

Дерябкіна Є.С.,  
Клочко О.Ю.

Державний  
біотехнологічний  
університет  
м. Харків, Україна

E-mail:  
[216464g@gmail.com](mailto:216464g@gmail.com)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ  
ЛАЗЕРНОГО ОПЛАВЛЕННЯ НА  
МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ ПЛАЗМОВОГО  
ПОКРИТТЯ І ОСНОВИ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-18>

УДК 621.791.052

*Дерябкіна Є.С., Клочко О.Ю. Дослідження впливу параметрів лазерного оплавлення на міцність зчеплення плазмового покриття і основи*

*Анотація.* У роботі розглянуто особливості формування плазмових покриттів за умови подальшого оплавлення лазерним променем, які, порівняно з плазмовими покриттями без оплавлення, характеризуються підвищеною міцністю зчеплення з основою.

Проблему утворення міцного з'єднання між покриттям і основою вирішено шляхом дослідження адгезійної взаємодії, оскільки саме вона визначає експлуатаційні властивості поверхонь деталей. Визначення кількісних закономірностей та оцінювання фізико-хімічних процесів, що відбуваються в зоні контакту покриття з підкладкою і приводять до досягнення необхідної адгезійної міцності, з метою розроблення теоретично обґрунтованих рекомендацій щодо технології її формування можливе з використанням положень квантової механіки. Обґрунтовано, що мірою міжатомного зчеплення у твердому тілі є енергія зв'язку, яка адекватно описує адгезійну міцність. Розрахунок енергії адгезії виконано на основі енергетичного підходу до оцінювання металевих, ковалентних та іонних зв'язків між атомами основи і покриття. При розгляді окремих атомів і молекул домінуючу роль відіграє обмінна взаємодія, зумовлена енергією, що виникає між розплавленими атомами покриття та атомами металу основи і є визначальною складовою сумарної енергії зв'язку двох силових центрів.

Теоретичні дослідження та отримані експериментальні значення адгезійної міцності дали змогу визначити оптимальні режими лазерної обробки, за яких відбувається повне приварювання плазмового покриття до основи внаслідок повної дисоціації оксидних плівок на підкладці. Максимальне значення міцності зчеплення  $\sigma_{зч} = 180$  МПа (для плазмових покриттів із лазерним оплавленням) досягнуто за мінімальної швидкості лазерного променя  $0,8 \cdot 10^{-3}$  м/с, діаметра променя в зоні контакту з поверхнею  $1 \cdot 10^{-3}$  м та коефіцієнта перекриття лазерних доріжок 0,9. За підвищення швидкості лазерного променя до  $6 \cdot 10^{-3}$  м/с при сталих значеннях діаметра променя та коефіцієнта перекриття лазерних доріжок міцність зчеплення зменшується до  $\sigma_{зч} = 100$  МПа, що пов'язано зі скороченням часу дії лазерного оплавлення.

Досліджено теоретичну модель взаємодії в системі «покриття – основа», аналіз якої дозволяє оцінити процес формування міцного металевого зв'язку, обґрунтувати доцільність застосування покриттів із самофлюсівних порошків сплавів на основі заліза, а також здійснювати прогнозування міцності зчеплення з урахуванням розрахунку енергії адгезії.

**Ключові слова:** плазмові покриття, лазерне оплавлення, адгезія, міцність зчеплення, швидкість променя, коефіцієнт перекриття доріжок.

*Deryabkina, E.S., Klochko, O.Yu. Investigation of the Effect of Laser Remelting Parameters on the Adhesion Strength of Plasma Coatings to the Substrate*

**Abstract.** *The paper considers the features of plasma coating formation followed by laser beam remelting. Compared with plasma coatings without remelting, such coatings exhibit significantly increased adhesion strength to the substrate.*

*The problem of forming a strong bond between the coating and the substrate is addressed through the investigation of adhesion interaction, as it is the determining factor for the service performance of component surfaces. The determination of quantitative relationships and the evaluation of physicochemical processes occurring in the contact zone between the coating and the substrate, which lead to achieving the required adhesion strength, enable the development of theoretically substantiated technological recommendations using the principles of quantum mechanics. It is substantiated that the measure of interatomic bonding forces in a solid is the bonding energy, which adequately explains adhesion strength. The adhesion energy was calculated using an energy-based approach to evaluate metallic, covalent, and ionic bonds between the atoms of the substrate and the coating. When considering individual atoms and molecules, the dominant role belongs to exchange interaction, which is caused by the energy arising between molten coating atoms and substrate metal atoms and constitutes the determining component of the total bonding energy of two force centers.*

*Theoretical studies and experimentally obtained adhesion strength values made it possible to determine optimal laser processing modes under which complete welding of the plasma coating to the substrate occurs as a result of complete dissociation of oxide films on the substrate surface. The maximum adhesion strength value of  $\sigma_a = 180$  MPa (for plasma coatings with laser remelting) was achieved at a minimum laser beam scanning speed of  $0.8 \times 10^{-3}$  m/s, a laser beam diameter at the interaction zone of  $1 \times 10^{-3}$  m, and a laser track overlap coefficient of 0.9. With an increase in the laser beam speed to  $6 \times 10^{-3}$  m/s at constant beam diameter and track overlap coefficient, the adhesion strength decreases to  $\sigma_a = 100$  MPa, which is associated with a reduction in the laser remelting exposure time.*

