,0	54
	о	375	700	8,7	-
ПГ-10Н-01 + TiO ₂ + SiO ₂	н	245	-	7,2	48
	о	310	-	5,9	-
ПГ-12Н-01 + +Al ₂ O ₃ + SiO ₂	н	287	-	7,0	-
	о	540	-	6,6	-
Ni-Nb	н	412	400	4,5	32
	о	286	455	9,1	-
ПГ-10Н-01 (Ni- Cr-B-Si)	н	413	480	6,5	45
NiCr	н	360	450	2,1	30
AlNi	н	412	500	2	45

(н – після напилення, о – після термодифузійної обробки)

На малюнку 3.1 продемонстровані залежності механічних характеристик плазмових покриттів від об'ємної долі високодисперсних складових – оксидів в вихідному матеріалі. Залежності отримані згідно даним таблиці 3.1 та джерела [4].

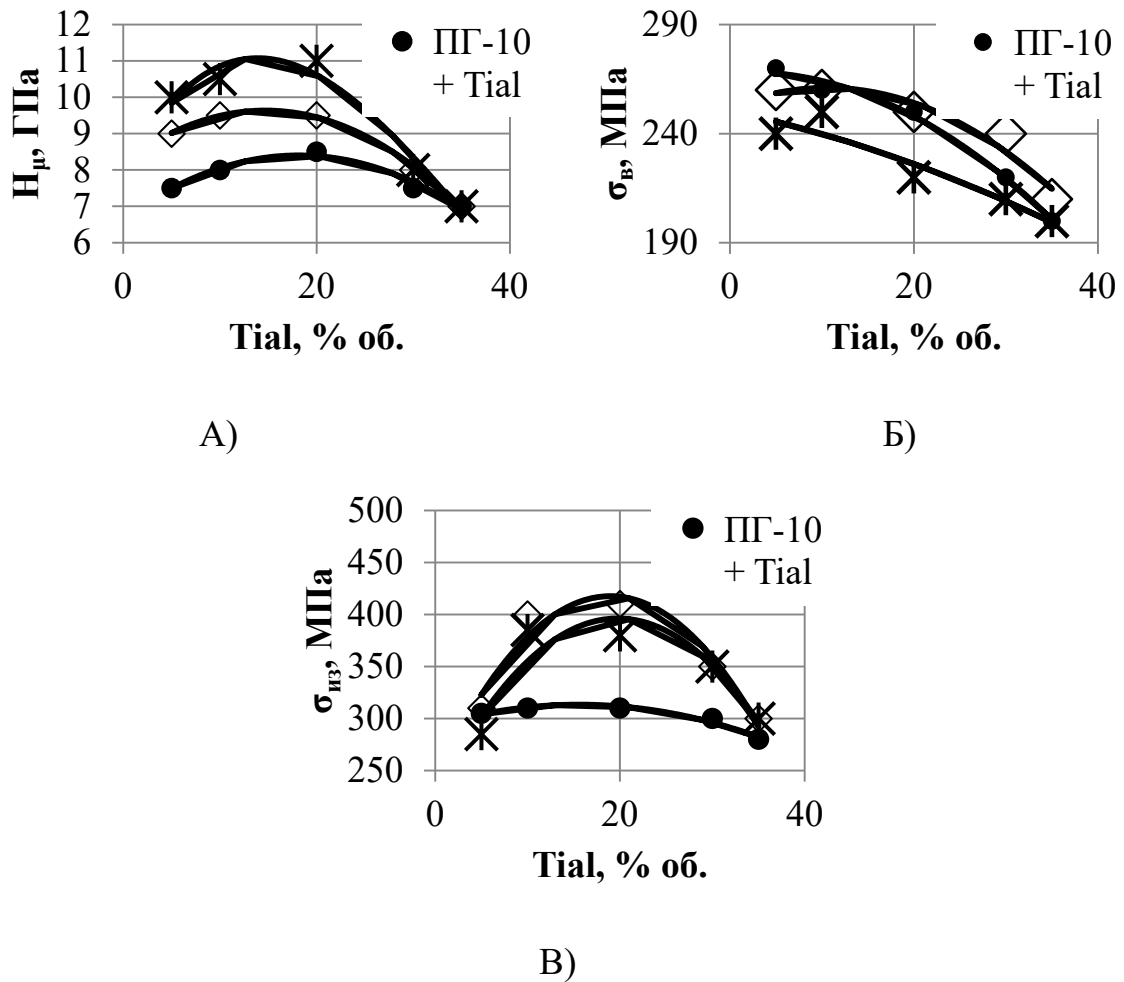


Рисунок 3.2 – Залежності мікротвердості H_μ (а), короткочасної міцності σ_b (б), межі міцності на вигин $\sigma_{из}$ (в) покриттів від об'ємної долі аеросилів (TiaL) у вихідному порошку.

3.2 Розрахунково-експериментальна методика виявлення фізико-механічних характеристик плазових покриттів при випробуванні на згин

При дослідженні фізико-механічних характеристик в процесі випробувань на згин матеріалу з покриттям за допомогою аналого-цифрового перетворювача записувалась крива «навантаження-деформація», на якій спостерігаються різні ділянки-зони, що характеризують етапи деформації.

Розрахунок модуля пружності проводиться на першій ділянці (на початковій стадії), де спостерігається лінійна залежність напруження від пружної деформації зразка і його геометричних розмірів [2,7,12,14,17].

Виявлення пружних характеристик матеріалів газотермічних покриттів

дуже необхідно для прогнозування міцності (адгезійної, когезійної), залишкових напружень, дефектності структури покриття, а також для прогнозування можливого типу руйнування системи «основа-покриття».

В сучасній літературі описано безліч методик знаходження модулів пружностей компактних матеріалів, однак їх застосування до КМ типу газотермічне покриття-основа або неможливе, або має ряд характерних особливостей та складнощів.

Складнощі полягають в структурі самого покриття, його малій товщині, наявності дефектів, високих вимог до точності вимірювань. В літературі описані деякі залежності модулів пружностей покриттів від товщини, пористості, параметрів нанесення покриттів, його структури (наявність нанорозмірних складових). Все це має свій вклад до показників модулів пружностей покриття і має бути враховано при його виявленні.

В даній роботі пружні характеристики покриттів виявлялись двома різними методами. Перший метод – механічний, являє собою стандартні випробування матеріалів з покриттями на трьох точковий вигин, з спрощеною методикою розрахунку модуля пружності і міцності покриттів і можливістю оцінки тріщиностійкості самого покриття і міжфазної зони.

Другий метод – фізичний, полягає в оцінці внутрішнього тертя зразків з покриттями, з розробленою методикою виявлення модуля пружності. Незважаючи на це, метод внутрішнього тертя дає можливість знаходження характеристик тонкої структури і їх демпферної властивості.

Випробування на трьох точковий вигин проводились на зразках з розмірами 100x10x1 мм з нанесеними плазмовими покриттями товщиною 100-150 мкм. В якості покриттів використовувались традиційні матеріали – AlNi, Mo, а також складні композиції металокерамічних порошків з наноскладовими у вигляді оксиду кремнію SiO₂ та порошків з плакованими нанорозмірними оболонками з міді, титану та алюмінію. Покриття наносились з одного боку зразка на установці з вдосконаленим плазмотроном, що забезпечив ламінарний витік плазмового потоку.

На рисунку 3.3 показана форма зразка та схема випробувань на трьох точковий вигин.

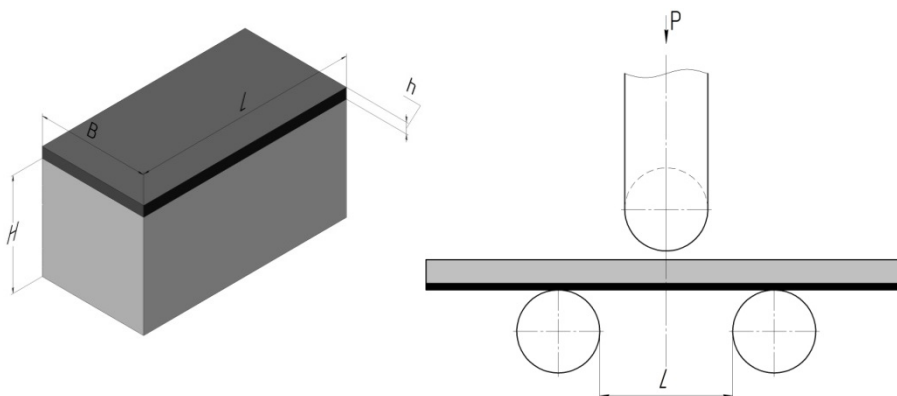


Рисунок 3.2 – Форма зразка та схема випробувань на трьох точковий вигин

При випробуванні на вигин за допомогою аналого-цифрового перетворювача записувалась крива вигину. На рисунку 3.3 представлена типова крива вигину для зразка з покриттям з характерним для даного випробування зонами.

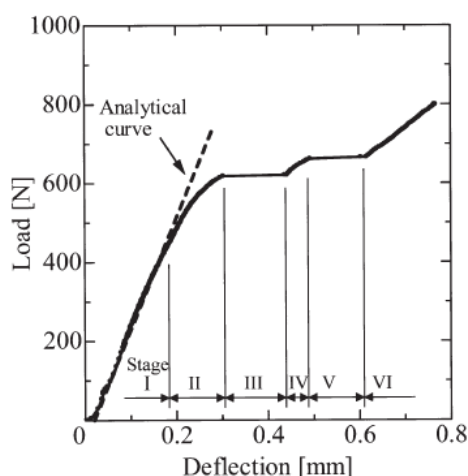


Fig. 9. Typical load – deflection curve in the four-point bending test.

Рисунок 3.3 – Типова крива вигину зразків з покриттями при випробуваннях на вигин

Типова крива деформація-прогиб при чьотирьохточковому вигину показана на кривій 2, штриховою лінією показана теоретична крива без відслоєння і розтріскування (розрахунки зроблені згідно теорії вигина). Експериментальна крива розбита на 6 ділянок. На ділянці 1 спостерігається лінійна залежність напруження від прогину, аналогічна розрахунковій. На ділянці 2 спостерігається відхилення від лінійності – наклон кривої зменшується при збільшенні прогину. Та сама залежність спостерігається й на ділянці 4. В цих областях вертикальні тріщини зароджуються на кромці

ребра і жорсткості та швидко розповсюджуються через основний шар покриття до границі розділу з підшаром. Полога ділянка кривої спостерігається на ділянках 3 і 5. На цих стадіях тріщина швидко розповсюджується до моменту, коли її вершина доходить до внутрішній ліній навантаження. На стадії 6 прогин знову збільшується пропорційно прикладеному навантаженню. Інтенсивність вивільненої енергії для розшарування була розрахована при критичному значенні навантаження відповідній пласкій ділянці кривої. Типова залежність прогин-час показана на рисунку 3.4. На малюнку також показана інтенсивність росту прогину. Скачок інтенсивності відповідає за зміну швидкості росту розшарованої тріщини. Розглядається також вплив термічного старіння на жорсткість зразка.

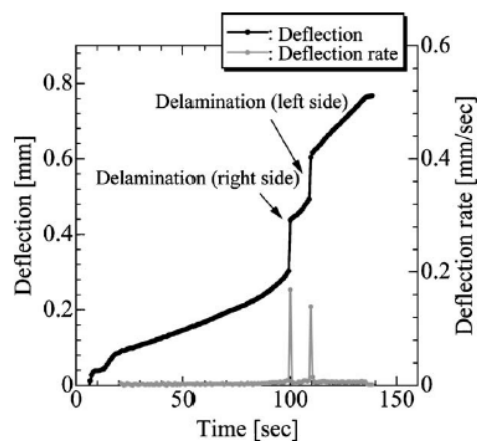


Fig. 10. Typical deflection – time and deflection rate – time curves.

Рисунок 3.4 – Типові залежності прогин-час та швидкість прогину-часу

На рисунку 3.5 показана типова крива згину для зразків основа-теплозахисне покриття.

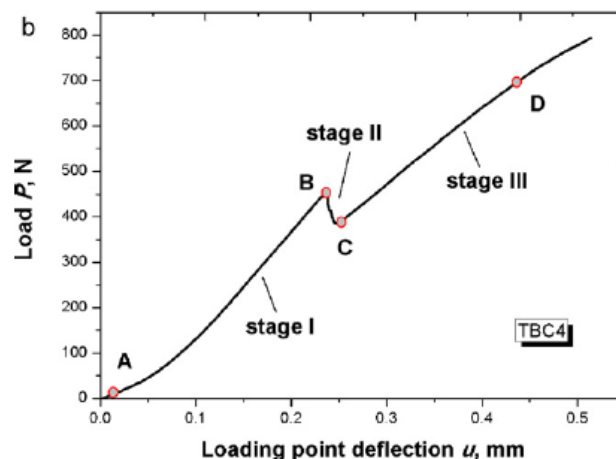
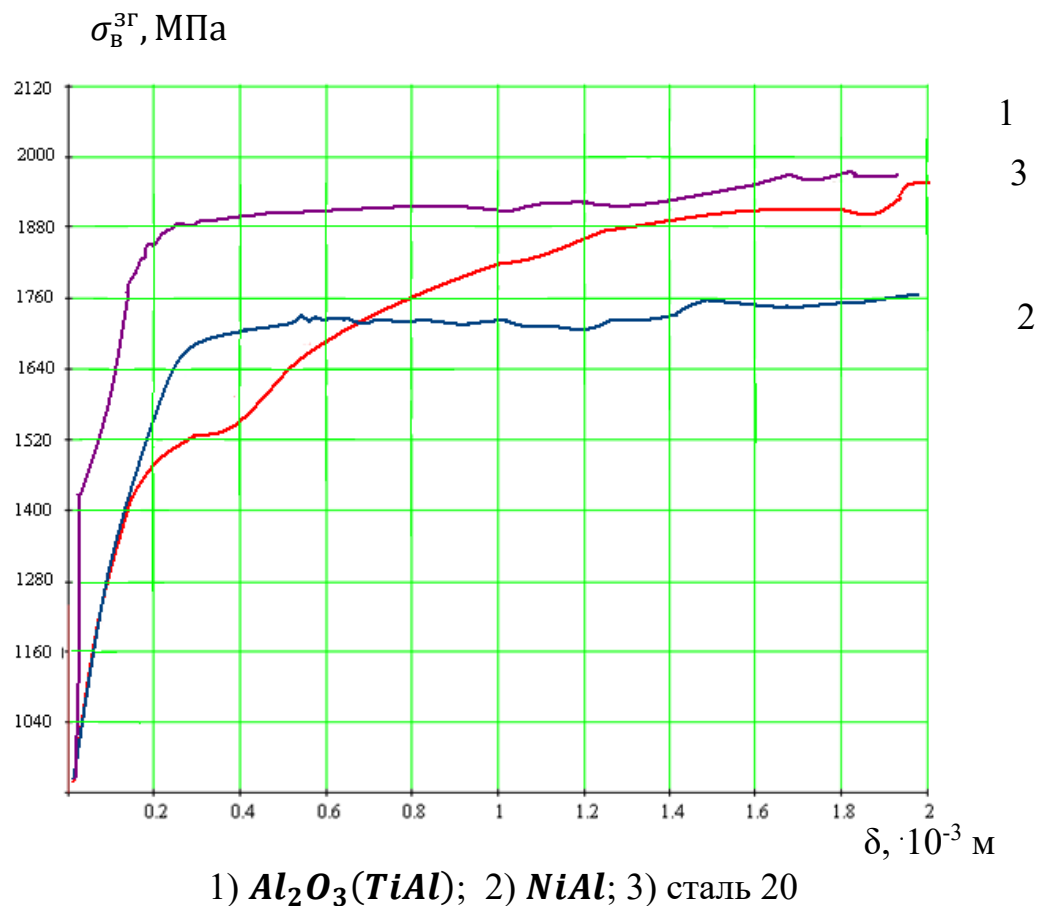


Fig. 6. Measured load–displacement relationships of the TBC specimens by experimental tests (a) all specimens and (b) specimen TBC4.

Рисунок 3.5 – Типова крива згину для зразків основа-теплозахисне покриття

На рисунку 6 показана крива навантаження-прогин для теплостійких покриттів, на якій вказані характерні стадії процесу і нанесені характерні точки для розгорнутого опису результатів експерименту. На стадії 1 (ділянка АВ) спостерігається практично лінійна залежність навантаження від прогину, зразок деформується пружно і накоплює енергію деформації для наступного розтріскування. Після першої стадії ініціювання тріщини спостерігається в верхній частині кромки міжфазної зони покриття, коли навантаження досягає критичного значення в області точки В. Після розшарування тріщина росте в поперечному напрямку зразка і розвивається в міжфазну тріщину (стадія 2, ділянка ВС). На стадії 3 (ділянка CD) прогин росте з ростом навантаження і тріщина розширюється стаціонарно. Точка D – конкретна точка кривої для стадії стаціонарного розширення тріщини.

На рисунку 3.6 показані деякі криві вигину досліджуваних в роботі зразків.



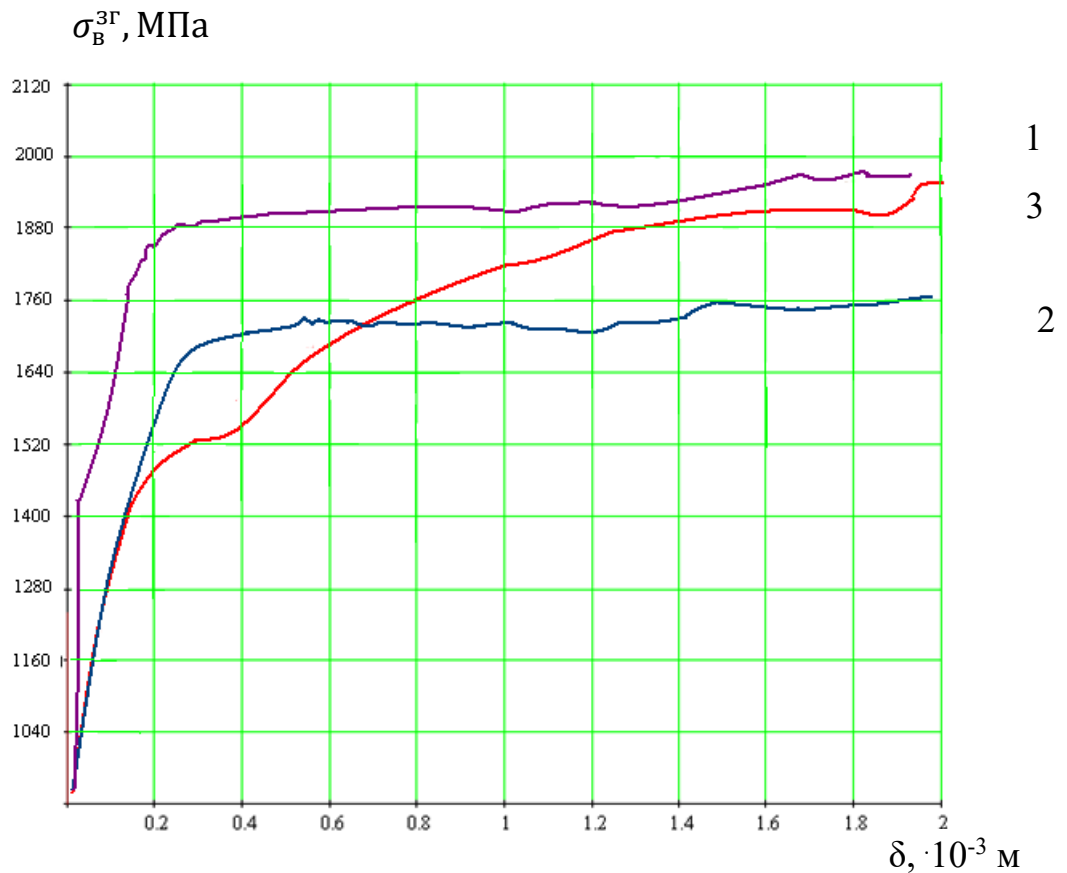


Рисунок 3.6 – Криві вигину зразків з покриттям

Для розрахунку модуля пружності плоских зразків при вигині широко застосовується формула (3.1), враховуючи залежність навантаження, що геометричні розміри.

$$E \text{ (GPa)} = \frac{L^3}{4H^3B \times 1000} \frac{\Delta P}{\Delta f} \quad (3.1)$$

де L – відстань між опорами; H – товщина зразка; B – ширина зразка; P – прикладене навантаження; f – прогин зразку.

Згідно до формули (3.1) можна отримати вираз для прогинів основи і покриття:

$$f_0 = \frac{L^3}{4H^3B \times 1000} \frac{\Delta P}{E_s} \quad (3.2)$$

$$f = f_1 = \frac{L^3}{4(H + h)^3B \times 1000} \frac{\Delta P}{E_c} \quad (3.3)$$

де h – товщина покриття, E_c – модуль пружності покриття з основою.

Введемо відношення прогинів зразка без покриття і з покриттям

використовуючи рівняння (3.2), (3.3):

$$F = \frac{f_0}{f_1} = (1 + R)^3 \frac{E_c}{E_s} \quad (3.4)$$

де $R = h/H$ - відношення товщини покриття до основи.

Для знаходження моменту інерції необхідно виявити положення нейтральної осі зразка, вираз для її знаходження виглядає наступним чином:

$$y_c = \frac{H(H + 2h) + \alpha h^2}{2(H + \alpha h)} \quad (3.5)$$

Момент інерції одностороннього покриття розраховується, використовуючи еквівалентний переріз (нейтральну ось), тобто поперечний переріз зразка з покриттям замінено еквівалентним перерізом, для якого ширина покриття збільшена в α разів і модуль має те ж саме значення, що й для покриття.

Вираз для розрахунку моменту інерції еквівалентного перерізу має вигляд

$$I = I_1 = \frac{BH^3}{12} + \frac{\alpha Bh^3}{12} + BH \left[\frac{\alpha h(H + h)}{2(\alpha h + H)} \right]^2 + \alpha Bh \left[\frac{H^2 + Hh}{2(\alpha h + H)} \right]^2 \quad (3.6)$$

Розглядаючи прогини зразків з точки зору традиційних представлень механіки, отримаємо вирази:

а) для образця с покриттям $f_0 = PL^3/(48E_s I_0)$
(3.7)

б) для образця без покриття $f = PL^3/(48E_s I)$
(3.8)

I_0 – момент інерції зразка з покриттям.

Співставивши рівняння (3.7) та (3.8) отримаємо співвідношення:

$$fI = f_0 I_0 \quad (3.9)$$

Використовуючи спільне вирішення рівняння (3.6) і (3.9) та послідовних спрощень отримаємо залежність для виявлення модуля

пружності покриття:

$$E_f = \frac{-A + \sqrt{A^2 + C}}{2R^3} E_s \quad (3.10)$$

де $R = \frac{h}{H}$; $A = 4R^2 + 6R + 4 - F$; $C = 4R^2(F - 1)$, $F = f_0/f_1$ - співвідношення прогинів основи до прогинів покриття.

Кінцеве вирішення для виявлення модуля пружності покриття з використанням (3.2) з урахуванням прогинів основи і покриття, моменту інерції та після відповідних перетворень прийме вигляд:

$$E_n = \frac{-A + \sqrt{A^2 + C}}{2R^3} E_s. \quad (3.11)$$

Для визначення модуля пружності композиційного плазмового покриття застосована методика, заснована на вимірюванні внутрішнього тертя зразків без покриття і з покриттям. Після обробки експериментальних даних, температурної та амплітудної залежностей внутрішнього тертя системи «основа-покриття» при відповідному рівні деформацій і відповідній температурі розраховуються параметри безпосередньо покриттів, в тому числі нормальний модуль пружності або модуль зсуву.

Для визначення властивості матеріалу покриття протидіяти руйнуванню, використовувались аналітичні рішення та результати експериментів на вигин: що дозволили провести аналіз тріщиностійкості міжфазної зони системи «покриття-основа» та відповідних областей самого покриття при його відшаруванні та розтріскуванні.

Розрахунково-експериментальна методика в основі якої лежать положення класичної теорії міцності та результати випробувань на згин, була застосована для розрахунків когезійної міцності самих покриттів. Як виходить з експериментальних результатів, при дослідженні певного рівня навантаження видно зародження і ріст певних видів тріщин. Міцність при цьому розраховується по критичному навантаженні і при максимальному напруженні в покритті, необхідному для тріщиноутворення на відповідних ділянках [5,12-14]. Кінцеве вирішення для оцінки міцності матеріалів з покриттям при випробуванні на трьохточковий вигин має вигляд:

$$\sigma_p = \frac{P_p \cdot l}{4} \frac{(e-h) \cdot E_c}{J_o E_o + J_p E_p}, \quad (3.12)$$

де P – навантаження, яке викликає або розтріскування, або відшарування покриття, що визначається за діаграмою; l – відстань між опорами; h, H – товщина покриття і основи, відповідно; E_p, E_o – модуль пружності покриття і основи; J_o, J_p – моменти інерції основи і покриття; e – відстань нейтральної лінії від поверхні основи.

З використанням розглянутих вище підходів отримаємо значення критичних напружень для відповідних умов, при яких покриття або руйнується, або відшаровується. Дані положення використані на прикладі різних типів систем «основа-покриття».

Представлені дані є свідками ролі складу покриттів і технології їх нанесення в зміцнювальному ефекті на основний матеріал.

В цьому розділі розроблений алгоритм та методика експериментальних досліджень зразків на згин для оцінки механічних властивостей покриття та системи основа-покриття. Алгоритм експериментальних досліджень складається з двох частин. Перша частина експерименту складається з декількох етапів. По-перше підготовлюють зразки (шліфують поверхню з покриттям та протирають розчинником), потім підготовлені зразки встановлюють на установку для згину (рисунок 2.6). Проводять згинання зразків до певного зміщення роликів δ , в процесі якого дані зусилля та переміщення ролика записують на комп'ютер. Потім зігнуті зразки поміщують під мікроскоп та проводять аналіз поверхні покриття.

Методика досліджень представляє собою математичний розрахунок на основі отриманих експериментальних даних. Її метою отримання технологічних параметрів досліджуваних покриттів.

Вимір механічних характеристик покриттів важливий для розуміння взаємозв'язку між мікроструктурою покриття і механічними властивостями системи основа-покриття. Серед основних механічних властивостей модуль пружності покриття є найбільш важливим. Так, наприклад модуль пружності необхідний при розрахунках на міцність, при визначенні адгезійної і когезійної міцності покриття [23, 24].

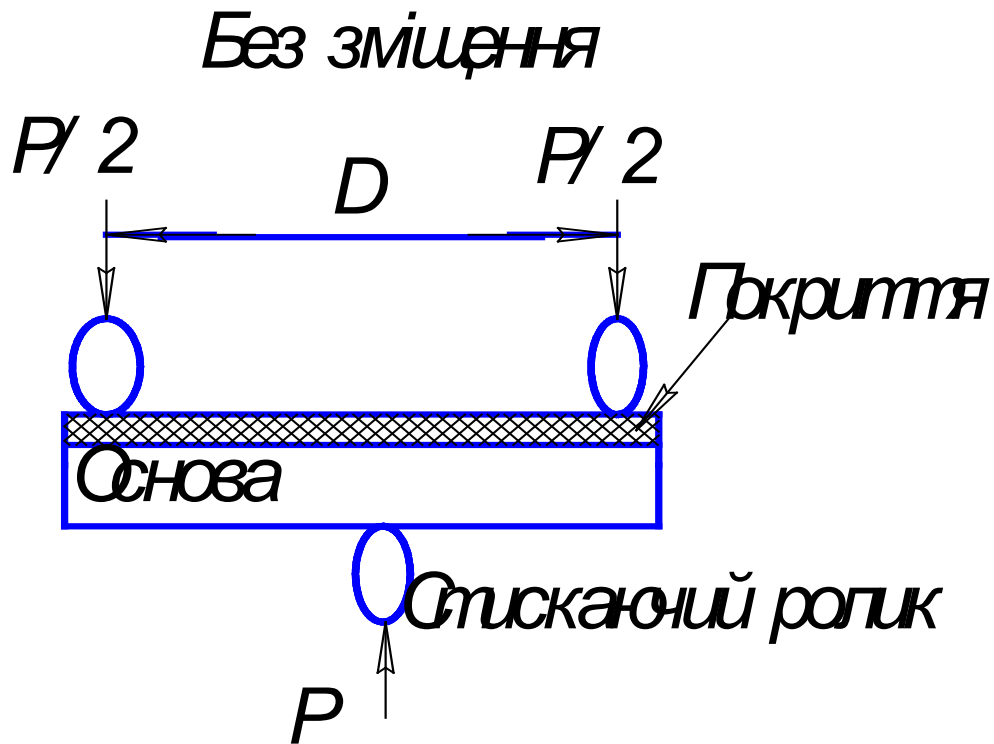


Рисунок 3.6 - Схема положення зразка під час згинання

Для визначення модуля пружності використовувалися прямокутні металеві зразки, на які наносилося покриття [24]. Розглянемо 3-х точковий вигин прямокутної балки завдовжки L , шириною b і товщиною H . На нижню поверхню, яка піддається вигину при випробуваннях нанесено покриття товщиною h (рисунок 2.6).

Модуль пружності і момент інерції зразка з покриттям (система покриття-основа) можна обчислити з рівняння:

$$E^* I^* = E_s I_s + E_c I_c, \quad (3.13)$$

де E_s , E_c - модуль пружності основи та покриття відповідно; E^* - модуль пружності системи основа-покриття; I_s , I_c - момент інерції основи та покриття відповідно; I^* - момент інерції зразка з покриттям.

При 3-х точковому вигині прогин δ_s , основи без покриття визначається з рівняння:

$$\delta_s = \frac{P L^3}{8 E_s I_s}, \quad (3.14)$$

де L - відстань між двома зовнішніми опорами; P - сила, прикладена до зразка.

При вигині основи з покриттям прогин δ визначається з рівняння:

$$\delta = \frac{PL^3}{8E^*I^*}, \quad (3.15)$$

Модуль пружності покриття можна визначити з рівняння (3.14) і (3.15) за допомогою даних δ , δ_s і P отриманих при експерименті.

З урахуванням того, що:

$$I_s = \frac{bH^3}{12},$$

$$I_c = \frac{bh^3}{12}, \quad (3.16)$$

де b - ширина зразка.

Розрахунок напруження згину ведеться по наступній формулі

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{3}{2} \frac{l \cdot P_{max}}{b \cdot h^2}, \quad (3.17)$$

де l , b , h - довжина, ширина, товщина досліджуваного зразка (мм); P_{max} – максимальне прикладене навантаження (Н).

3.3 Структурні і металографічні результати аналізу напилених покриттів

Такі термодинамічні розрахунки підтверджуються рентгенографічними і електронно-мікроскопічними дослідженнями пограничних шарів між металом і покриттям[24].

Розшифровка рентгенограм показала наступне: на рентгенограмі покриття із оксиду алюмінію присутні лінії Al_2O_3 γ – і η – форм; на рентгенограмах, знятих з поверхні металу по місцям контакту з покриттям, крім того, були присутні лінії FeO і Fe_3O_4 . З'єднань системи $Fe - FeO - Fe_2O_3 - Al_2O_3$ знайдено не було.

В покритті із двоокису цирконію були присутні ZrO_2 в кубічній формі, FeO ; Fe_2O_3 ; Fe_3O_4 . Яких - небудь з'єднань системи $Fe - FeO - Fe_2O_3 - Fe_3O_4 - ZrO_2$ не знайдено. Наявність Fe_2O_3 , можна пояснити більш інтенсивним окисленням металевої поверхні при нанесенні покриття із двоокису цирконію в порівнянні з нанесеним покриттям із оксиду алюмінію.

На рентгенограмі покриття із двоокису титану присутні лінії тільки лише TiO_2 в формі рутилу. На металічній поверхні, в місці контакту з покриттям була присутня крім TiO_2 , Fe і FeO , певна кількість окислу титану Ti_4O_7 . З'єднань між залізом, його оксидами і оксидами титану знайдено не було.

Таким чином, рентгенографічний аналіз, не показав проміжних з'єднань в пограничному шарі, тим самим підтвердивши точність використаного методу і відсутність сил хімічного зв'язку між покриттями. Це може бути пояснено великою швидкістю утворення розглянутих покриттів і низькими температурами металічної підкладки при їх напиленні.

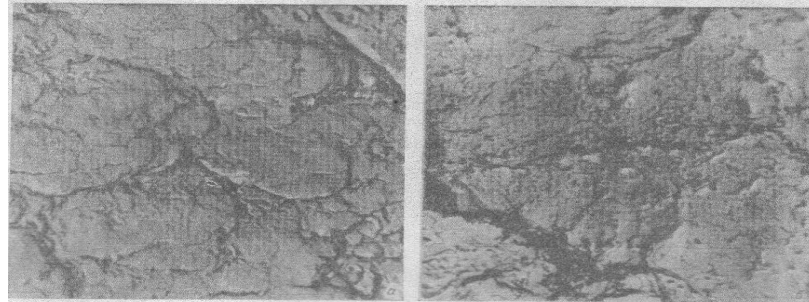
Зразки для електронно-мікроскопічного вивчення покриттів із оксиду алюмінію і двоокису цирконію були виготовлені при тих же параметрах напилення. Використовувались двохступінчасті відбитки; первинний відбиток виконувався на спеціальній пластиковій плівці. При знятті первинного відбитку найменші відбитки досліджуваного матеріалу, які

знаходяться на оборотній стороні шару покриття і поверхні металу, закріплювались на плівці. Вторинний відбиток був виготовлений методом напилення вуглецю. Для підвищення контрасту відбитку використовувалось відтінення напиленням металічного паладію. Зразки оброблювались в ацетоні для розчинення первинного відбитку, потім в розчині фтористоводневої кислоти для розчинення найменших частинок досліджуваного матеріалу, який закріпився на первинному відбитку. Мікроскопічні дослідження проводились на електронному мікроскопі при збільшенні в 800-5400 раз; збільшення на відбитках складало 2000-20 000 раз (рис. 3.7-3.9).