*A theoretical model of interaction in the “coating–substrate” system was developed and analyzed. Its analysis makes it possible to evaluate the process of forming a strong metallic bond, substantiate the application of coatings based on self-fluxing iron-based alloy powders, and predict adhesion strength taking into account the calculated adhesion energy.*

**Keywords:** *plasma coatings, laser remelting, adhesion, adhesion strength, laser beam speed, track overlap coefficient.*

### **Актуальність проблеми**

Розроблення технологій надання поверхням відповідальних деталей високих фізико-механічних властивостей, при збереженні властивостей основного матеріалу, зберігає актуальність на сучасному етапі розвитку техніки. Найбільшого поширення набули газотермічні, зокрема плазмові технології нанесення функціональних покриттів.

Застосування плазмового напилювання обмежується недостатньою адгезією і зносостійкістю покриттів, а також значною пористістю. Доведено, що оплавлення висококонцентрованим джерелом тепла - лазерним випромінюванням дозволить підвищити якість напилених покриттів і є найефективнішим способом з огляду на технологічність, продуктивність, гнучкість і можливість оброблювання виробів будь яких розмірів і геометрії. Ще одним важливим моментом є використання плазмових і лазерних технологій без створення особливої атмосфери (на повітрі) і відмінна особливість лазерної обробки можливість транспортування лазерного променя на достатньо довгі дистанції.

Поряд із вирішенням загальних проблем створення якісних захисних покриттів стоїть завдання оптимального вибору матеріалу покриття, розробки та впровадження

нових дешевих зносостійких матеріалів з високими технологічними властивостями і створення наукових знань у галузі створення функціонально орієнтованих антифрикційних матеріалів і покриттів, які мають якісно новий комплекс службових властивостей, що є важливим і актуальним аспектом для практичного використання у сучасному машинобудуванні.

Суттєвий інтерес є інтегрування плазмових і лазерних технологій, які значно розширюють можливість створення покриттів з широким спектром властивостей, що дозволить заміну коштовних дефіцитних матеріалів звичайними вуглецевими та низьколегованими сталями.

### Аналіз останніх досліджень

Зростання вимог сучасної техніки і промисловості до параметрів поверхневих шарів зумовлює необхідність створення композиційних покриттів, які дозволяють формувати на робочій поверхні функціональні шари із широким спектром експлуатаційних властивостей. Водночас матеріали покриття повинні поєднувати комплекс важкосумісних характеристик - високі значення міцності, пластичності, твердості. Це забезпечує можливість відновлення і зміцнення деталей з обмеженим запасом втомної міцності, а також розширює сферу застосування таких технологій для значної кількості деталей, що працюють під дією підвищених температур, ударних навантажень [1,2].

Плазмове напилювання є найбільш перспективним, високотехнологічним та ефективним процесом з газотермічних способів нанесення покриттів, що застосовується для підвищення стійкості вузлів машин або виробів, які працюють в умовах абразивної дії робочого середовища, шляхом використання композиційних порошків, що не поступаються карбиду. Цей метод полягає в розплавленні матеріалу, що наноситься за допомогою високо - температурного струменя, який утворюється плазмовим пальником, з подальшим розпорошенням розплаву потоком іонізованого газу. Як плазмоутворювальні матеріали найбільш поширені вода і гази: аргон, гелій, чистий азот, а також їх суміші. При плазмовому напилюванні щільність потужності теплового потоку струменя (до 1050 Вт/м<sup>2</sup>) і висока температура (4000–5000К) дозволяють наносити широку гаму порошкових матеріалів. Перевагами плазмового напилювання є можливість нанесення покриттів з різних матеріалів: металів, сплавів, оксидів, карбідів та інших сполук; висока продуктивність процесу при високому коефіцієнті використання порошку; можливість управління енергетичними параметрами плазми; нагрівання поверхні до порівняно невисоких температур (250-300<sup>0</sup>С), що сприяє збереженню особливості структури і властивостей матеріалу основи [1,2]. Але, незважаючи на визначені можливості, зазвичай не вдається повністю реалізувати його переваги через низьку адгезійну міцність і пористість покриттів, залишкові напруження [3].

Щоб поліпшити характеристики міцності покриттів вводиться їх оплавлення. Широко використовуються такі методи об'ємної обробки як оплавлення газовим пальником, в соляній ванні або в печі, а також ТВЧ [4,5]. Однак, при таких способах відбувається інтенсивне нагрівання деталі, що значно змінює структуру основи і викликає короблення. а також можливе стікання покриття [4].

Найбільш прогресивним і ефективним методом оплавлення газотермічних покриттів, позбавленим зазначених недоліків є оплавлення лазерним випромінюванням [6]. Використання лазерного випромінювання як локального висококонцентрованого джерела інфрачервоного випромінювання відкриває широкі можливості модифікації структури і властивостей поверхневих шарів металевих матеріалів. Крім локальності, перевагою лазерної обробки є можливість безперервного керування процесом: глибина нагріву зменшується зі збільшенням інтенсивності лазерного випромінювання, так як

при цьому відбувається більш швидке нагрівання поверхні при малій щільності потоку і тривалості часу опромінення [7]. Процес оплавлення самофлюсних газотермічних покриттів використовується і за кордоном. Так фірма «Метко» оплавляє покриття 10 кВт CO<sub>2</sub> – лазером. При цьому зменшується пористість, покращується хімічна чистота, за рахунок зменшення вмісту кисню, та структурна однорідність покриття. Причому продуктивність процесу в 10 разів вища, ніж за традиційних методів оплавлення [8]. Лазерне оплавлення газотермічних покриттів зі сплавів, що самофлюсуються, значно змінює їх структуру і властивості, підвищуючи як фізико-механічні, так і експлуатаційні характеристики, і дозволяє вести технологію зміцнення – відновлення низки деталей, які іншими традиційними методами не можуть бути рівнозначно оброблені. Застосування лазерів перспективне на всіх стадіях створення покриттів: для очищення і попередньої підготовки поверхні, на яку наноситься покриття; у самому процесі напилювання; при наступній термообробці; для контролю якості покриття та розмірів деталі.

У разі плазмового напилювання сплавів, що самофлюсуються, необхідна адгезійна міцність забезпечується тільки після подальшого оплавлення покриттів, тому дана технологічна операція є найбільш прийнятним об'єктом дослідження і оптимізації не тільки за її ступенем впливу на міцність зчеплення, але і по можливості технологічного управління нею, що особливо ефективно при оплавленні покриття. Таким чином, поєднання процесів плазмового напилювання порошків зносостійких самофлюсівних сплавів і їх наступне оплавлення лазерним випромінюванням є актуальним і перспективним науково-технічним завданням і служить для розробки нових технологічних процесів при зміцненні і відновленні цілого ряду деталей машин і механізмів.

#### **Формулювання мети дослідження**

*Мета дослідження* - визначення впливу параметрів лазерного випромінювання на якість (міцність зчеплення) плазмових покриттів з порошків самофлюсівних сплавів на основі заліза з урахуванням теоретичної оцінки процесів з'єднання покриття - основа.

#### **Методичний підхід в проведенні досліджень**

Проблематика формування міцного з'єднання між покриттям та основою є предметом численних досліджень, оскільки саме адгезійна взаємодія визначає експлуатаційні властивості поверхонь деталей. Отримання високих показників якості плазмового покриття забезпечується з урахуванням оцінки фізико-хімічних процесів, що протікають у зоні контакту покриття та підкладки, які призводять до досягнення необхідної адгезійної міцності, з метою прийняття теоретично обґрунтованих рекомендацій щодо технології їх створення. Доцільним інструментом для пояснення механізмів взаємодії між матеріалами покриття і основи та для обґрунтування вибору технологічних режимів їх формування є використання положень квантової механіки.

У [3] зазначено, що основний внесок у зчеплення забезпечують механічні фактори, доповнені дифузійними процесами, частковим сплавленням матеріалів, хімічними реакціями та дією слабких фізичних сил типу Ван-дер-Ваальса. Водночас механічне зчеплення та Ван-дер-ваальсові сили мають нестійкий характер і не здатні забезпечити високий рівень адгезії; вирішальну роль відіграють саме хімічні зв'язки між атомами двох матеріалів. Хімічна взаємодія на межі поділу покриття та основи ґрунтовно розглядається у багатьох публікаціях [9], де її описують із термодинамічних та енергетичних позицій. Це особливо актуально для металів, структура яких характеризується щільним атомним пакуванням і переважно сферичною симетрією міжатомних зв'язків. Формування міцного контакту між атомами покриття та підкладки відбувається послідовно у два кроки: спершу атоми зближуються до відстаней, на яких

починають проявлятися міжатомні сили. На другому етапі встановлюються стійкі хімічні зв'язки, причому ключовим чинником є адсорбційні процеси - фізична адсорбція та хемосорбція, що завершуються утворенням міцного хімічного зв'язку.

Встановлено, що вирішальним чинником адгезійної міцності є електронні процеси квантового рівня, які визначають перерозподіл електронної густини між атомами контактуючих матеріалів, дозволяють прогнозувати характер та інтенсивність взаємодії різних елементів або оцінити потенційну міцність їх зчеплення. У більшості робіт опис взаємодії частинок покриття та підкладки подано на якісному рівні, що ускладнює кількісний аналіз.

Для одержання кількісних закономірностей необхідним є застосування методів, здатних відобразити специфіку електронної будови атомів та динаміку зміни їхніх електронних оболонок у процесі контактування. Таким чином, для формування покриттів з високими якісними характеристиками і прогнозованими експлуатаційними властивостями важливо враховувати фізико-хімічні процеси, що відбуваються у зоні контакту та визначають кінцевий рівень адгезії.