Як відомо, при крихкому руйнуванні аморфних тіл, наприклад, скла, характерна поява раковистого злому. Подібний же характер спостерігається і для ряду кристалічних матеріалів, в тому числі і корунду. Але це можливо при хорошій їхній спаяності або кристалізації із розплавленого стану і відсутності розрихленої мікроструктури. Рисунок 3.7 і 3.8 на яких видний раковистий злом зерен Al_2O_3 , це свідчить про те, що тим не менше, окремі частинки оксиду алюмінію, які утворюють покриття, або їх агрегати ближнього порядку і представляють собою монолітні утворення і вказують на то, що порівняно невелика твердість покриття із оксиду алюмінію, це може пояснюватись лише відсутністю достатньої ступінчастості між окремими частинками або мікроагрегатами частинок у всій системі в цілому.

На рисунку 3.7 а і б, видні частинки оксиду заліза, відокремлені від металу разом з покриттям із оксиду алюмінію і двоокису цирконію. Порівняно різкі окреслення цієї границі можуть говорити про відсутність хімічної взаємодії між матеріалом покриття і основою. Як видно із рисунку 3.8, на поверхні відколу частинок із оксиду алюмінію спостерігаються, так називаємі річні узор. Кожна із ліній, яка складає річний узор, пов'язана з різним рівнем окремих частинок поверхні відколу, який обумовлений тим фактом, що тріщина відколу, замість того, щоб розповсюджуватись по одній кристалографічній площині, яка була розбита дефектами кристалічної структури на окремі частини.

Із відомою долею ймовірності можна запропонувати, що на рис. 3.9 видні крайові і гвинтові дислокації, які відповідають зміщенню решітки одних частин кристалів відносно інших їхніх частин, які утворюють границі розорієнтованих блоків. Подвійна сітка на рисунку 3.8, видимо може бути інтєпретована як дві системи гвинтових дислокацій (границя кручення).



а – оксид алюмінію, збільшення 10300; б – оксид цирконію, збільшення 10800

Рисунок 3.7 - Мікрофотографія поверхні оборотної сторони покриття, яке знаходилось в контактi з металом

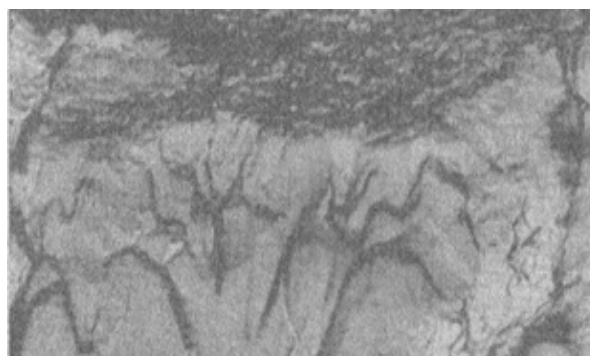


Рисунок 3.8 - Мікрофотографія контактної зони між покриттям із оксиду алюмінію і металічною основою при збільшенні 8500

Дислокаційна сітка при наявності крихких фаз може створювати границю блоків, по якій пройшов відкол. На основі цього можна зробити висновок, що виникнення дислокацій слідє віднести до періоду початку кристалізації розплавлених частинок і рості кристалів Al_2O_3 . Подалі протягом доволі незначного проміжку часу до повного затвердіння покриття, ймовірно, проходило деяке збільшення числа дислокацій з ростом неоднорідних напружень всередині кристалів. Однак, більше всього, що ми спостерігаємо в основному дислокації, які виникають в перший період і «заморожені» в результаті швидкої кристалізації і

затвердіння розплавлених частинок, які утворюють покриття. Вони свідчать про наявність в затверділих частинках покриття, а відповідно, і у всьому покритті в цілому, значних величин механічних напружень і про складність їхнього розподілу.

Викладене підтверджує механічний характер зв'язку покриттів із досліджуваних покриттів із досліджуваних матеріалів, напилених на металічну підкладку (сталь Ст. 3) і указує на наявність в них суттєвих напружень, які визивають дислокаційне руйнування їх кристалічної



структури.

Рисунок 3.9- Мікрофотографія відколу покриття із оксиду алюмінію з 2,5% оксиду титана. Збільшення 9100

Згідно із проведеними термодинамічними розрахунками для системи $Fe - Mo$ величину ΔG^0 отримали зі знаком «мінус», це говорить про можливість утворення хімічного зв'язку між покриттям і основою. Із діаграми стану системи $Fe - Mo$ слідує, що залізо і молібден може утворювати тверді розчини і ряд інтерметалідних з'єднань. Відповідно, утворення нових фаз доказується багатьма дослідженнями, хоча отримані результати складу і структури цих фаз протиречиві. В доповненні необхідно відмітити, що розвиток дифузійних процесів при напиленні сприяють сильному викривленні і дефектності кристалічної структури решітки матеріалів покриття і поверхневих шарів основного метала (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 - Мікроструктура приконтактної зони між залізом і молибденом (х 300)

4 АДГЕЗІЙНА І КОГЕЗІЙНА МІЦНІСТЬ

4.1 Розрахунок сили зчеплення

Знаючи роботу адгезії, яку було оброховано за допомогою термодинамічного розрахунку можна розрахувати силу зчеплення покриття з основою по методиці преставленій згідно з рівняннями у роботі [18]

$$\sigma_{сч} = \frac{W_a}{D_1} \left\{ \frac{\pi}{4} \frac{1}{\mu} + \frac{1}{2} \xi_0 - \frac{3}{16} \left(1 + \frac{3\pi}{4} \frac{1}{\mu} \right) \xi_0^2 + \frac{2}{15} \frac{\xi_0^2}{\mu_0} \right\}, \quad (4.1)$$

де ξ_0 , μ – геометричні параметри, W_a -робота адгезії [Дж/мм²].

$$\text{Множник в рівнянні (4.1)} \quad \left\{ \frac{\pi}{4} \frac{1}{\mu} + \frac{1}{2} \xi_0 - \frac{3}{16} \left(1 + \frac{3\pi}{4} \frac{1}{\mu} \right) \xi_0^2 + \frac{2}{15} \xi_0^2 \right\} \sim 0.4$$

Максимум міцності буде при $\xi = \xi_0$:

$$\frac{d}{d\xi} \frac{P_{ad}(\xi)}{S} = 0 \quad (4.2)$$

Значення ξ_0 знаходиться із рівняння:

$$\xi_0^2 - \frac{15}{16} \left(\mu + \frac{3\pi}{4} \right) \xi_0 \frac{5}{4} \mu = 0 \quad (4.3)$$

Отримані рішення в загальному вигляді дозволяють розрахувати залежність енергії і сили адгезії, а також міцність зчеплення покриття з основою.

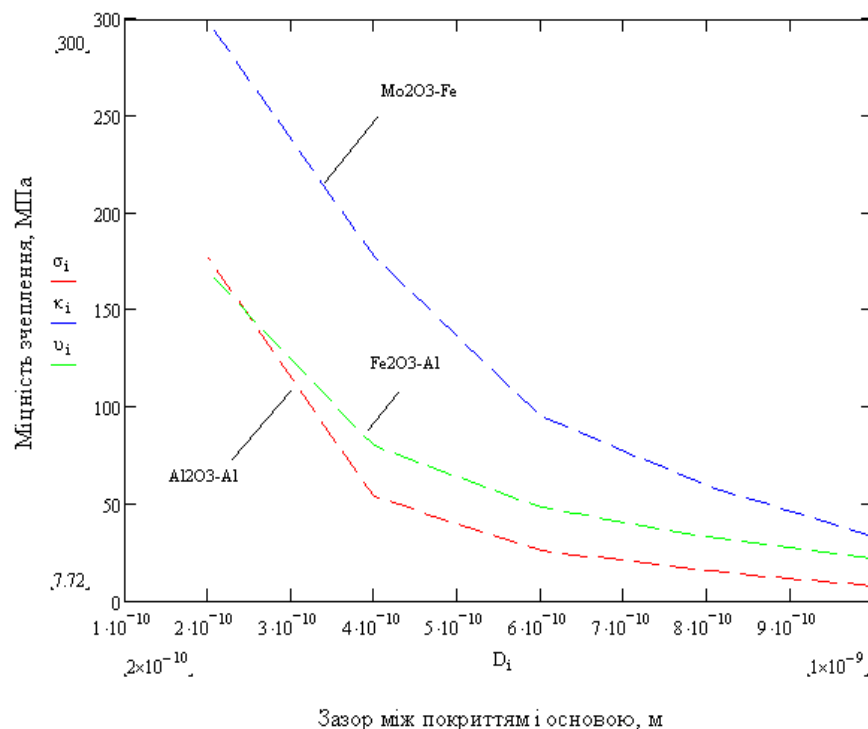


Рисунок 4.1 - Залежність міцності зчеплення покриття від зазору між покриттям і основою

При певних режимах і технології напилення руйнування покриття не спостерігається, а відбувається його відшарування. При цьому, мається на увазі, що міцність когезійних зв'язків покриття суттєва, і руйнування визначається, або тріщиностійкістю при поверхневих шарів основного матеріалу, коли реалізуються сильні адгезійні зв'язки, або руйнування відбувається безпосередньо по міжфазній границі.

Руйнування йде в поверхневих шарах. В цьому випадку критичне значення коефіцієнту інтенсивності напруження (тріщиностійкості) для цих поверхневих шарів основного матеріалу запишеться у вигляді:

$$K_{IC} = \sqrt{G_i \cdot E_o} \quad (4.4)$$

де E_o – модуль пружності основного матеріалу, а G_o – інтенсивність вивільненої енергії.

Міжфазну міцність (міцність зчеплення) можна розрахувати по фактичній площі контакту на базі мікроструктурної моделі взаємодії газотермічного покриття і поверхневих шарів основи.

Уявимо дискретний контакт газотермічного покриття в вигляді окремих п'ятен контакту розплющених часток (ламелей) з поверхнею основи (Рис. 4.2), а – схематично представлений реальний контакт частинок газотермічного покриття з основою, б – представлена модель застосовувана для розрахунку адгезійних характеристик покриття.

Розглядається відрив окремої плями фактичного контакту радіусом a від поверхневих шарів основи. При цьому радіус роздавленої частинки R визначається в залежності від вихідного діаметру і швидкості частинок порошка в потоці.

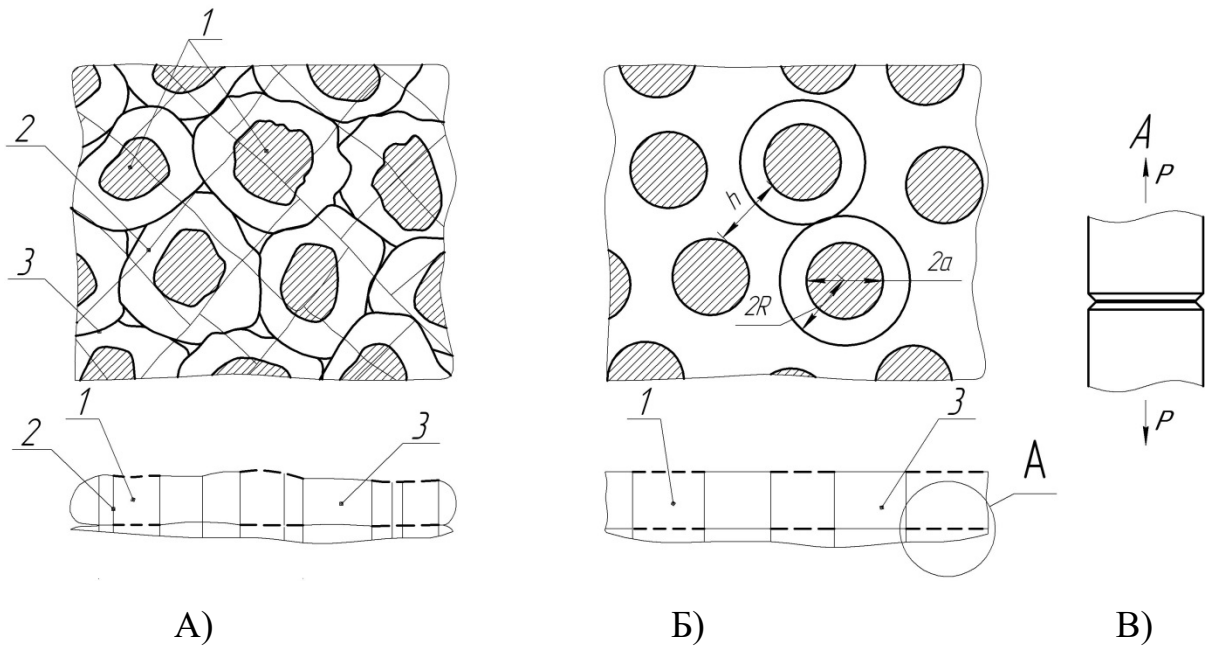


Рисунок 4.2 – Ідеалізована модель взаємодії розплющених часток у відповідних ділянках покриття: 1 – пляма контакту; 2- вертикальні мікротріщини; 3- незчеплені ділянки.

Міжфазна зона дискретного контакту плазмового покриття з поверхнею твердого тіла при випробування на руйнування може бути представлена моделлю матеріалу, ослабленого тріщинами в його об'ємі (Рис.4.2, б,в).

Навантаження, необхідне для окремої плями контакту оцінюється виразом [19,20]:

$$p' = 2a\sqrt{2aK_{1c}(1-f(z))} \quad (4.5)$$

де $K_{1c} = \sqrt{\frac{2\pi E \gamma_{\text{уд}}}{(1-\nu^2)}}$ - коефіцієнт тріщиностійкості покриття, $\gamma_{\text{уд}}$ - питома робота руйнування.

З урахуванням того, що $f(z) \ll 1$ для даних умов, і провівши заміну $2a=d$, згідно з рис.4.2 запишемо:

$$p' = K_{1c} d \sqrt{\pi d} \quad (4.6)$$

Враховуючи, що деформації в покритті і поверхневих шарів основного матеріалу однакові, модуль пружності покриття виражається через модуль пружності основи E_o і відповідно напруження (в покритті і в основі) у вигляді:

$$E_n = \frac{E_o \cdot \sigma_n}{\sigma_o} \quad (4.7)$$

При цьому коефіцієнт інтенсивності напружень, згідно (4.4) прийме

Вигляд:

$$K_{1c} = \sqrt{G_o \cdot E_o \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_o}} \quad (4.8)$$

Міцність адгезійних зв'язків між покриттям і основою пропорційна площі контакту, який формується в процесі ударної взаємодії напилуваних часток з поверхневими шарами [17,21]. Чим менше площа фізичного контакту, а відповідно, й адгезій на міцність хімічного контакту, тим менша міцність зчеплення покриття, і навпаки, коли міцність зчеплення буде наближуватись до міцності основоного матеріалу.

Отже, з деякими припущеннями можна припустити, що відносна площа фізичного контакту або відносна міцність зчеплення ϕ = пропорційні в вираженні (4.8).

Відносна площа контакту знаходиться на основі експериментально-теоретичних даних і по номограмі для відповідних технологій нанесення покриттів, що встановлює зв'язок межфазної міцності з параметрами наплення, структурою (пористістю) і деформаційними властивостями (критичної деформацією) покриттів [22].

Визначивши площу фактичного контакту покриття з основою, а також площі міжчасткових контактів як функції швидкості частинок, і необхідне навантаження для його руйнування, можна визначити міцність зчеплення частинок між собою (когезійну міцність) і покриття з основою. А це знаходиться у функціональній зв'язку з пористістю і, відповідно, з електроопору композиційного матеріалу.

На рис.4.3 представлені залежність розривного навантаження від площі (діаметр) в перерахунку на одиночний контакт, а також електосопротивлення покриття.

Вирішуючи спільно рівняння (4.5-4.8), з урахуванням того, що розглядається межфазная тріщина, а значення, замінюємо на і отримуємо:

$$\gamma_{\text{мф}} = \left(\bar{F}_{\phi}\right)^2 \frac{(\sigma_e^{\text{оч}})^2 \cdot d}{E_o} \left(\frac{1-\nu^2}{16\pi}\right) \quad (4.9)$$

Отримані значення співвідносяться з діаметром частинок порошку і залежать від технологічних параметром нанесення, хімічного, фазового

складу покриття і від наявності ультрадисперсних складових в матеріалі покриття.