Мірою сил міжатомного зчеплення твердого тіла може бути енергія зв'язку, яка добре пояснює адгезійну міцність. Існує два підходи до визначення енергії зв'язку [10,11]: на основі оцінки ван-дер-ваальсової взаємодії та оцінки адгезії на рівні електронної будови атому квантово-механічним методом.

Розрахунок енергії адгезії проводиться як енергетичний підхід до оцінки металевих, ковалентних, іонних зв'язків між атомами основи і покриття. Стосовно розгляду окремих атомів та молекул домінуючу роль належить обмінній взаємодії. Атоми покриття  $M_{II}$  при плазмовому напилюванні у розплавленому стані потрапляють на поверхню основи  $M_{O}$ , як наслідок утворюється енергія, яка і забезпечує взаємодію між покриттям та атомами металів основи, що і обумовлює сили тяжіння. Обмінна енергія і є  $E_{зв}$  - визначальною величиною загальної енергії зв'язку 2-х силових центрів (рис.1), характер взаємодії яких описується рівнянням Шредінгера [12]:

$$\hat{H} \cdot \psi = E_{зв} \psi \quad (1)$$

де  $\hat{H}$  – оператор Гамільтона;  $E_{зв}$  - загальна енергія зв'язку;  
 $\psi$  – хвильова функція.

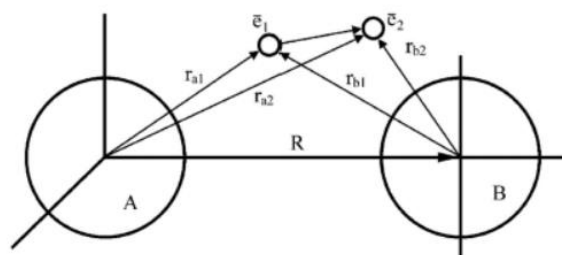


Рис.1. Схема взаємодії двох силових центрів

Обмінна взаємодія має квантово-механічний ефект і характеризує специфічну взаємодією тотожних частинок. При розрахунку  $E_{зв}$  слід дотримуватися положення, що відповідає квазіхімічному трактуванню енергії кристалів [13], згідно з якою енергія зв'язку кристала дорівнює сумі енергій розриву всіх парних зв'язків. Кожен електрон взаємодіє з 2-ма протонами. Загальна симетрична хвильова функція:

$$\Psi = \Psi_{a,1} \Psi_{b,2} + \Psi_{a,2} \Psi_{b,1} \quad (2)$$

де  $\Psi_{a,1}$  - хвильова функція електрона 1 у полі ядра А,  
 $\Psi_{b,2}$  - хвильова функція електрона 2 у полі ядра В.

Наближене значення  $\Psi$  можна представити S – станом:

$$\Psi_a = \left(\frac{\alpha^3}{\pi}\right) \exp(-\alpha r_a) \quad (3)$$

$$\Psi_b = \left(\frac{\beta^3}{\pi}\right) \exp(-\beta r_b) \quad (4)$$

де  $r_a$  і  $r_b$  – радіуси атомів,

$$\beta = \sqrt{\frac{\theta_b}{\theta_n}} \alpha = \sqrt{\frac{\theta_\alpha}{\theta_n}} \quad (5)$$

де  $\Theta_a$  та  $\Theta_b$  – потенціали іонізації взаємодіючих атомів;  
 $\Theta_n$  – потенціал іонізації водню.

Енергія взаємодії системи по формулі (1) має вигляд:

$$E_{зв} = \frac{\int \Psi H / \Psi d\tau}{\int \Psi \cdot \Psi d\tau} \quad (6)$$

де  $H'$  – частина загального гамільтоніана, яка збуджує, ( $\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}'$ )  
 $H_0$  - енергію вихідних взаємодіючих систем, не враховується.

Вирішуючи рівняння (6) варіаційним методом застосованим Гомбашем для квантово-механічних розрахунків [13], маємо остаточно для симетричної хвильової функції:

$$E_{зв} = \frac{H_1 + H_2}{1 + S} \quad (7)$$

де - інтеграл перекриття, що характеризує ступінь перекриття атомних орбіт атомів, що взаємодіють;

$d\tau$  – елемент конфігураційного простору.

$$S = \int \int \Psi_{a,1} \Psi_{b,2} \Psi_{a,2} \Psi_{b,1} d\tau_1 d\tau_2 \quad (8)$$

На рис. 2 наведено розрахунки енергії зв'язку формула (7) залежно від співвідношення енергій електронів взаємодіючих силових центрів за різних відстаней між цими центрами за відомою методикою [12]. З графіків видно, що область переходу однакових рівнів енергії до різних рівнів відповідає залежно від між ядерної відстані R одиниці [13].

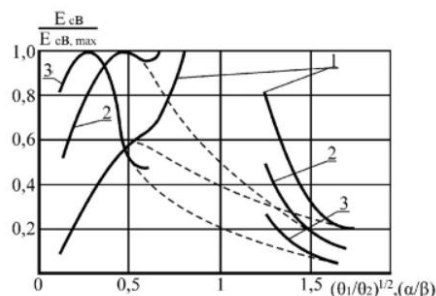


Рис. 2. Залежність енергії зв'язку двох силових центрів від співвідношення взаємодіючих рівнів енергії: 1 – R = 3 атомні одиниці; 2 – R = 4 атомні одиниці; 3 – R = 5 атомні одиниці

Однак енергія зв'язку (формула (7)) не враховує стан електронів, що беруть участь в обміні при взаємодії двох силових центрів.

При взаємодії різних металів, якщо їх хімічні потенціали не збігаються, на межі контакту утворюється подвійний електричний шар  $\Delta E$  (рис.3, а).

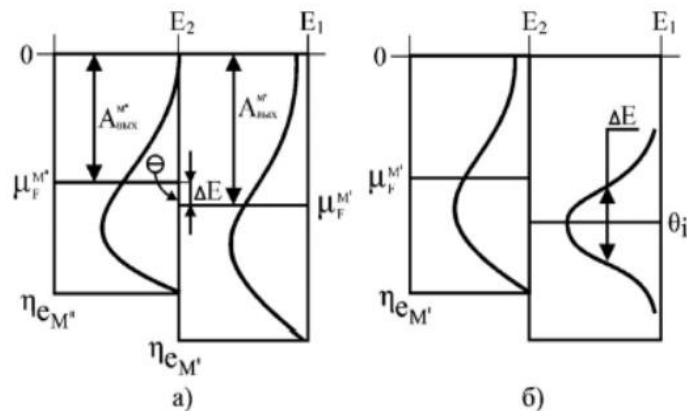


Рис. 3. Розподіл електронів за рівнями енергії при взаємодії: а – метал – метал; б – метал – атом

Система прагнути до мінімуму енергії, тобто до вирівнювання рівнів. Варіюючи параметрами  $\mu_F$ , знаходимо мінімальне значення  $E_{зв}$ , що реалізується в даному випадку. За нашим методом, що враховує різні енергетичні стани електронів на зовнішніх орбітах атомів, характер енергії зв'язку різко відрізняється, хоча тенденція зменшення  $E_{зв}$  при  $R \rightarrow \infty$  зберігається.

Розглядаючи взаємодію атом - метал із рівнем енергії атома  $\Theta_i$  на величину розширення  $\Delta E$ :

$$\Delta E = \frac{h\vartheta}{R} \cdot S \quad (9)$$

де  $\vartheta$  – швидкість електрона;  
 $S$  – інтеграл перекриття;  
 $R$  – міжядерна відстань 2-х силових центрів.

Швидкість знаходиться за формулою:

$$\vartheta = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}} \quad (10)$$

При контакті атомів, слід враховувати ковалентний та іонний зв'язки що мають дипольний момент, які характеризують електростатичну взаємодію. Визначення енергії взаємодії потрібно визначати враховуючи координатне число  $K$ , яке дорівнює кількості зв'язків між сусідніми атомами. При взаємодії металів з різними параметрами або типами кристалічної решітки відносна енергія адгезії (кількість бінарних взаємодій на одиницю площі) зменшується. У цьому випадку утворюються крайові дислокації, які зменшують загальну енергію зв'язку за рахунок зменшення координаційного числа чи утворення «вільних» зв'язків. Тому доцільно як матеріал покриття і основи вибирати метали з близькими за значеннями параметрами та типами кристалічних решіток. При розрахунках енергії адгезії на залізі приймали  $K = 4$ , що відповідає ОЦК гратами. Складено ряд енергоактивності взаємодії металів з залізною основою:

Ni, Fe, Co, W, Mo, Cu, Mn, V, Ti, Cr, Al, Mg

Самий міцний зв'язок(найвищу адгезію) покриття зі сталеву основою забезпечує нікель, як основа композиційного сплаву. Однак якщо основа має ОЦК - ґрати, то перевагу слід віддавати покриттю на основі заліза.

### Результати досліджень

Для нанесення плазмових покриттів на деталь зі сталі 45 використаний порошок ПР-Х4Г2Р4С2Ф, що самофлюсується, зі сплаву системи Fe-Cr-B-Si, економно легований Al, V, Mn, що дозволить йому працювати у слабокорозійних середовищах.