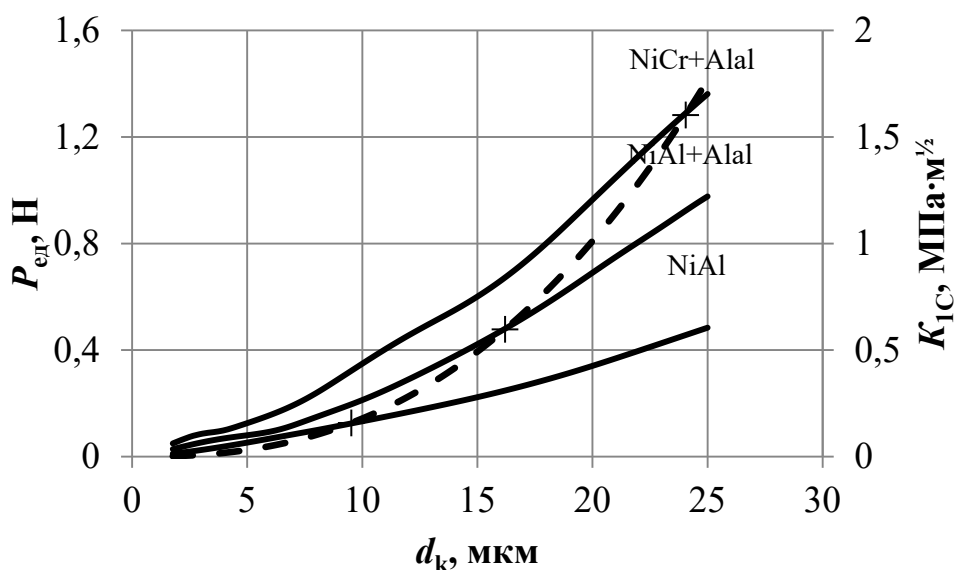


Рисунок 4.3 – Залежність електроопору від площі одиничного контакту з основою: 1 – NiAl; 2 – NiAl – ($Al_2O_3-SiO_2$); 3 – NiCr – ($Al_2O_3-SiO_2$)

Із отриманої залежності можна зробити висновок, що зі зменшенням зазору між покриттям и основою міцність зчеплення збільшується, це говорить про утворення сильніших сил зчеплення між покриттям і основою. Як видно з графіка, що найбільші значення міцності зчеплення будуть для системи Fe-Mo, а найменша для системи $Al_2O_3 - Al$.

На рисунку 4.4 представлені результати рентгеноструктурного аналізу перехідної зони. Утворення дифузійних шарів можна отримати зміною енергетичного стану контактної зони. Із ростом товщини таких шарів із зміною енергетичного стану контактної зони за рахунок збільшення температури в контакт. Попередній підігрів основи протягом певного часу дає можливість впровадження частинок в розплавленому стані.

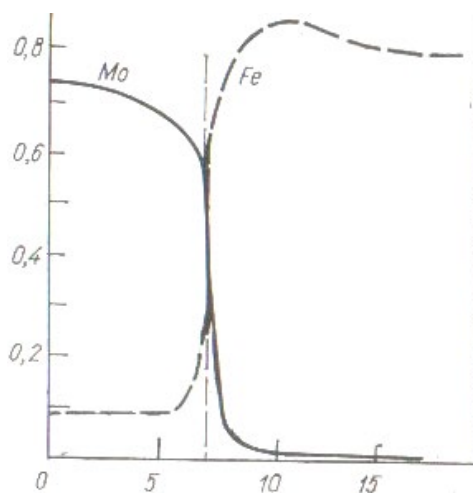


Рисунок 4.4 – Зміна концентрації елементів на границях розподілу
основи із мало вуглецевої сталі з поверхнею Мо.

4.2 Когезійна міцність плазмових покриттів

На величину когезионної міцності покриття впливають ряд факторів. До таких факторів, перш за все, відносяться співвідношення модулів пружності основного матеріалу і другої фази, нерівноважний стан кордонів різних ділянок всередині композиції, кордони між деформованими частками.

Тріщиностійкість і когезійний руйнування сильно залежать від зв'язків між ламелями.

Для теоретичної оцінки когезионної міцності плазмового покриття скористаємося підходом, застосовуваним до пористій тілу. Якщо розглядати плазмове покриття як матеріал у вигляді дисперсного компактного тіла, то теорія механічної міцності встановлює зв'язок структури такого композиційного тіла в залежності від радіуса частинок $R_{\text{ч}}$, діаметра пір D , з кількістю міжчасткових контактів і з міцністю такої структури тіла P_m у вигляді залежності [24] :

$$P_m = p' / 4R_{\text{ч}}^2 n^2 = p' / D^2 (\alpha/n)^2 = 10^{10} p' (1/D^2) \beta. \quad (4.10)$$

Модель може бути з певним наближенням застосована для металокерамічного тіла типу плазмового покриття.

В (4.10) параметр p' / представляється міцністю одиночного плями контакту між розплющеними частинками, числом цих одиночних контактів і фактором β , який є функцією пористості покриття, щільності твердої фази і об'єму пор на одиницю маси [24].

Для оцінки міцності одиночного плями контакту p' в (4.10) скористаємося положеннями теорії руйнування, коли розглядається граничний стан в момент зародження і поширення мікротріщини, що призводить до руйнування матеріалу, що характеризується відповідним коефіцієнтом напруги K_{1c} . У нашому випадку контактна зона між двома розплющеними частинками при випробуванні на розрив може бути

представлена моделлю матеріалу, ослабленого межфазної тріщиною в покритті [24]. Вираз для навантаження, необхідної для руйнування такого окремого плями контакту між частинками, має вигляд:

$$\begin{aligned} p' &= 2y\sqrt{2y} \cdot K_{Ic} \cdot (1-f(z)) = \\ &= 2 \cdot y \cdot \sqrt{2\pi \cdot y \cdot (1-\nu^2)^{-1} \cdot \bar{f}_\Phi^d \cdot E \cdot \gamma_{mf}}, \end{aligned} \quad (4.11)$$

, де y - радіус плями контакту; $f(z) = 0,339 z^2 + 0,136 z^5$, $z = 2y / x$; x - відстань між плямами контакту; для наших умов функція $f(z) \ll 1$.

При виведенні залежності (4.11) виходили з таких міркувань. Коефіцієнт інтенсивності напруги має вигляд $K_{Ic} = \sqrt{G_{Ic}} \cdot \sqrt{E_c}$ і характеризує тріщиностійкість кордону розділу між частинками покриття. Інтенсивність вивільненої енергії системи при розтріскування покриття виражається в загальному випадку, як $G_{Ic} = 2 \gamma_c$, а ефективна поверхнева енергія $\gamma_c = \gamma_{mf}$ відноситься до загальної площі одиночного плями контакту f_Φ , розплющеної в процесі удару частинки радіуса $y = 2,03 \cdot R_c$ [24].

У процесі формування багатошарового плазмового покриття міцний зв'язок реалізується не на всій площі фізичного контакту f_Φ між атомами взаємодіючих деформованих частинок, а тільки на деякій її частині f_d , що складається з певного числа активних центрів. Згідно з положенням про дислокаційної природі активних центрів, приймаємо, що площа активного центру з високою енергією визначається полем напруги дислокації, що вийшла на контактну поверхню, а також полями сусідніх дислокацій [23].

У той же час, згідно з аналізом процесів, обумовлених виходом дислокацій на поверхню площею f_Φ , частка всієї повної поверхні $f_d / f_\Phi =$ бере участь у формуванні міцних хімічних зв'язків за механізмом пластичної деформації, складе $= \rho \cdot S_d$. Площа S_d є площею одиночного активного центру, на якому формуються міцні хімічні зв'язки. Щільність дислокацій ρ можна обчислити за результатами вимірювань внутрішнього тертя і розрахунків дислокаційної структури - величинам дислокаційної сітки і сегментів [5, 17-19, 23, 24]. Згідно з наявними результатами щільність дислокацій в залежності від технології напилення покриттів

склала $\rho = (2 \dots 5) \cdot 10^7 \text{ см}^2$ при площі одиночного активного центру, прийнятої для орієнтовних розрахунків рівній $S_{d\max} = 7,8 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2$. Тоді, згідно з експериментальним і розрахунковим даними, відносна площа контакту, по якій формуються міцні хімічні зв'язки між розплющеними частинками, знаходиться в межах $= 0,1 \dots 0,6$ залежно від складових плазмового покриття. Оскільки розглядається область активних центрів з міцними зв'язками, то, відповідно, площа взаємодії і значення енергії зменшуватися, і в (4.11) необхідно враховувати, що $G_{1c} = 2 \cdot \gamma_s$, т. Е. Когезійна міцність, як і тріщиностійкість, сильно залежать від зв'язків між ламелями.

Величина відносної площі контакту істотно впливає на процеси руйнування, що протікають при навантаженні матеріалів з покриттями, і розглядається в даній роботі щодо параметрів тріщиностійкості.

Розрахункові значення загальної міцності, згідно з рішенням по (4.10) і (4.11) в перерахунку на одиницю площі представлені в табл. 4.1. Для обчислення міцності композиційного пористого покриття, згідно (4.11). У табл. 4.1 представлені також дані отримані на підставі розрахунково-експериментальної методики відповідно до (5). Спостерігається певна кореляція між розрахованими значеннями когезионної міцності (14), (15) і руйнівного напруження (5).

Значення модулів пружності плазмових покриттів за результатами вимірювань і розрахунків внутрішнього тертя представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 Значення модулів пружності Юнга і когезійної міцності плазмових покриттів

Склад покриття	Методи визначення Е, ГПа			Міцність, МПа	
	ВТ	Вигин	Розтяг, ідентування	$\sigma_{ког,}$	$\sigma_p,$
Mo	100	89, (100 [7])	(65), (210–290) [7])	71	136
NiAl	99, 28 – 105	80	131–150	236	284
Al ₂ O ₃	54,	45	82	46	20...

	(64 [16])				80
ПГ-10, 12 (NiCrBSi)	111	55	(120 [16])	82	154
AlNi – (SiO ₂ Al ₂ O ₃)	157	131– 143	119	438	374
ПГ-10 – (SiO ₂ Al ₂ O ₃)	193	86 – 110	185	536	472

Прим. В дужках приведені для порівняння літературні дані

У табл. 4.1 також наведені узагальнені результати для модуля пружності покриттів, отримані при випробуваннях на вигин, згідно розрахунково-експериментальної методики, а також на розтягнення і індентування. Літературні дані представлені в дужках. Як бачимо, є певні розбіжності, іноді суттєві.

4.3 Результати експериментальних досліджень адгезійно-когезійних властивостей металевих покриттів

4.3.1 Дослідження міжфазного контактного опору

Згідно з методикою, були проведені дослідження електроопору напилених плазмовим методом покриттів (таблиця 4.2). Такі експерименти дають можливість оцінити явища, що супроводжують формування самих покриттів, а також процеси, які протікають в міжфазній зоні. Ці процеси відповідають, насамперед, за питомий опір, який, в свою чергу, характеризує когезійні властивості покриттів, а також за значення опору міжфазної зони, який характеризує адгезійну міцність покриттів. За допомогою визначних електрофізичних властивостей, таких як електроопір, можна зробити висновки, щодо адгезійної і когезійної міцності [3, 21, 22].

Таблиця 4.2— Значення електроопору плазмових покриттів

Опір, Ом	AlNi	Al
R'_{12}	$1,833 \cdot 10^{-4}$	$1,417 \cdot 10^{-5}$
R''_{12}	$3,667 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
R'_{Π}	$2,932 \cdot 10^{-4}$	$8,34 \cdot 10^{-6}$
R''_{Π}	$1,466 \cdot 10^{-4}$	$4,17 \cdot 10^{-6}$
R_k	$3,67 \cdot 10^{-5}$	$5,83 \cdot 10^{-6}$

Дана методика використана для визначення вказаних вище характеристик для таких досліджуваних покриттів: Al, AlNi, Mo, на зразках із Сталі 20 при різних умовах напилення .

На рисунку 4.5 в залежності від часу напилення приведені експериментальні дані контактного електроопору R_k для пари $Fe - Mo$. Як бачимо, мінімальний опір відповідає часу напилення ~ 10 сек, коли встановлюються міцні зв'язки по всій сформованій поверхні контакту, утворення нових фаз іще не має місце. Знаючи геометричні розміри зони дискретного контакту, по відомій залежності через питомі електроопори із врахуванням площі фактичного контакту можна вирахувати електроопір контактної зони. По розрахункам воно складає $\sim 10^{-7} - 10^{-8}$ Ом, що співпадає з порядком експериментально знайденим значенням R_k . Подальше зростання опору на рисунку 4.5 говорить про утворення в контактній зоні нової структури.

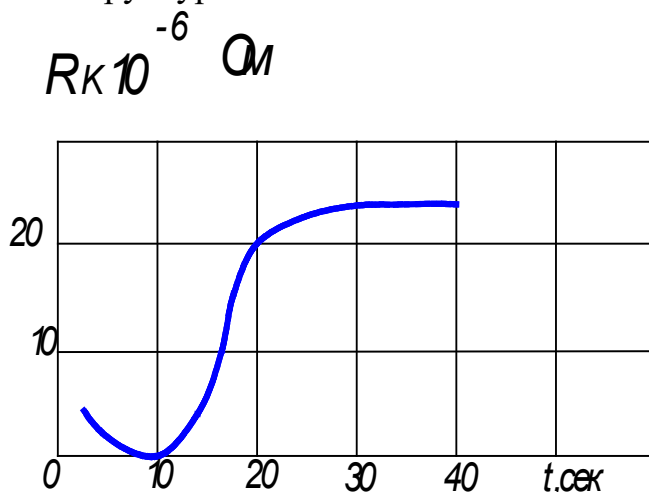


Рисунок 4.5–Змінення контактного електроопору в залежності від часу напилення Mo на Сталь 20

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок про протікання при плазмовому напиленні в ряді випадків об'ємних процесів в контактній зоні і про формування перехідних шарів нового складу і нової структури.

На сьогодні, в час ресурсозберігаючих технологій, газотермічне (плазмове) нанесення покриттів набуло особливого розвитку.

Функціональні властивості газотермічних покриттів залежать від сформованої структури, фазового та хімічного складу покриття, адгезійних властивостей системи основа – покриття (стану контактної зони, міжфазної міцності). Ці явища корелюються з важливими експлуатаційними характеристиками покриття – міцність зчеплення покриття з основою, когезійна міцність, пористість, твердість тощо).

Перспективним способом оцінки адгезійної та когезійної міцності покриття є дослідження електроопору покриттів. Цей метод має низку переваг перед методами, що ґрунтуються на відриві плівок, так як дозволяє виміряти безпосередню величину адгезійної та когезійної взаємодії без похибок, що екрануються побічними процесами.

Оскільки покриття містять забруднення, оксиди тощо, в контактній зоні є різні перехідні фази – інтерметаліди, метод електроопору може бути використаний і для вивчення структури контактної зони при різних умовах напилення, а, відповідно, і для вивчення розвитку фізико-хімічних процесів при утворенні покриттів.

На кафедрі інженерії поверхні зварювального факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського розроблена та модернізована установка для вимірювання питомого опору покриттів. Установка дозволяє вимірювати контактний опір зразків з покриттям, що дає змогу, розрахунковим способом, визначити електричний опір покриттів в цілому.

Установка складається з притискного механізму (для закріплення циліндричних зразків з покриттям); електронної динамометричної насадки (для встановлення постійного зусилля затискання зразків, що забезпечує зменшення похибки при вимірюванні контактних опорів); автотрансформатора (для плавного регулювання сили струму, що проходить крізь зразки); понижувального трансформатора; діодного мосту (дозволяє

досягати сили струму до 40 А); мікрровольтметру; аналогово-цифрового перетворювача (для перетворення напруги в контакті вимірювання електричного опору в цифровий сигнал для подальшої обробки та вивчення); ноутбуку.

З точки зору електропровідності композиційні матеріали є твердими дисперсними системами, що складаються з електропровідних і не провідних (діелектричних) компонентів. У нашому випадку електропровідними частками є порошки металів Мо, Ni, Al–Ni, а як компонент – діелектрик використовується кераміка у вигляді порошків оксидів Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 . Перенесення електричного заряду здійснюється по електропровідних металевих частинках. Величина питомого електроопору залежатиме від об'ємного вмісту (концентрації) і співвідношення провідних і не провідних компонентів. Відома формула для визначення об'ємного питомого опору ρ_m^V механічної суміші залежно від концентрації електропровідних компонентів (металевих частинок), що знаходяться в фізико-хімічному контакті один з одним [21]:

$$\rho_m^V = \frac{\rho_0^V}{pWc^2}, \quad (4.12)$$

„де ρ_0^V - питомий об'ємний опір провідної фази; p – об'ємна доля електропровідного компонента; W – вірогідність виникнення провідності в об'ємі матеріалу; c^2 – площа поперечного перетину провідних металевих контактів.

Площа поперечного перетину визначається із співвідношення:

$$p = 3c^2 - 2c^3. \quad (4.13)$$

Композиційне плазмове покриття є пористим тілом, що також позначається на електропровідності. Пористість визначає міцність самого покриття (когезійну міцність). Згідно з літературними даними [22, 23] залежність електропровідності покриття від його пористості θ має вигляд:

$$\lambda_c = \lambda_0 (1 - \theta)^{3/2}, \quad (4.14)$$

„де λ_0, λ_c - електропровідність суцільного і пористого тіла (покриття).

Представляючи плазмове покриття у вигляді послідовно сполучених

шарів, що складаються з частинок, що контактують між собою, можна отримати відносну величину міжчасткових контактів, виходячи із рівняння для електропровідності такого тіла (рівняння 4.14) у вигляді параметру:

$$\xi = \frac{\lambda_c}{\lambda_0 (1-\theta)^{3/2}} \quad (4.15)$$

Вираз (4.15) є дуже важливим параметром для визначення в подальшому величини контактної зони, що необхідно для аналізу не тільки питомого опору, але також когезійно-адгезійної міцності системи «покриття–основа». Електропровідність (питомий електроопір) плазових покриттів залежить від хімічного складу, форми і грануляції самих часток, фізичних властивостей компонентів.

ρ , Ом·μм

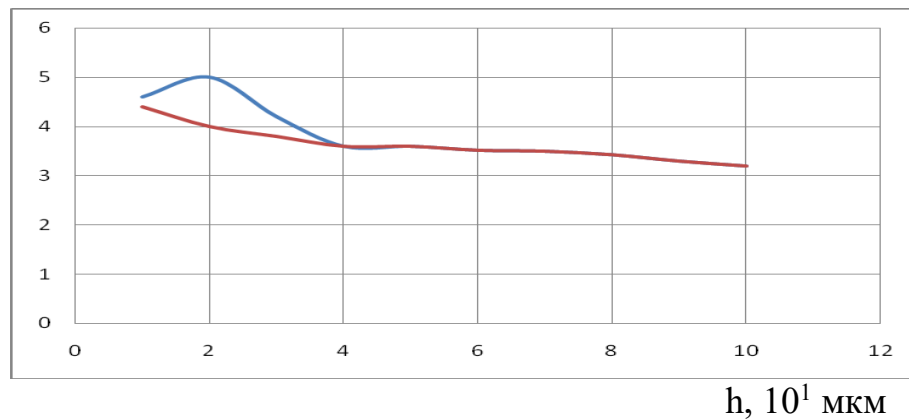


Рисунок 4.6 – Питомий електричний опір покриття в залежності від товщини покриття

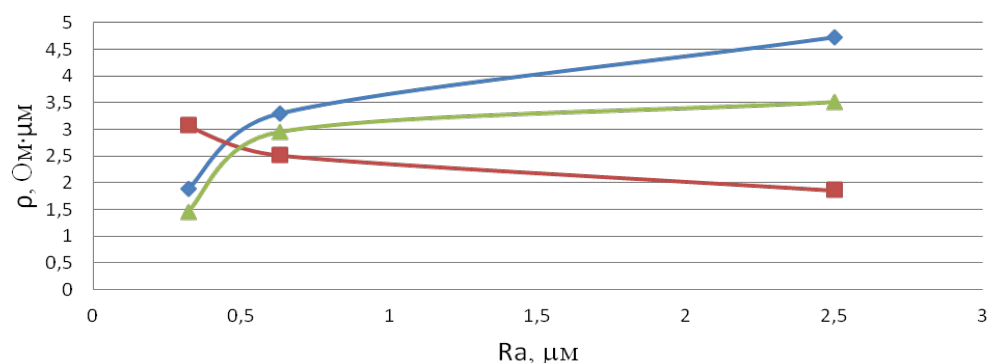


Рисунок 4.7 – Залежність питомого опору покриття від шорсткості підкладки

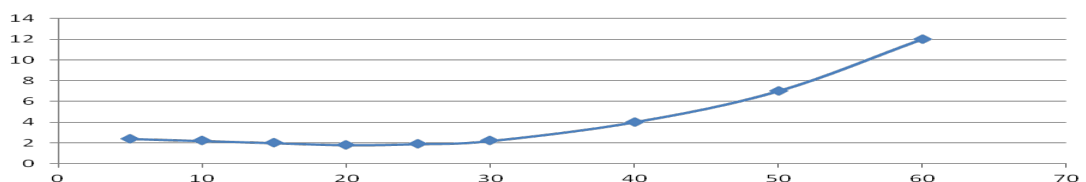


Рисунок 4.8 – Вплив часу відпалу на питомий електричний опір покриття

Для різних покриттів будуть різні значення їхнього питомого опору. В кожному конкретному випадку в залежності від властивостей покриттів і основного матеріалу, а також за умови, в окремих випадках, утворення фаз конкретний питомий опір може збільшуватись, наприклад для системи ($Fe - Mo$) або зменшуються ($Fe - Ni$).

Співставляючи рівняння електроопору з рівнянням для міцності отримуємо значення питомого опору досліджуваних покриттів наведених в таблиці 4.3.

$$R_{\Pi} = \rho \frac{l}{S}. \quad (4.16)$$

Розрахунок питомого електроопору покриття виконуємо по приведенню нижче формулі:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}, \quad (4.17)$$

де l – товщина покриття; S – площа перерізу зразку.

Таблиця 4.3 Питомий електроопір покриття плазмових покриттів

Питомий електроопір покриття, експериментальні дані, мкОм·см	Al	AlNi	Mo
ρ_1	3	7.2	5.2
ρ_2	3.2	7.3	5.5
ρ_3	3.5	7.8	5.8
ρ_4	3.8	8.2	6.1
ρ_5	4	8.3	6.2
Електроопір напильного матеріалу, довідникові дані, мкОм·см ρ_B	2,813	7	5

4.3.3 Оцінка похибки вимірювань

Проведемо оцінку точності вимірювань питомого електроопору. Значення питомого електроопору провідника:

$$\rho = \frac{RS}{h} = \frac{R\pi D^2}{h \cdot 4}. \quad (4.18)$$

А межа відносної помилки:

$$\Delta\rho_{\text{від}} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{2\Delta D}{D} + \frac{\Delta h}{h} \quad (4.19)$$

Значення опору 10^{-6}Ом , а точність їх значення $\sim 10^{-8}\text{Ом}$. Точність вимірювання діаметру зразка мікрометром $-0,01\text{мм}$, а товщини покриття мікроскопом $-0,005\text{ мм}$. Тоді:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{10^{-8}}{10^{-6}} = 1\%; \frac{2\Delta D}{D} = \frac{2 \cdot 0,01}{13} = 0,15\%; \frac{\Delta h}{h} = \frac{0,005}{0,02} = 2,5\% \quad (4.20)$$

Відповідно, $\Delta\rho_{\text{від}} = 3,6\%$.

Проведемо статистичну обробку результатів вимірювань електроопорів R . Результати такої обробки для одного режиму напилення представлені в таблиці 4.4. Середня квадратична помилка окремих вимірювань:

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{\sum (\Delta R_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{19,6484}{9}} = 1,478. \quad (4.21)$$

Середня квадратична помилка середнього значення: $\bar{S} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 0,467$.

Таблиця 4.4 Статична обробка результатів вимірювання електроопорів

П	$R_i \cdot 10^6, \text{Ом}$	$R_i - \bar{R}, \text{Ом}$	$(R_i - \bar{R})^2, \text{Ом}^2$
R_1	44,1	-2,54	6,4516
R_2	44,93	-1,71	2,9241
R_3	45,75	-0,89	0,7921
R_4	46,59	-0,05	0,0025
R_5	46,7	0,06	0,0036
R_6	46,83	0,19	0,0361
R_7	46,9	0,26	0,0676
R_8	47,1	0,46	0,2116
R_9	48,4	1,76	3,0976
R_{10}	49,1	2,46	6,0516
Сума	$\sum R_i = 466,4$ $\bar{R} = 46,64$	$\sum \Delta R_i = 10,38$ $\Delta \bar{R} = 1,038$	19,6484

Для ймовірності $P_S = 98\%$ і числу вимірювань $n = 10$ по таблицям Ст'юдента визначемо коефіцієнт $\bar{t}_S = 2,8$.

Величина інтервалу від середнього значення вимірювальної величини:
 $E = t_S \bar{S} = 1,31$.

Тоді результат вимірювань можна записати у вигляді: $R = \bar{R} \mp E = 46,64 \mp 1,31 \text{ Ом}$.

При цьому відносна похибка складає $\delta = \frac{E}{\bar{R}} \cdot 100\% = 2,8\%$.

4.3.4 Залежності електроопору металевих покриттів від пористості

Відомо, що обрана технологія плазмового напилення суттєво впливає на таку важливу характеристику, як пористість покриття [2,6,24]. Дослідженням пористості призначено багато робіт з питань напилення, спікання і порлошкової металургії [37, 38].

Із багатьох досліджень відома залежність різних фізичних властивостей, в тому числі і електроопору від пористості. Так наприклад, залежність електропровідності покриття від пористості записується у вигляді

$$\lambda_{\Pi} = \lambda_{\text{в}}(1 - \theta)^{\frac{3}{2}}, \quad (4.22)$$

де пористість покриття; електропровідність суцільного покриття.

Значення пористості визначемо із залежності (4.22), але виразимо питому електропровідність покриття через електроопір покриття, знайдений по експериментальним значенням знайденим по методиці в розділі 2.2 і обрахованим по формулі (4.17).

$$\theta = 1 - \sqrt{\frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\Pi}}}, \quad (4.23)$$

де довідникове значення питомого опіру покриття і розраховане значення відповідно.

Так на рисунку 4.9-4.11 представлені співвідношення між експериментальним результатом питомого опору покриттів і розрахунків за цими даними пористості по рівнянні (4.23) в залежності від дистанції напилювання.

Згідно із приведеними вище розрахунками можна обрахувати міцність напиленого покриття і його пористість і встановити залежність між ними. Також встановимо залежність міцності покриття від його електроопору, залежність дасть нам уявлення про когезійні властивості покриття.

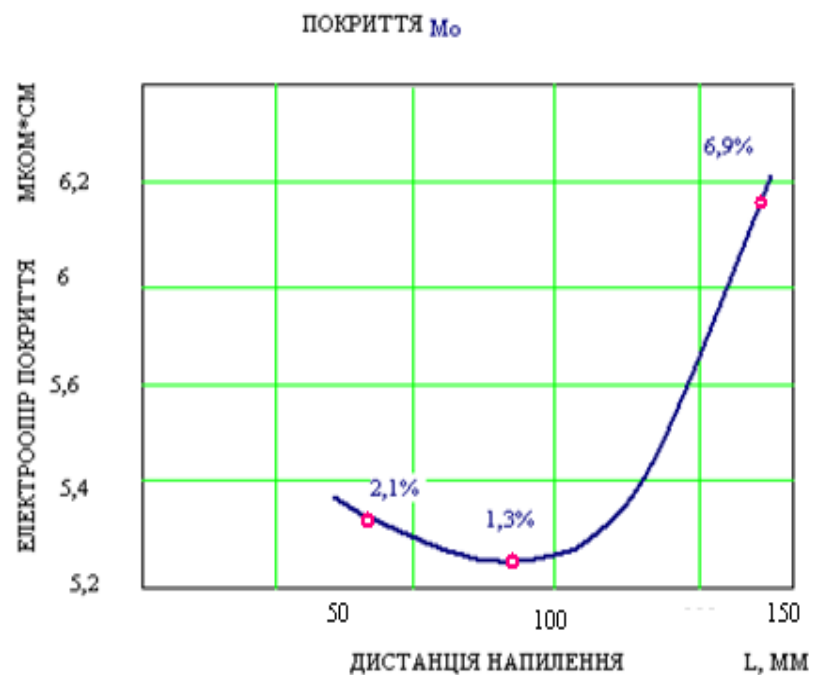


Рисунок 4.9 –Залежність питомого електроопору покриття Mo від дистанції наплення при різній пористості покриття $\rho = f(L, \theta)$

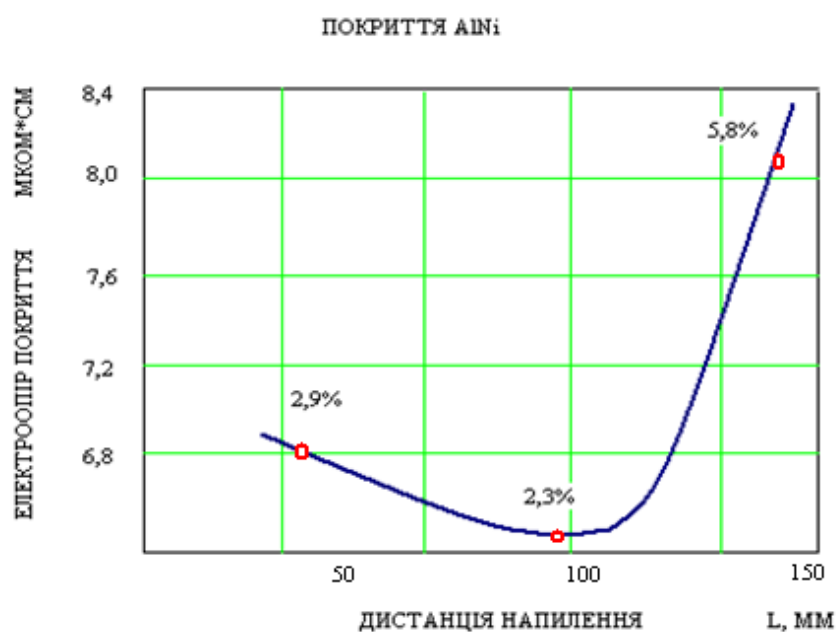


Рисунок 4.10 –Залежність питомого електроопору покриття AlNi від дистанції наплення при різній пористості покриття $\rho = f(L, \theta)$

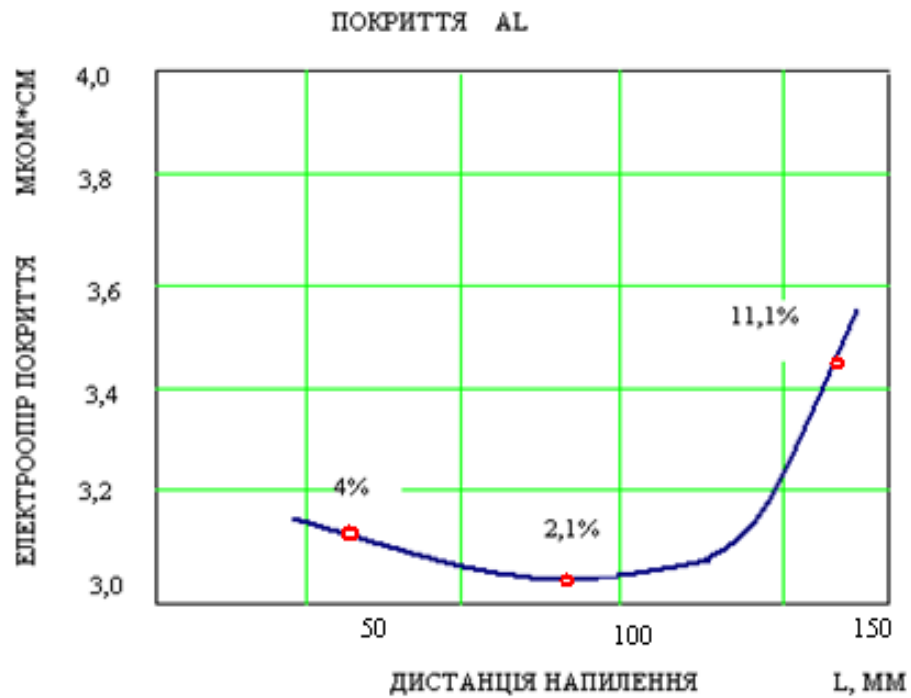


Рисунок 4.11 –Залежність питомого електроопору покриття Al від дистанції наплення при різній пористості $\rho = f(L, \theta)$

На рисунках 4.12-4.114 зображені залежності питомого електроопору покриття від його пористості. Із отриманих рисунків робимо висновок, що при збільшенні пористості покриття електроопір відповідно зростає.