Дослідження міцності зчеплення плазмового покриття після лазерного оплавлення проводили з урахуванням визначення оптимальних параметрів лазерного випромінювання (час дії лазерного випромінювання на зону контакту покриття з основою, швидкість переміщення лазерного променя). Результати наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Міцність зчеплення плазмових покриттів, оплавлених лазерним випромінюванням

№ досвіду	Час дії лазерного випромінювання, с	Швидкість переміщення лазерного променя, мм/с	Міцність зчеплення, МПа
1	1,2	1,4	160
2	1,0	1,57	145
3	0,8	1,98	123
4	0,6	3,23	118
5	0,4	4,07	100
6	0,2	5,97	61

На основі проведеного аналізу літературних джерел встановлено, що варіювання режимами лазерної обробки дозволяє керувати розмірами ванни проплаву. При режимах з невеликою енерговкладом відбувається проплавлення покриття на всю глибину, що призводить до сколювання або розтріскування покриття внаслідок дії значних залишкових напружень, поява яких обумовлена високими швидкостями охолодження розплаву. При великих енергетичних вкладах (час дії лазерного випромінювання вище 2,0 с, швидкості переміщення променя -0,57...0,65 мм/с) відбувається проплавлення як покриття, так і основи, при значному перемішуванню матеріалів, що обумовлює зниження рівня фізико-механічних та експлуатаційних властивостей нанесеного покриття.

У роботі [15] зазначається, що лазерну обробку бажано вести на режимах, при яких проплавлення відсутнє. Але оскільки нестабільність параметрів технологічного процесу (товщина напиленого покриття, хімічна неоднорідність покриття, коефіцієнт поглинання) не дозволяють гарантовано витримати глибину проплаву рівну товщині покриття, тому режими необхідно підбирати так, щоб глибина проплаву на 6-7 % перевищувала товщину напиленого покриття. Дослідження процесу лазерного оплавлення плазмових покриттів показали, що у досвіді 5 досягнуто повне проплавлення, але не відбувається якісного зчеплення. Що обумовлено короткочасним впливом рідкого розплаву з основою, коли не відбуваються у повній мірі процеси дисоціації оксидних плівок, що виникають на основі та утворення металевого зв'язку між елементами покриття та основи. Часткове розкислення поверхні розділу покриття з основою, спостерігається при дії лазерного променя порядку 0,4-0,6 с, міцність зчеплення вже досить висока. Міцність зчеплення залишається на рівні напиленого покриття при зменшенні часу впливу, так як ступінь розкислення поверхні основи знижується. Міцність зчеплення при впливі лазерного випромінювання в інтервалі 0,6-1,0 сек різко зростає від 50 МПа до 160 МПа. Отримані значення адгезійної міцності

дають можливість визначити оптимальні режими лазерної обробки, при яких відбувається повне приварювання плазмового покриття до основи.

Дослідження проводилися при потужності лазерного випромінювання  $1,6 \times 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>. З отриманих даних видно, що залізне покриття має найбільшу виявлену в ході експерименту адгезійну міцність з основою при його оплавленні зі швидкістю переміщення променя не більше 1,57-1,98 мм/с. Дослідження проводилися при різних потужностях лазерного випромінювання, тому можна рекомендувати наступні режими лазерної обробки: 1)  $q = 1,1 \times 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>,  $v = 1,33-2,08$  мм/с; 2)  $q = 1,6 \times 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>,  $v = 1,67-2,08$  мм/с; 3)  $q = 2,1 \times 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>,  $v = 2,08-3,33$  мм/с.

Експериментально встановлено, що зменшення часу оплавлення (менше 0,75–0,6 с) призводить до зниження обмінної взаємодії між атомами покриття та основи, відповідно знижується адгезійна міцність.

Фактором, що лімітує міцність зчеплення покриття та основи плазмових покриттів зі сплавів, що самофлюсуються, на основі заліза, є розкислення окисних плівок між покриттям і основою та встановлення хімічних зв'язків. Час, необхідний для розкислення оксидів заліза при  $T = 1300-1500$  К, становить 0,75-0,9 с [16].

У процесі дослідження міцності зчеплення покриття та основи спостерігався адгезійний та адгезійно - когезійний характер розривів зразків (коли покриття відривалася повністю або частина його залишалася на штифті), при чому перший випадок відбувається при великих швидкостях проміню лазера. Руйнування покриття починалося з краю покриття, де є дефекти, тобто не забезпечен повний контакт з основою і більш концентруються напруження. Збільшення навантаження приводить до виникнення мікротріщин, які поступово розповсюджуються по всій поверхні контакту і утворюють значну тріщину, що призводить до руйнування.

Максимальне значення  $\sigma_{\text{сц}} = 180$  МПа (плазмових покриттів з лазерним оплавленням) спостерігалось при  $V = 0,8 \times 10^{-3}$  м/с (таблиця 2 зразок 1) - при мінімальній швидкості променю лазера. З підвищенням швидкості променю лазера до  $V = 5 \times 10^{-3}$  м/с міцність зчеплення знизилася до  $\sigma_{\text{сц}} = 100$  МПа (зразок 3), що пов'язано зі скороченням часу дії лазерного оплавлення. Мінімальне значення  $\sigma_{\text{сц}} = 51$  МПа – у плазмових покриттів без оплавлення лазером обумовлено через наявність пор та великої кількості окисних плівок.