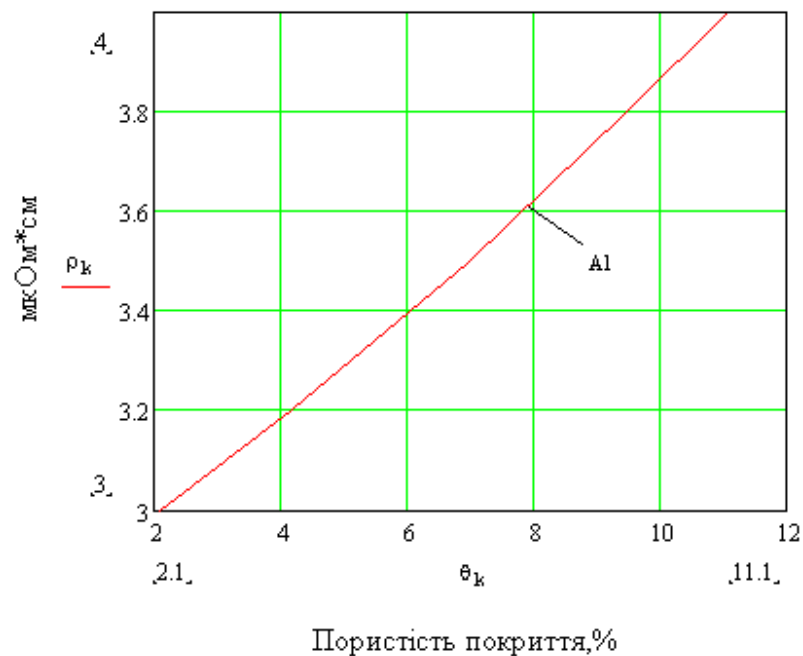


Рисунок 4.12– Залежність питомого електроопору покриття Al від його пористості

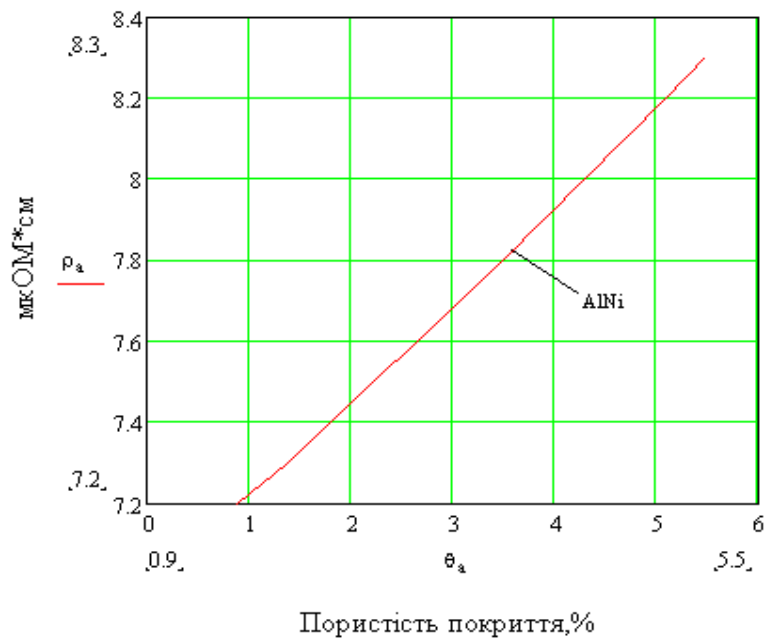


Рисунок 4.13— Залежність питомого електроопору покриття AlNi від його пористості

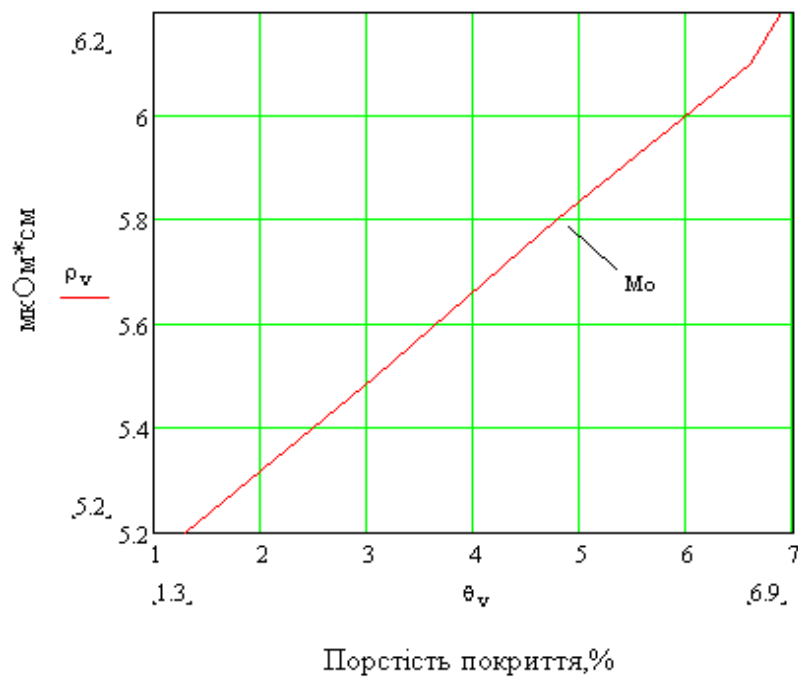


Рисунок 4.14— Залежність питомого електроопору покриття Mo від його пористості

Ці результати можна трактувати таким чином. При напилуванні має місце оптимальний режим, при якому швидкість і температура напилуваних частинок максимальні. Для такого режиму пористість мінімальна, а когезійна і адгезійні міцність максимальна. Результати вимірювань представлені у таблиці 4.5.

Із приведених вище графіків видно, що із збільшенням пористості, відповідно і збільшенням електроопору покриття, міцність покриття

зменшується. За допомогою даної методики можна визначити міцність будь-якого металевого покриття по визначеним експериментально значенням електроопору покриттів. Отримані значення міцності покриття безпосередньо будуть представляти значення когезійної міцності покриттів.

Таблиця 4.5 Значення електроопору плазмових покриттів

Опір, Ом	AlNi	Al
R'_{12}	$1,833 \cdot 10^{-4}$	$1,417 \cdot 10^{-5}$
R''_{12}	$3,667 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
R'_{Π}	$2,932 \cdot 10^{-4}$	$8,34 \cdot 10^{-6}$
R''_{Π}	$1,466 \cdot 10^{-4}$	$4,17 \cdot 10^{-6}$
R_k	$3,67 \cdot 10^{-5}$	$5,83 \cdot 10^{-6}$

R'_{12} - електроопір між потенціальними кінцями при товщині покриття 400мкм;

R''_{12} - електроопір між потенціальними кінцями при товщині покриття 200мкм;

R'_{Π} - електроопір покриття при товщині покриття 400мкм;

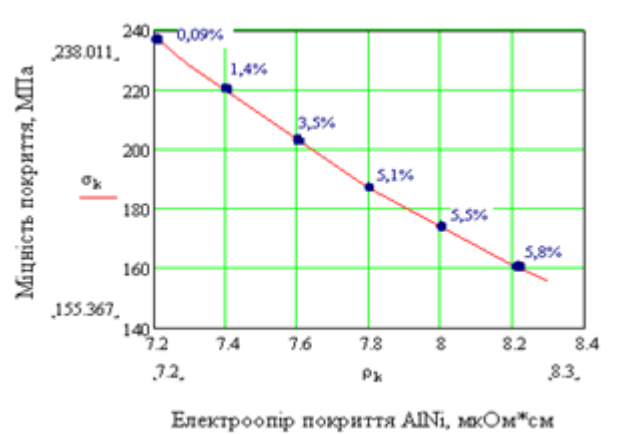


Рисунок 4.15 – Залежність міцності покриття при різній пористості від електроопору покриття AlNi

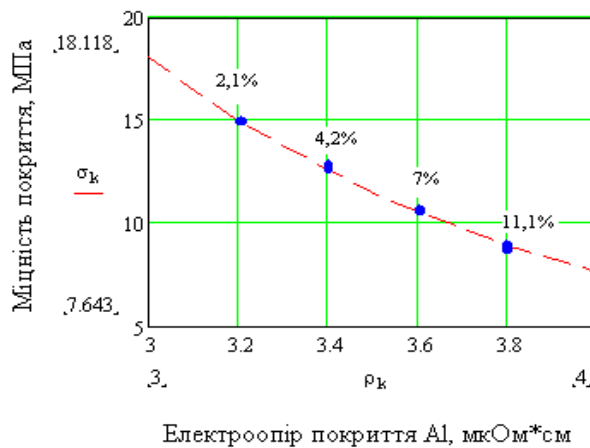


Рисунок 4.16 – Залежність міцності покриття при різній пористості від електроопору покриття Мо

Одним із завдань роботи являлось дослідження електрофізичних властивостей керамічних і металокерамічних покриттів на основі сумішей та плакованих порошкових матеріалів .

Але, як відомо кераміка майже не пропускає електричний струм (таблиця 4.6). У таблиці 4.6 представлені значення електроопору оксиду алюмінію в залежності від температури випробування.

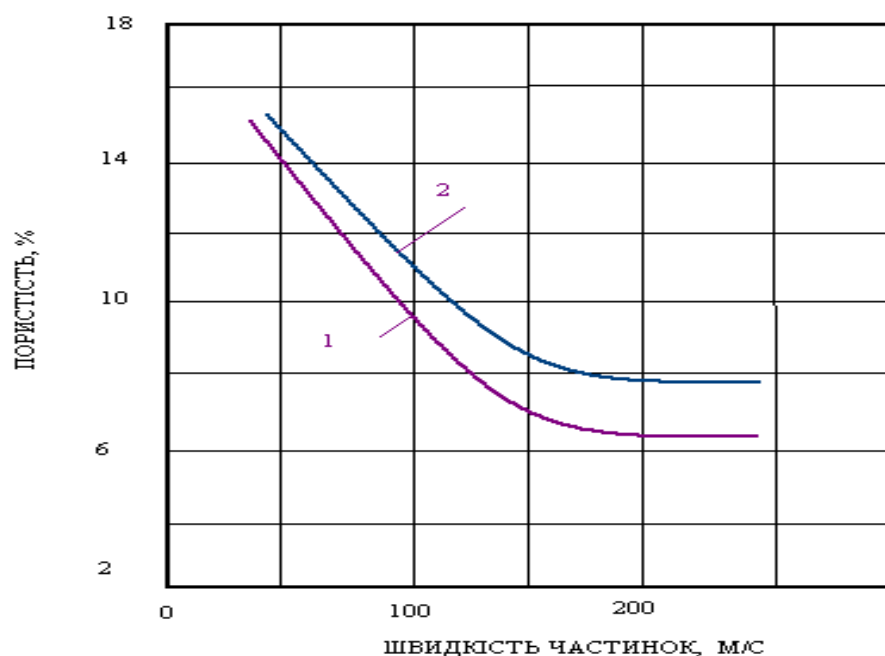
Таблиця 4.6 Значення електроопору оксиду алюмінію

Оксид	Електричний опір, ом· см		
	1000 ⁰ С	1500 ⁰ С	2000 ⁰ С
Al_2O_3	$5 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^5$	-

Відомо, що зменшення пористості і зменшення розміру пор приводить до покращення електроізоляційних властивостей матеріалу внаслідок зменшення іонізації газів в порах. Тому проблема зниження пористості має надзвичайно важливе значення для покращення когезійних властивостей покриття.

На пористість покриття значно впливають параметри напилення покриття такі, як швидкість частинки, струм дуги, дистанція напилення та інші. На рисунку 4.17 представлена залежність пористості від швидкості напилення. Представлені залежності показують, що при збільшенні швидкості від 60 до 250 м/с відкрита пористість зменшується від 15 до 6,5%, а загальна – від 15 до 7,5%. Об’ємна пористість при цьому збільшується від 3,15 до 3,40 г/ . Аналіз вказаних кривих дозволяє виділити

дві області. При швидкостях 60-250 м/с зменшення пористості і збільшення об'ємної густини носять монотонний характер. При подальшому збільшенні швидкості частинок пористість і густина залишаються на тому ж рівні, змінюючись на величину, не перевищуючу границю їх експериментальних даних.



1,2 – відкритка і загальна пористість плазмових покриттів із Al_2O_3 відповідно;

Рисунок 4.17 – Залежність пористості від швидкості напиляємих частинок

Більш тонка зміна властивостей покриттів може бути досягнута варіюванням режимів напилення, що, однак, обмежено вузькими рамками. На рисунках 4.18, 4.19 приведені залежності пористості і деяких технічних характеристик покриттів від основних технологічних параметрів напилення. Проведені дослідження показали, що зміна струму дуги впливає на пористість плазмових покриттів в меншій степені, чим дистанція напилення. На рисунках 4.18, 4.19 приведені залежності пористості від дистанції напилення та струму дуги.

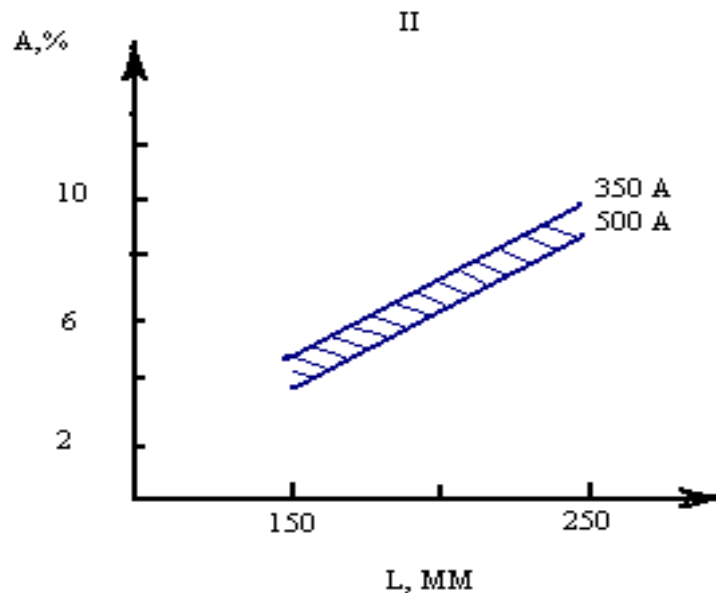


Рисунок 4.18 – Залежність пористості A покриття із оксиду алюмінію від дистанції напилення L при тиску плазми утворюючого газу $1,4 \cdot 10$ Па і струму дуги 350-500 А

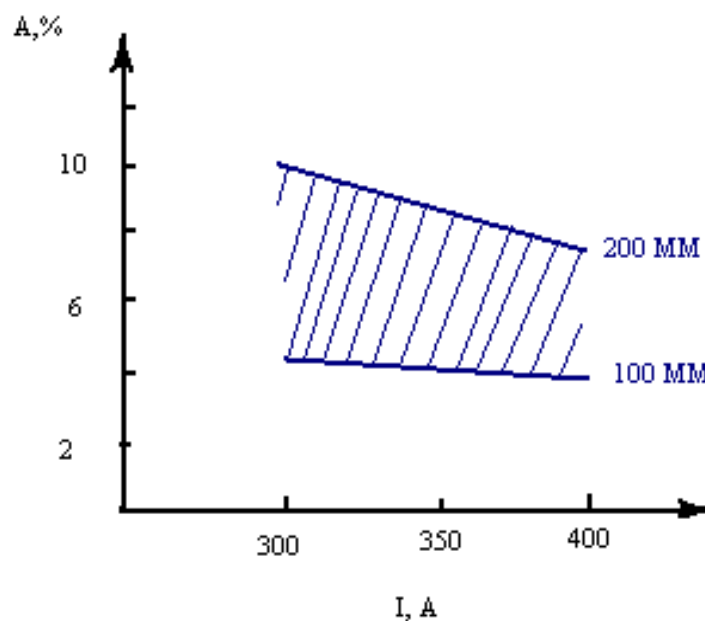


Рисунок 4.19— Залежність пористості A покриття із оксиду алюмінію від струму дуги I при тиску плазми утворюючого газу $1,4 \cdot 10$ Па і дистанції напилення 100-200 мм

Одним із відомих методів зміни структури і зв'язаних з нею експлуатаційних характеристик покриттів являється введення добавок в напиляємий базовий порошок. За допомогою такого методу відбуваються значні зміни пористості таблиця 4.7. При напиленні плазмових покриттів із оксиду алюмінію навіть при додаванні 0.1% алюмінієвої пудри призводить до різкого прискоренню електричного старіння покриття,

навіть до його пробою.

Таблиця 4.7 Густина і пористість плазмових покриттів типу Al-кераміка

Склад покриття	Густина, г/см ³		Пористість, %	
	Експериментальна	довідникова	Довідникова (експериментальна) [24]	Розрахункова
$Al_2O_3 + 70\%Al$	3.87	3.40	21	13.8
$Al_2O_3 + 14\%Al$	3.78	3.40	12	10.0
$Al_2O_3 + 18\%Al$	3.73	3.39	11	9.7
Al_2O_3	3.97	3.25	8	8.1
$Al_2O_3 + 12\%Al$	3.81	3.23	12	15.2

В наших експериментах для систем на основі сумішей Al_2O_3 (80%) – $AlNi$ (20%) покриття залишались не електропровідним. Для системи $Al_2O_3 - Al$ при вмісті алюмінію більше ніж 50% відмічається суттєве підвищення електропровідності. Електроопір зменшувався також і для покриттів на основі плакованої кераміки $Al_2O_3/Al/Ti$ і складав приблизно 10^{-3} Ом.

Такі результати свідчать про те, що певні системи покриттів мали електропровідність покриттів.