Таблиця 2

Залежність міцності зчеплення покриття від швидкості лазерного проміню

№ зразка	Швидкість променю V, м/с	Діаметр променю лазера у місті дотику d, м	Коефіцієнт перекриття лазерних доріжок, К	Міцність зчеплення $\sigma_{\text{сц}}$ , МПа
Плазмове покриття з оплавленням лазером				
1	$0,8 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	0,8	180
2	$1,65 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	0,8	127
3	$5 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	0,8	100
4	Плазмове покриття без оплавлення			51

### Практичні рекомендації

1. Теоретично параметри адгезії визначені з урахуванням координатного числа, яке дорівнює кількості зв'язків між сусідніми атомами. Тому доцільно як матеріал покриття і основи вибирати метали з близькими за значеннями параметрами та типами кристалічних решіток, що обумовлює перевагу застосування покриття на основі заліза для залізної основи.

2. Теоретичні дослідження і експериментальні значення адгезійної міцності дають можливість визначити оптимальні режими лазерної обробки, при яких відбувається повне приварювання плазмового покриття до основи, в наслідку повної дисоціації оксидних плівок на підкладці: 1)  $q = 1,1 \times 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>,  $V = 0,8 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $d = 1 \cdot 10^{-3}$  м та коефіцієнта перекриття лазерних доріжок 0,9.

### Висновки

1. Надзвичайно важливою у виборі методу підвищення якості плазмових покриттів стала можливість управління фізико-механічними властивостями поверхневого шару з метою забезпечення необхідного підвищення експлуатаційних властивостей при оплавленні лазерним випромінюванням. Теоретично доведено, що адгезія покриття з основою визначається енергією зв'язку. У разі обміну окремих атомів і простих молекул - взаємодія, як показали розрахунки, грають домінуючу роль. В результаті обмінної взаємодії обох матеріалів виникає енергія, яка в основному і служить причиною виникнення сил притягнення покриття і основи.

2. Використання оплавлення лазерним променем дозволило отримати покриття з високим рівнем міцності зчеплення і як наслідок високими експлуатаційними властивостями. Встановлено, що для видалення оксидних плівок з поверхні контакту з метою підвищення міцності зчеплення покриття з основою час впливу оплавлення лазерним променем на плазмове покриття повинен бути не менше 0,75– 0,9 с (для залізної підкладки).

### Список використаних джерел

1. Борисов Ю.С. Современные достижения в области нанесения защитных и упрочняющих покрытий, *Порошковая металлургия*, Киев, 2013, № 7, с. 5-14.
2. Ключко О.Ю., Дерябкина Е.С. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. Частина друга: Технологія конструкційних матеріалів: курс лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навчання інженерних спеціальностей. - Х.: ДБТУ, 2025.-85 с.
3. A Perspective on Plasma Spray Technology / A. Vardelle // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. May 2015, Vol. 35, Issue 3, pp. 491–509.
4. Василенко Н. А. Перспективы применения локального упрочнения при изготовлении и восстановлении рабочих органов, *Техника АПК*, 2008, вип. 1, с. 29–31.
5. Дерябкина Е.С., Жежер М.Н. Влияние термической обработки на склонность к МКК сварных соединений низконикелевой коррозионностойкой стали с азотом, *Машинобудування*, Харків, УПА, 2012, вип.9, с.78-86.
6. Feldshtein E., Kardapolava M., Dyachenko O. On the effectiveness of multi-component laser modifying of Fe-based self-fluxing coating with hard particulates, *Int. J. Surface and Coatings Technology*, 2016, v.307, pp. 254–261.
7. Devojno O.G. On the formation features, microstructure and microhardness of single laser tracks, formed by laser cladding of a NiCrBSi self-fluxing alloy, *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, No 106, pp. 32–38.
8. Gnanamuthu D., Shankar V., Jacobs, R. Laser Heat Treatment of Iron-Base Alloys, *Proc. Applications of High PowerLasers*, Los Angeles, CA, SPIE, 1985, v. 5, № 12. pp. 56–72.
9. Петров С.В. Повышение качества плазменных покрытий, *Сварочное производство*, 2005, №5, с.48-50.
10. Бохан С.Г., Василенко А.Г., Гречихин Л.И. Расчет некоторых параметров физико-химических процессов образования и разрушения окисных пленок на подложке при газотермическом напылении, *Материалы конф. Теория и практика газотермического нанесения покрытий*, Дмитров, 2005, с. 66-71.

11. Назаренко П.В. Износостойкие газотермические покрытия из эвтектических сплавов, *Защитные покрытия в машиностроении*, К: ІЭС ім. Е.О. Патона, 1986, с. 39-41.
12. Рувінський М.А. Рівняння Шредінгера і фундаментальний квант дії  $h/2$ , *Фізика і хімія твердого тіла*, т. 9, № 3, 2008, с. 448-453.
13. Вакарчук І. О. Квантова механіка: підручник, 4-те вид. доп. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2012, 872 с.
14. Feldshtein E.E. Tribological Properties of Electrosparc-Deposited and Further Laser-Hardened Coatings, *Journal of Friction and Wear, Allerton Press, Inc.*, 2013, vol. 34, № 2, pp. 137–141.
15. Zhang, Gang, et al. Laser remelting of plasma-sprayed conventional and nanostructured coatings. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, Issues C, 2011, pp. 105–110. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.10.028
16. Chen, Liang-Yu, et al. A New Method for Evaluating the Bond Strength of Plasma-Sprayed NiCrBSi Coatings Manufactured via Hybrid Plasma Spray and In Situ Laser Remelting Process. *Metals*, Vol. 12, No. 2, 2022, Article 168. doi:10.3390/met12020168