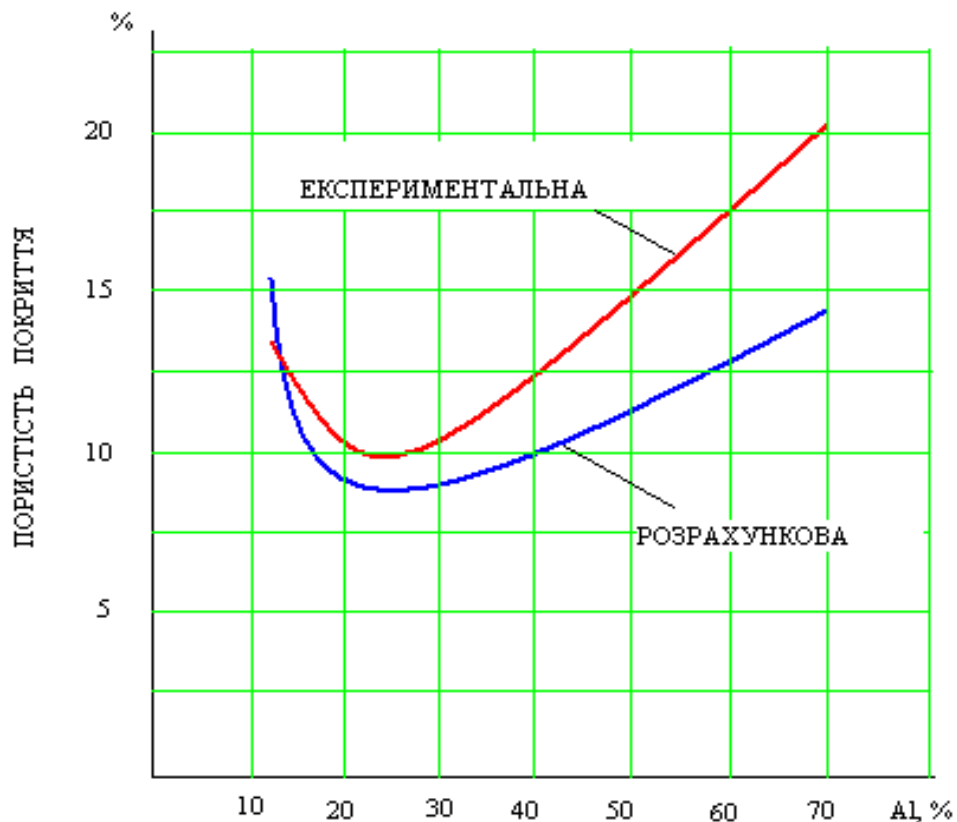


Рисунок 4.20 –Залежність пористості покриття напиленого із Al_2O_3 в залежності від додавання до напилюваного порошку Al

Із отриманої вище залежності можна зробити висновок, що із збільшенням додавання порошку Al до порошку Al_2O_3 пористість покриття зменшується, як для експериментальних так і для розрахункових даних. Це можна пояснити тим, що покриття із Al_2O_3 мають більшу пористість, а з алюмінієм меншу, тому додавання алюмінію зменшує пористість. Але це зменшення відбувається лише до певної межі. З подальшим додаванням порошку Al пористість покриття починає збільшуватись. Це можна пояснити тим, що температура плавлення кераміки більша ніж алюмінію, і в той час, як порошинки кераміки при певній температурі досягають свого пластичного стану, то частинки алюмінію досягнуть стану перерозплавлення. Тому відповідно розбризкування алюмінію буде збільшуватись, відповідно збільшуючи пористість покриття.

За допомогою даної залежності можна встановити, яку кількість порошку алюмінію потрібно додати для того, щоб понизити пористість керамічного покриття, відповідно покращити якість покриття, тобто когезійну міцність покриття.

4.3.5 Обговорення результатів впливу структурних особливостей на модуль пружності, адгезійно-когезійних властивостей плазмових покриттів

Важливою характеристикою розглянутих покриттів є специфічна мікроструктура у вигляді дискових кристалів (сплітів), що знаходяться в фізико-хімічному контакті між собою, рівень якого визначається багатьма факторами. Для даної структури характерним є наявність складної мережі пор і мікротріщин в тілі частинок.

Як виходить з результатів випробувань, спостерігається суттєвий розкид отриманих значень модулів пружності, когезійної міцності, тріщиностійкості плазмових багатофазних покриттів. Суттєвою особливістю отриманих результатів є сильний вплив на модуль пружності мікроструктурних параметрів, таких як товщина розплющених частинок, діаметр плями контакту та відстань між областями контакту в реальних покриттях. Такий неврівноважений стан і складна структура сприяють реалізації конкретного напруженого стану в міжфазній зоні і в самому покритті і відповідно призводять до формування різної дислокаційної структури в цих областях системи «основа-покриття».

Залежно від складу композиції, умов проведення експерименту змінюється динаміка дислокацій при деформації і можливе отримання різних фізико-механічних характеристик покриттів. Наприклад, отримані різні дані по модулю пружності E_n в разі напилення на залізо і сталь (X18H10T). Такі результати можуть бути пояснені використанням різними авторами відрізняються методів вимірювань і аналітичної обробки експериментальних даних.

Для покриття Al_2O_3 спостерігалася адгезионне руйнування покриття, при цьому інтенсивність вивільненої енергії в межфазній зоні склала 25-30 Дж / м². Для покриття Al_2O_3 коефіцієнт інтенсивності при модулі пружності $E_n = 82$ ГПа, склав $K_{Ic} = 1,17$ МПа $\sqrt{м}$. Дане значення відповідає відносній площі фізичного контакту, що наближається до значення 0,4, яке можна вважати граничним значенням для переходу до відшарування покриття.

Зі збільшенням щільності покриття і з наближенням його модуля пружності до пружним характеристикам основного матеріалу зменшується ймовірність розтріскування, збільшується стійкість до руйнування. У цих умовах збільшується ймовірність відшарування по межфазній зоні, з одного боку, але, з іншого боку, можливе руйнування поверхневих шарів основного матеріалу, особливо при міцних адгезійних зв'язках, коли фізична площа контакту наближається до теоретичного максимуму () [20]. Для покриттів на основі термореагуючого порошку NiAl спостерігалось переважно когезійний руйнування покриття, при цьому інтенсивність вивільненої енергії в покритті складала близько 50-65 Дж / м². Коефіцієнт тріщиностійкості для покриття AlNi в області $c / h \sim 2$ склав $K_{Ic} = 5,636$ МПа • м^{1/2}.

Дослідження покриттів на основі суміші AlNi - SiO₂ показали, що покриття демонструють когезійний характер руйнування, при цьому інтенсивність вивільненої енергії складала близько 75-85 Дж / м². Покриття продемонстрували досить високі показники в'язкості руйнування (табл. 1, 2), що пояснюється наявністю в порошкової суміші ультрадисперсної оксидної наносоставляющей SiO₂, що володіє високою реакційною здатністю, і в поєднанні з певною технологією його напилення.

Проведений розрахунок і аналіз механічних випробувань зразків з різними видами плазових покриттів встановив взаємозв'язок між в'язкістю руйнування самого покриття, а також межфазної зони з деякими мікроструктурними і технологічними параметрами напилення.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Основним технологічним способом нанесення покриття у даній магістерській роботі є плазмове напилення. Плазмове напилення являє собою газотермічне напилення, під час якого використовується струмінь електронів, іонів та нейтральних атомів газу, з якого утворюється плазма з використанням плазмотронів.

При плазмовому напиленні покриття формується з дрібних розплавлених частинок, що переносяться на оброблювану поверхню при розпилюванні плазмою дроту, стержнів, стрічок або порошку. У технології плазмового напилення основну роль грає час перебування частинок в плазмі і час перенесення частинок до підкладки, вдосконалення плазмових установок, знання процесів, що протікають в низькотемпературній плазмі при напиленні покриттів.

5.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ)

У ході аналізу шкідливих (Ш) та небезпечних (Н) факторів плазмового напилення покриттів, особливими інтенсивними шкідливими і небезпечними факторами є:

- (Ш) Шкідливі речовини;
- (Ш) Видиме випромінювання в оптичному діапазоні;
- (Ш) Інфра-червоне випромінювання в оптичному діапазоні;
- (Н) Електричний струм;
- (Н) Іскри, бризки і викиди розплавленого металу;
- (Н) Системи які знаходяться під тиском, що не дорівнює атмосферному.

5.2 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

5.2.1 Мікроклімат робочої зони

Суттєвий вплив на стан організму працівника, його працездатність здійснює мікроклімат у виробничих приміщеннях, під яким розуміють умови внутрішнього середовища цих приміщень, що впливають на тепловий обмін працюючих з оточенням. Ці умови визначаються поєднанням температури, відносної вологості та швидкості руху повітря. Параметри мікроклімату робочої зони нормуються ДСН 3.3.6-042-99 „Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень”.

Віддача тепла організмом людини в навколишнє середовище здійснюється трьома способами: конвекцією, випромінюванням та випаровуванням вологи з поверхні шкіри. Чим нижча температура повітря, тим більше тепла віддається випромінюванням. При високій температурі значна частина тепла втрачається випаровуванням.

Вологість повітря істотно впливає на віддачу тепла випаровуванням. Через високу вологість випаровування утруднюється і віддача тепла зменшується. Зниження вологості покращує процес тепловіддачі випаровуванням. Однак надто низька вологість викликає висихання слизових оболонок дихальних шляхів.

Рухомість повітря визначає рівень тепловіддачі з поверхні шкіри конвекцією і випаровуванням. У жарких виробничих приміщеннях при температурі рухомого повітря до 35°C рух повітря сприяє збільшенню віддачі тепла організмом. З підвищенням температури рухоме гаряче повітря саме буде віддавати своє тепло тілу людини, викликаючи його нагрівання.

Рухоме повітря при низькій температурі викликає переохолодження організму.

На дільниці плазмового напилення для регулювання та контролювання параметрів мікроклімату робочої зони встановлені: спиртовий термометр, для вимірювання температури повітря та барометр – для визначення

відносної вологості.

5.2.2 Освітлення ділянки напильника

Для створення сприятливих умов зорової роботи, які б виключали швидку втомлюваність очей, виникнення професійних захворювань, нещасних випадків і сприяли підвищенню продуктивності праці та якості продукції, виробниче освітлення повинно відповідати наступним вимогам:

- створювати на робочій поверхні освітленість, що відповідає характеру зорової роботи і не є нижчою для встановленої норми;
- забезпечити достатню рівномірність та постійність рівня освітленості у виробничих приміщеннях, щоб уникнути частої переадаптації органів зору;
- не створювати засліплювальної дії як від самих джерел освітлення, так і від інших предметів, що знаходяться в полі зору;
- не створювати небезпечних та шкідливих виробничих чинників (шум, теплові випромінювання, небезпека ураження струмом, пожежо- та вибухонебезпечність світильників);
- не створювати на робочій поверхні різких та глибоких тіней;
- повинно бути надійним і простим в експлуатації, економічним та естетичним.

Запропоноване виробництво відноситься до V розряду, норми для якого наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 Норми штучного та природного освітлення приміщення 5-го розряду

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розпізнавання, мм	Штучне освітлення		Природне освітлення		Суміщене освітлення	
		Освітленість, лк		Коефіцієнт природного освітлення, %			
		При комбінованому освітленні	При загальному освітленні	При верхньому комбінованому	При боковому освітленні	При верхньому або комбінованому	При боковому освітленні

			енні	освітленн і	енні	освітленн і	енні
Мало ї точності	1-5	300- 200	20 0-100	3	1	1,8	0,6

На дільниці для плазмового напilenня використовується суміщене освітлення, де природне бокове одностороннє освітлення доповнюється штучним загальним. В якості джерела штучного освітлення використовуються газорозрядні лампи, які внаслідок електричного розряду в середовищі інертних газів і парів металу та явища люмінесценції випромінюють світло оптичного діапазону спектра. Також на дільниці передбачене аварійне освітлення.

Надійність та ефективність природного і штучного освітлення залежить від своєчасності і ретельності їх обслуговування. Забруднення скла світлових отворів та ламп може знизити освітленість приміщення в 1,5-2 рази. Тому вікна необхідно мити не рідше двох разів у рік.

5.2.3 Електробезпека

Процес плазмового напilenня відбувається при значеннях сили струму

300÷350 А та величинах напруги - 80÷150 В, тому можливе ушкодження електричним струмом. Сила струму, що проходить через тіло людини є основним чинником, який обумовлює наслідки ураження. Найбільш шкідливим є струм виробничої частоти 50 Гц.

Для забезпечення усунення причин пошкодження електричним струмом згідно ДНАОП 0.00-1.21-98 „Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів” необхідно:

- заізолювати токопідвідні частини машин та механізмів, а зокрема силовий ланцюг та підводи напруги до вакуумної камери на плазмотроні,

шляхом покриття їх шаром діелектрика, для захисту людини від випадкового доторкання до частин електроустановок, через які проходить струм;

- надійно заземлити вакуумну камеру, водяний насос та пульт керування. Основними технічними факторами захисту людини від доторкання до струмопровідних частин є ізоляція та заземлення (ГОСТ 12.1.030-81 „Электробезопасность. Защитные заземление, зануление”). Опір ізоляції в залежності від номінальної робочої напруги регламентовано Правилами улаштування електроустановок та встановлено, що опір ізоляції складає для ланцюгів релейного захисту постійного струму 10 мОм, змінного струму 6мОм, для релейних апаратів 2 мОм. Призначення захисного заземлення полягає в тому, щоб у випадку появи напруги на металевих частинах установки забезпечити захист людини від ураження електричним струмом при її доторканні до таких частин. В процесі експлуатації електроустановок можливе порушення цілісності заземлювальних провідників та підвищення опору заземлення вище норми. Тому відповідно до ПУЕ-84 передбачено проведення візуального контролю (огляду) цілісності заземлювальних провідників та вимірювання опору заземлення. Такі вимірювання проводять, як правило, при найменшій провідності ґрунту: літом – при найбільшому висиханні чи зимою – при найбільшому промерзанні ґрунту. Вимірювання опору заземлення належить проводити після монтажу електроустановки, після її ремонту, а також не рідше одного разу на рік.

5.2.4 Вимоги до приміщення

Згідно з вимогами Санітарних норм при зварюванні, різанні, наплавці та напиленні металів дільниця напилення повинна розташовуватися в ізольованих приміщеннях, як правило на першому поверсі. Розміщення плазмової дільниці в підвальному приміщенні заборонено.

Приміщення дільниці плазмового напилення має форму, яка виключає

утворення застійних місць, в яких можуть сколюватися пил, аерозолі та газ.

Висота приміщення від рівня полу повинна бути не менш 3,5 м, вільна площа на одного працюючого на зайнята обладнанням, не менше 10 м².

Для оброблення та захисту внутрішніх поверхонь приміщення від дії шкідливих та агресивних речовин та вологи рекомендується використовувати керамічну плитку, кислотостійку штукатурку, олійну фарбу.

Підлоги приміщення повинні бути зносостійкими, теплими, неслизькими, щільними, легко очищуватися.

Ширина виходу із кімнати для наплення має бути не меншою 1м, висота 2,2 м.

5.2.5 Вимоги до працівників, які допускаються до роботи на дільниці

До роботи на установці для плазмового нанесення покриттів допускаються особи, які досягли вісімнадцяти років, пройшли медичне обстеження, навчання роботі на установці, а також мають кваліфіковану групу по електробезпеці не нижче другої.

Особи, які працюють на плазмових установках, повинні:

- проходити періодично (кожен рік) медичні огляди;
- пройти курс навчання, здати іспити та отримати посвідчення на право роботи на установці;
- пройти вступний інструктаж з техніки безпеки на робочому місці;
- періодично (раз на 6 місяців) проходити повторний інструктаж з техніки безпеки;
- бути забезпечені спецодягом та засобами індивідуального захисту.

При струменево-абразивній обробці передпліччя оператора слід захищати нарукавниками, відкриті ділянки шкіри шиї та грудей – нагрудниками, а руки – рукавицями із азбестової тканини.

Очі захищають від попадання бруду окулярами з товщиною скла від 2

мм. При роботі на установках плазмового напилення оператору необхідно дотримуватися всіх вимог техніки безпеки. Недотримання цих правил оператором може привести до професійних захворювань.

5.2.6 Вимоги до вентиляції

В запропонованому технологічному процесі нанесення захисних покриттів на зразки, що досліджуються плазмовим напиленням основним джерелом небезпечностей для працівників є операція підготовки поверхні виробу перед напиленням - струменево-абразивна обробка. Основною шкідливістю такої обробки є пил, який виділяється при зіткненні виробу з корундовим піском.

Для зменшення дії шкідливих речовин на організм людини, яка обслуговує установку для струменево-абразивної обробки на дільниці, необхідно передбачити місцеву вентиляцію.

Місцева вентиляція призначена для видалення шкідливостей, безпосередньо в місцях їх утворення, та перешкоджає поширенню їх в повітрі всього виробничого приміщення.

Перевагою місцевої вентиляції є те, що відсос мінімальних обсягів повітря з великим вмістом шкідливих домішок в ньому, попереджує забруднення повітря всього приміщення.

5.3 Розрахунок місцевої вентиляції

Для створення нормальних санітарно-гігієнічних умов праці приймаємо місцеву з механічною тягою вентиляційну систему. Кількість повітря, необхідного для вентиляції приміщення з шкідливими домішками, які необхідно видалити за допомогою місцевої вентиляції розраховується за

формулою:

$$Q_m = n \cdot Q_o, \text{ м}^3/\text{год}$$

(5.1)

де Q_o - кількість повітря, необхідного для видалення шкідливостей від одного джерела, $\text{м}^3/\text{с}$;

n - кількість джерел, які виділяють шкідливості. На ділянці плазмового наплення $n=1$.

Кількість повітря, необхідна для видалення шкідливостей від одного джерела розраховується за формулою

$$Q = 3600 \cdot S \cdot V_B \quad (5.2)$$

де S - площа повітроприймального отвору, м²;

V_B - середня швидкість руху повітря в повітроприймачі, м/с.

Площа повітроприймача:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad \text{м}^2 \quad (5.3)$$

де d - діаметр повітроприймача, м. Прийmemo $d = 0,08$ м.

Тоді

$$S = \frac{3,14 \cdot 0,08^2}{4} = 0,005 \quad \text{м}^2.$$

Середня швидкість руху повітря в повітря приймачі:

$$V_B = \frac{V_T \cdot l^2}{k \cdot d^2} \quad (5.4)$$

де V_T - допустима швидкість руху повітря у повітроприймачі, м/с. Для струменево-абразивної обробки приймаємо $V_T = 0,4$ м/с;

k - коефіцієнт, який залежить від форми вхідного перерізу повітроприймача.

Прийmemo k для круглих та квадратних отворів рівним 0,06.

l - відстань від перерізу повітроприймача до місця виділення шкідливих речовин. м. В нашому випадку приймаємо $l = 0,25$ м.

d - діаметр повітроприймача, м. Приймаємо $d = 0,08$ м.

Тоді:

$$V_{\text{в}} = \frac{0,4 \cdot (0,25)^2}{0,06 \cdot (0,08)^2} = 10,4 \text{ м/с.}$$

Кількість повітря, необхідного для видаленні шкідливостей, для місцевої вентиляції, розраховане по (5.1) з урахуванням (5.2)-(5.4) становить:

$$Q_m = 1 \cdot 3600 \cdot 0,0005 \cdot 10,4 = 117,2 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Втрати напору в повітроприймачі на тертя розраховуються за формулою:

$$H_{\text{тр}} = \frac{\rho \cdot \lambda \cdot L}{2d} \cdot V_{\text{в}}^2 \quad (5.5)$$

де λ - коефіцієнт гідравлічних втрат, для металевих повітроводів $\lambda = 0,01$.

ρ - щільність повітря, г/см³; при стандартних умовах $\rho = 1,2$ кг/м³;

L – довжина повітропроводу, м. Приймаємо L=3 м.

Тоді:

$$H_{\text{тр}} = \frac{1,2 \cdot 0,01 \cdot 3}{2 \cdot 0,08} \cdot 10,4^2 = 24,34 \text{ Па.}$$

Втрати на місцевий опір:

$$H_{\text{м}} = \frac{z \cdot \rho \cdot V_{\text{в}}^2}{2} \quad (5.6)$$

де z - коефіцієнт місцевих опорів, приймаємо $z = 1,4$.

Тоді:

$$H_{\text{м}} = \frac{1,4 \cdot 1,2 \cdot 10,4^2}{2} = 90,8 \text{ Па}$$

Загальні втрати у вентиляційній системі:

$$H_{\text{заг}} = H_{\text{м}} + H_{\text{тр}} \quad (5.7)$$

$$H_{заг} = 90,8 + 24,34 = 115,12 \text{ Па.}$$

На основі зроблених розрахунків обираємо вентилятор 2,5/6,3 ЦСУ-14 з діаметром повітропроводу 0,1 м.

5.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

5.4.1 Пожежна безпека

Основним нормативним документом, що регламентує вимоги щодо пожежної безпеки є Закон України „Про пожежну безпеку”, прийнятий 17 грудня 1995 року.

Пожежа – це неконтрольоване горіння вогнища, що поширюється в часі і просторі.

Пожежа може бути викликана причинами електричного (іскроутворення в електрообладнанні, коротке замикання, несправність електрообладнання) та неелектричного характеру (необережне поводження з вогнем).

За вибухопожежною та пожежною небезпекою відповідно до основних норм технологічного проектування (ОНТП 24-86) дільниця плазмового напilenня відноситься до категорії Г.

Для забезпечення пожежної безпеки електричні ланцюги розраховуються в залежності з Правилами технічної експлуатації електроустановок, які передбачають вибір необхідного перерізу проводів, ізоляції, захисту запобіжними пристроями в залежності від напруження, від категорії приміщення, в якому обладнується електроустановка.

Дільниця плазмового напilenня забезпечена двома вуглекислотними вогнегасниками марок ОУ-2 та ОУ-8 (ДСТУ 3734-98 „Пожежна техніка. Вогнегасники переносні. Загальні технічні вимоги”), ящиком з піском, а також має безпосередній вихід до води.

На випадок пожежі передбачено два евакуаційні виходи: безпосередньо з приміщення назовні через запасний вихід, та через коридор на вулицю через основний.

5.4.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У випадку пробою електричної напруги на корпус електродугового агрегату необхідно відключити рубильник і довести до відома про це

майстра або начальника ділянки.

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

У випадку загорання електродугового агрегату 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 заводську пожежну охорону за телефоном 101;

- приступити до гасіння вогню пожежі наявними в цеху (на ділянці) засобами пожежогасіння (вогнегасник, пісок, пожежний кран тощо);

- викликати до місця пожежі посадових осіб (начальника цеху, ділянки).

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

6 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Розділ магістерських дисертацій «Розроблення стартап-проекту» присвячено реалізації першого етапу розроблення стартап-проекту, а саме висвітленню маркетингових аспектів створення стартапу: відбору ідей, створенню концепції продукту, визначенню перспектив ринкової реалізації проекту та розроблення маркетингової стратегії.

Розділ є завершальною частиною магістерської дисертації і виконується у вигляді оцінювання можливостей та формування заходів з ринкового впровадження.

Метою розділу є формування інноваційного мислення, підприємницького духу та формування здатностей щодо оцінювання ринкових перспектив і можливостей комерціалізації основних науково-технічних розробок, сформованих у попередній частині магістерської дисертації у вигляді розроблення концепції стартап-проекту в умовах висококонкурентної ринкової економіки глобалізаційних процесів.

Завдання розділу полягає в маркетинговому аналізі перспектив реалізації запропонованих магістрантом науково-технічних рішень та пропозицій, оцінювання можливостей їх ринкового впровадження.

Далі в таблицях 6.1 – 6.16 проведено розробку стартап-проекту.

Таблиця 6.1 Опис ідеї стартап-проекту

ЗМІСТ ІДЕЇ	НАПРЯМ ЗАСТОСУВАННЯ	ВИГОДИ ДЛЯ КОРИСТУВАЧА
1	Промисловість	1. Контроль пружних параметрів матеріалу. 2. Покращення фізико-хімічних характеристик металу.
2	Конструювання	
3	Проектування	

Таблиця 6.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних

характеристик ідеї проекту

№п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Мій проект	(потенційні) товари/концепції конкурентів	W	N	S
1	Економічні	Напилення	Напилення, наплавлення	+	-	-
2	Призначення (технічні)	Напилення	Напилення, наплавлення	+	-	-
3	Надійності	Адгезійна і когезійна міцність	Міцність зчеплення	+	-	-
4	Технологічні			+	-	-
5	Ергономічні	Простий процес налаштування	Можливість пробних виробів	+	-	-
6	Органолептичні			+	-	+
7	Естетичні	Дуже добре	Добре	+	-	-
8	Транспортабельності	Легко	Тяжко	+	-	-
9	Екологічності	Шкідливі фактори		-	-	+
10	Безпеки			-	+	-

Таблиця 6.3 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	1000
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	
6	Середня норма рентабельності в галузі,	70

	%	
--	---	--

Таблиця 6.4 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Потреба замовника у визначенні характеристик виробу	Промислові комплекси	Реальний розрахунок пружних параметрів вихідної конструкції	До виробу: значення пружних характеристик. До компанії: виготовлення в срок продукції

Таблиця 6.5 Фактори загроз

№п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Точність	Неправдиві дані про параметри	Відмова
2	Точність	Руйнування покриття	Відмова

Таблиця 6.6 Фактори можливостей

№п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Економічність	Заміна стандартного методу визначення пружних та електропровідних параметрів виробу	Менша вихідна вартість послуги
2	Якість	Якісне покриття з певним набором параметрів	Збільшення попиту
3	Простота	Дешеве обладнання та просте налаштування	Швидкість виробництва зростає

4	Конструкторський	Точне проектування виробів з 100% досягненням реального результату	
---	------------------	---	--

Таблиця 6.7 Аналіз конкуренції в галузі за М.Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари- замінники
	ІЕЗ ім. Є.О.Патона		Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку замінників
Висновки	+	+	+	-	-

Таблиця 6.8 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Простота використання	Обладнання легко налаштовується
2	Економічність	Потрібно менше спеціалістів

Таблиця 6.9 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№п/п	Конкурентоспроможності	Бали 1-20	Порівняння з ІЕЗ ім. Є.О.Патона						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Якість виробу	12	-	-	-	-	+	-	-
2	Економічність	10	-	-	-	+	-	-	-
3	Простота виготовлення		-	-	+	-	-	-	-

Таблиця 6.10 SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Економічність, простота	Слабкі сторони: точність вимірювань
--	--

Можливості: дешевість виробу	Загрози: не відповідають вимогам
------------------------------	----------------------------------

Таблиця 6.11 Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Промисловість	Висока	Низький	Низька	Висока

Таблиця 6.12 Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Якість	Висока	Невисокі	Дешевизна процесу

Таблиця 6.13 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристик товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні	Так	Так Виробництво заготовок, пошук матеріалів	

Таблиця 6.14 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
---------	----------------------------	-------------------------------------

Виробництво	Якість та простота	Дешевизна продукції
-------------	--------------------	---------------------

Таблиця 6.15 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Напилення з певними параметрами пружності та електропровідності		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/Характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	1.		
	2.		
	Сертифікати випробувань		
	Без пакування		
	Марка: LiushenkoEugenyParametrs		
III. Товар із підкріпленням	До продажу		
	Після продажу		
Технологія напилення			

Висновок: заміна стандартних методів отримання певних пружних та електропровідних параметрів напиленого покриття є доцільним, оскільки зменшує кількість працівників, потрібна менша кваліфікація, потрібна менша кваліфікація конструкторів. Простота виготовлення конструкції. Зменшення точності виготовлення зразків. Дешевизна виробу.

ВИСНОВКИ

Магістерська робота присвячена дослідженню впливу технології нанесення покриттів методом плазмового напилення на параметри пружності та електропровідності. Дослідження властивостей були виконані за допомогою експериментальних і теоретичних досліджень, а саме:

1. З аналізу отриманих при дослідженні даних, можна стверджувати, що технології нанесення плазмових покриттів мають значний вплив на параметри пружності, які в свою чергу мають вплив на адгезійну і когезійну міцність матеріалу.
2. В результаті проведених досліджень по внутрішньому тертю системи «основа-покриття», а також механічних випробувань на вигин, розраховані модулі пружності композиційних плазмових покриттів у відповідності з розробленою методикою. Створення різних механічних сумішей покриттів з присутністю ультра дисперсних складових (аеросилів) призводять до підвищення пружних властивостей композиційних матеріалів.
3. Була розроблена розрахунково-експериментальна методика отримання модуля пружності плазмових покриттів з використанням результатів випробувань на вигин.
4. Порівняні отримані результати з даними інших, альтернативних методів вимірювання, такими як мікροідентування, випробування на розтяг.
5. Проаналізовано взаємозв'язок міцносних характеристик з електропровідністю покриттів.

Результати експериментальних досліджень дозволили зробити висновок, що технологія нанесення покриттів значно впливає на параметри пружності та електропровідності. У зв'язку з цим, можна стверджувати, що визначення цих фізико-хімічних властивостей після напилення є доцільним. Зокрема, за допомогою запропонованої методики, яка використовує неруйнівний метод контролю і алгоритм розрахунку, це буде просто і зручно виконувати. Також була розрахована відносна похибка експерименту при визначенні електроопору.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Барвинок, В. А. Физическое и математическое моделирование процессов формирования мезоструктурно-упорядоченных плазменных покрытий [Текст] / В. А. Барвинок, В. И. Богданович // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82.– № 2.– С. 105–112.
2. Копылов, В.И. Физико-механические характеристики и внутреннее трение материалов с многофазными плазменными покрытиями [Текст] / В.И. Копылов, Д.А. Антоненко // Проблемы техники.– 2014.– № 2.– С. 72–89.
3. Копылов В. И. Оптимизация получения прочных композиций, основанная на взаимосвязи технологических и эксплуатационных параметров плазменного напыления // Проблемы прочности. – 1999. – № 1.– С. 68 – 75.
4. Копылов В. И. Влияние состава и микроструктуры керамических оксидных покрытий на физико-механические свойства композиционных материалов / В. И. Копылов, И. В. Смирнов, С. В. Рыбаков // Проблемы техники. – 2005. – №2. – С. 3 – 19.
5. Хоникомб Р. Пластическая деформация материалов. М.: Мир,1972. – 408 с.
6. Мовчан Б. А. Механические размерные эффекты двухфазных неорганических материалов // Автоматическая сварка. – 2008. – №11. – С. 166 – 170.
7. Копылов В. И., Смирнов И. В., Долгов Н. А. Использование критериев разрушения для оценки прочностных свойств газотермических покрытий. // Проблемы техники. – 2004 – №4 – С. 3–11.
8. Копылов В. И., Смирнов И. В., Долгов Н. А. Исследование трещиностойкости плазменных покрытий из оксида алюминия. // Вибрация в технике и технологиях. – 2004 – №5(37) – С. 90–92.
9. Долгов А. Н. Метод определения модуля упругости газотермических покрытий. // Порошковая металлургия. – 2004 – №7/8 – С. 110-115.
10. Головин, Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках. (Обзор) [Текст] / Физика твердого тела.– 2008.– т.50, вып. 12.– С.- 2113–2142.
11. Башта, А.В. Механические характеристики прочности приповерхностных слоев конструкционной керамики [Текст] / А.В. Башта // Вісник НТУ «ХТУ».– 2012.– №48 (954).– С. 15–24.
12. Долгов, М. А. Використання критерію адгезійно-когезійної рівномірності під час згинання для створення покриттів із оптимальним поєднанням характеристик міцності [Текст] / М. А. Долгов, І. В. Чихіра, П. Д. Стухляк, І. Б. Букетов // Нафтова і газова промисловість. – 2010. – № 6. – С. 41 – 45.
13. Иванченко, А. В. Особенности адгезионно-когезионного разрушения плазменнонапыленных покрытий [Текст] / А. В. Иванченко, Н. А. Долгов, А. В. Бесов, А. В. Черный // ВЕСТНИК ХНТУ. – 2015. – № 3(54).– С. 126 – 132.
14. Bao, Y.W. Evaluating elastic modulus and strength of hard coating

by relative method [Text] / Y.W. Bao, Y.C. Zhou, X.X. Bu, Y. Qiu // Materials Science and Engineering.– A 458.– 2007.– P. 268 – 274.

15. Yamazaki, Y. A. The determination of the delamination resistance in thermal barrier coating system by four-point bending tests [Text] / Y. Yamazaki, A. Schmidt, A. Scholz // Surface & Coating Technology.– 2006.– 201.– P. 744 – 754.

16. Liming, Yu Damping efficiency of the coating structure [Text] / Yu Liming, Ma Yue, Zhou Chungeng, Xu Huibin // International Journal of Solids and Structures. – 2005. – № 42. – P. 3045 – 3058.

17. Brantner, H.P. Local and global fracture toughness of a flame sprayed molybdenum coating [Text] / H.P. Brantner, R. Pippan, and W. Prantl // Journal of Thermal Spray Technology.– 2003.– V. 12(4).– P. 560–571.

18. Копилов В. І. Адгезійні властивості і міцність зчеплення газотермічних покриттів [Текст] / В. І. Копилов, І. В. Смирнов, Д. О. Антоненко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2010. - № 1. – С. 93– 103.

19. Максимович Г.Г., Шатинский В.Ф., Копылов В.И. Физико-химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытиями. – Киев.: Наук. думка, – 1983. – 264с.

20. Панасюк В.В., Андрейкив А.Е. Об одной задаче предельного равновесия для неограниченного хрупкого тела с трещиной.// Прикл. механика, 1970, 6, вып. 6.- С. 25-29.

21. Мартюшов К. И. Электропроводность композиционных резистивных материалов [Текст] / К. И. Мартюшов // Обзоры по электронной технике. – Серия 5.– Вып. – 8 (910). – М.: ЦНИИ «Электроника», 1982. – 57 с.

22. Скороход В. В. Физико-металлургические основы спекания порошков [Текст] / В. В. Скороход, С. М. Солонин.– М.: Metallurgia, 1984.– 160 с.

23. Скороход В. В. Физико-механические свойства пористого никелида титана материалов [Текст] / В. В. Скороход, С. М. Солонин, И. Ф. Мартынова, Н. В. Гончарук // Порошковая металлургия. – № 3, - 1991. – С. 34–38.

24. Копилов В. І. Адгезійні властивості і міцність зчеплення газотермічних покриттів [Текст] / В. І. Копилов, І. В. Смирнов, Д. О. Антоненко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2010. - № 1. – С. 93– 103.