### References

1. Borysov Yu.S. Suchasni dosiahnennia v oblasti nanesennia zakhysnykh ta uprochniuiuchykh pokryttiv (Modern achievements in the field of protective and strengthening coatings). *Powder Metallurgy*, Kyiv, 2013, No. 7, pp. 5–14. [in Ukrainian]
2. Klochko, O.Yu., Deriabkina, E.S. Materialoznavstvo ta tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv. Chastyna druha: Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv: kurs lektsii (Materials science and technology of structural materials. Part II: Technology of structural materials: lecture course). Kharkiv: SBTU, 2025, 85 p. [in Ukrainian]
3. Vardelle A. A Perspective on Plasma Spray Technology. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, May 2015, Vol. 35, Issue 3, pp. 491–509.
4. Vasylenko, N.A. Perspektyvy zastosuvannia lokalnoho uprochnennia pry vyhotovlenni ta vidnovlenni robochykh orhaniv (Prospects for the application of local strengthening in manufacturing and restoration of working elements). *Tekhnika APK*, 2008, Issue 1, pp. 29–31. [in Ukrainian]
5. Deriabkina, E.S., Zhezher, M.N. Vplyv termichnoi obrobky na skhylnist do MKK zvarnykh ziednan nyzkonikelevoyi koroziiinostiikoi stali z azotom (Effect of heat treatment on susceptibility to intergranular corrosion of welded joints of low-nickel nitrogen-alloyed corrosion-resistant steel). *Mashynobuduvannia*, Kharkiv, UIPA, 2012, Issue 9, pp. 78–86. [in Ukrainian]
6. Feldshtein, E., Kardapolava, M., Dyachenko, O. On the effectiveness of multi-component laser modifying of Fe-based self-fluxing coating with hard particulates. *Surface and Coatings Technology*, 2016, Vol. 307, pp. 254–261.
7. Devojno O.G. On the formation features, microstructure and microhardness of single laser tracks formed by laser cladding of a NiCrBSi self-fluxing alloy. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, No. 106, pp. 32–38.
8. Gnanamuthu D.S., Shankar V.S., Jacobs R.R. Laser Heat Treatment of Iron-Base Alloys. *Proceedings of Applications of High Power Lasers*, Los Angeles, CA, SPIE, 1985, Vol. 5, No. 12, pp. 56–72.
9. Petrov, S.V. Pidvyshchennia yakosti plazmovykh pokryttiv (Improving the quality of plasma coatings), *Svarochnoe proizvodstvo*, 2005, No. 5, pp. 48–50. [in Ukrainian]
10. Bokhan S.G., Vasylenko A.G., Hrechyhin L.I. Rozrakhunok deiakykh parametriv fizyko-khimichnykh protsesiv utvorennia ta ruinuvannia okysnykh plivok na pidlozhtsi pry hazotermichnomu napyleni (Calculation of certain parameters of physicochemical processes of formation and destruction of oxide films on the substrate during thermal spraying).

Proceedings of the conference Theory and Practice of Thermal Spraying of Coatings, Dmitrov, 2005, pp. 66–71. [in Ukrainian]

11. Nazarenko, P.V. Znosiostiiki hazotermichni pokryttia z evtektichnykh splaviv (Wear-resistant thermal spray coatings from eutectic alloys). Protective Coatings in Mechanical Engineering, Kyiv: E.O. Paton Electric Welding Institute, 1986, pp. 39–41. [in Ukrainian]

12. Ruvinskyi M.A. Rivniannia Shredinhera i fundamentalnyi kvant dii  $h/2$  (Schrödinger equation and the fundamental quantum of action  $h/2$ ). Physics and Chemistry of Solid State, Vol. 9, No. 3, 2008, pp. 448–453. [in Ukrainian]

13. Vakarchuk, I.O. Kvantova mekhanika: pidruchnyk (Quantum mechanics: textbook). 4th ed., Lviv: Ivan Franko National University of Lviv, 2012, 872 p. [in Ukrainian]

14. Feldshtein E.E. Tribological Properties of Electrosparc-Deposited and Further Laser-Hardened Coatings, Journal of Friction and Wear, Allerton Press, Inc., 2013, vol. 34, № 2, pp. 137–141.

15. Zhang, Gang, et al. Laser remelting of plasma-sprayed conventional and nanostructured coatings. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211, Issues C, 2011, pp. 105–110. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.10.028

16. Chen, Liang-Yu, et al. A New Method for Evaluating the Bond Strength of Plasma-Sprayed NiCrBSi Coatings Manufactured via Hybrid Plasma Spray and In Situ Laser Remelting Process. Metals, Vol. 12, No. 2, 2022, Article 168. doi:10.3390/met12020168