УДК 539.375.5:621.793.74 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.17

В. І. КОПИЛОВ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри зварювального виробництва
Інститут матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-1789-3226

В. В. ПЕТРЕНКО
аспірант кафедри зварювального виробництва
Інститут матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

І. А. СЄЛІВЕРСТОВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0009-6135-8165

АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЗАТРАТ ПРИ ФОРМУВАННІ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ І ПРИ РУЙНУВАННІ В УМОВАХ ДІЇ НАВАНТАЖЕНЬ

Для оцінки енергії адгезії взаємодіючих поверхонь при плазмовому напиленні порошкових матеріалів у системі «основа – плазмове покриття», запропоновані підходи перш за все, термодинамічний і електронно-статистичний. Був проведений аналіз поверхневих властивостей і оцінку процесів утворення міцних зв'язків і їх руйнування в умовах плазмового напилення із залученням розрахунково-експериментальних методів досліджень, отримані рішення, в загальному випадку, дозволили провести розрахунки значень енергії і сили адгезії, а також міцності зчеплення покриттів з основою.

Розраховані п значення роботи адгезії U_a на основі фізичної моделі, яка враховує такі параметри напилення, як швидкість газового потоку, швидкість і розмір частинок, враховує співвідношення геометричних параметрів напилюваних частинок і мікрорельєфу поверхневих шарів основного матеріалу, їх фізико-механічні властивості. від параметрів частинок напилюваного матеріалу

Представлена методика оцінки характеру руйнування та тріщиностійкості отриманих композитних матеріалів на базі розгляду енергетичного балансу системив момент виникнення тріщини. Метою досліджень в цьому напрямку є визначення коефіцієнтів тріщиностійкості K_{1c}, інтенсивності вивільненої енергії G_{1c} при розгляді балансу енергій у момент виникнення тріщини у різних ділянках системи основа-покриття. Шляхом введення до розрахунку критеріальних залежностей надається можливість прогнозування характеру руйнування системи на основі співвідношень коефіцієнтів тріщиностійкості K_{1c} та деяких безрозмірних параметрів, що описують в сукупності розтріскування, відшарування, а також деформаційні процеси.

Досліджені покриття в роботі показали високі значення в'язкості руйнування (G_{1c} та K_{1c}). Встановлено, що системи з ультрадисперсними наночастинками відзначаються підвищеною тріщиностійкістю. Наночастинки в багатофазному покритті сприяють утворенню міцних когезійних і адгезійних зв'язків як у самому покритті, так і в міжфазній області.

Ключові слова: *плазмове напилення, адгезія, енергетичний баланс, руйнування, тріщиностійкість.*

© Копилов В. І., Петренко В. В., Сєліверстов І. А., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

V. I. KOPYLOV
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Welding Production
E. O. Paton Institute of Materials Science and Welding
of National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-1789-3226

V. V. PETRENKO
Postgraduate Student at the Department of Welding Production
E. O. Paton Institute of Materials Science and Welding
of National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

I. A. SIELIVERSTOV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation,
Robotics, and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0009-6135-8165

ANALYSIS OF ENERGY COSTS IN THE FORMATION OF PLASMA COATINGS AND IN DESTRUCTION UNDER LOAD CONDITIONS

To evaluate the adhesion energy of interacting surfaces during plasma spraying of powder materials in the 'base – plasma coating' system, the proposed approaches are primarily thermodynamic and electron-statistical. An analysis of surface properties and an assessment of the processes of formation of strong bonds and their destruction under plasma spraying conditions were carried out using computational and experimental research methods. The solutions obtained, in general, made it possible to calculate the values of adhesion energy and force, as well as the strength of the bond between the coatings and the base.

The calculated values of adhesion work U_a were calculated based on a physical model that takes into account such sputtering parameters as gas flow velocity, particle velocity and size, the ratio of the geometric parameters of the sputtered particles and the micro-relief of the surface layers of the base material, and their physical and mechanical properties. from the parameters of the sprayed material particles

The presented methodology for assessing the nature of destruction and crack resistance of the obtained composite materials is based on consideration of the energy balance of the system at the moment of crack initiation. The aim of research in this area is to determine the crack resistance coefficients K_{1c} and the intensity of released energy G_{1c} when considering the energy balance at the moment of crack formation in different areas of the base-coating system. By introducing criterion dependencies into the calculation, it is possible to predict the nature of system failure based on the ratios of crack resistance coefficients K_{1c} and certain dimensionless parameters that collectively describe cracking, delamination, and deformation processes.

The coatings studied in the work showed high values of fracture toughness (G_{1c} and K_{1c}). It has been established that systems with ultradisperse nanoparticles are characterised by increased crack resistance. Nanoparticles in a multiphase coating contribute to the formation of strong cohesive and adhesive bonds both in the coating itself and in the interphase region.

Key words: *plasma spraying, adhesion, energy balance, destruction, crack resistance.*

Постановка проблеми

Питання вдосконалення технології створення високоміцних та високотемпературних багатофазових плазмових покриттів на основі сумішей керамічних та металевих матеріалів, в тому числі і наноматеріалів, відносяться до основних напрямів розвитку сучасного матеріалознавства [1–3]. Подальше напилення подібної порошкової суміші приводить до утворення структур покриттів з нанорозмірними складовими, певним чином розподілених по об'єму, що забезпечує набуття нових властивостей композицій для роботи в умовах дії температурих полів, напруги, агресивних газових і рідких середовищ [1, 4]. Внаслідок процесів, що при цьому протікають, формується система «основа – покриття», фізико-механічні характеристики якої, насамперед, когезійна і адгезійна міцність, модуль пружності визначаються структурою, фазовим і хімічним складом отриманого покриття, що є багатошаровою композицією у вигляді хаотично розподілених і пов'язаних між собою розплюснутих частинок – ламелів [5–7].

Розроблюються підходи до конструювання структури матеріалу покриттів, коли приходиться враховувати наявність тріщин, що виникають при нанесенні покриттів, та, що розвиваються при експлуатації композиційного матеріалу. Формування структури крихкого порошкового матеріалу, у тому числі напиленого покриття, необхідно розглядати з позиції гальмування розвитку тріщини, тобто приходиться враховувати той факт, що вона повинна бути такою, щоб забезпечити високу напругу старту тріщини та утруднити подальше поширення. Важливим

параметром, що визначає експлуатаційні властивості композитного матеріалу, характер руйнування є його тріщиностійкість (в'язкість руйнування) та інтенсивність вивільненої при цьому енергії [4, 8].

В свою чергу процеси, що супроводжують встановлення міцних зв'язків при формуванні покриттів, а також і при їх руйнуванні, залежатимуть від напруженого і енергетичного стану отриманої композиції. Як при утворенні з'єднання, так і при руйнуванні покриттів відбувається зміна вільної поверхні та поверхневої енергії контактної системи «основа – покриття». Створюється активований стан у певному об'ємі утвореної композиції, що оцінюється, в тому числі, відповідними енергетичними витратами. З однієї сторони, утворення з'єднання є результатом контактування поверхонь за певних умов та параметрів (навантаження, температура, час). При цьому відбувається зменшення вільної поверхні та поверхневої енергії контактної системи. З іншого боку, процес руйнування є розділенням матеріалу, в нашому випадку системи «основа – покриття», на частини, що призводить до збільшення вільної поверхні і поверхневої енергії композиції. Назагал, можна констатувати, що формування і руйнування покриттів можна зіставити з точки зору енергетичних затрат на ці обидва процеси.

Функціональні властивості покриттів, що утворюються, в процесі напилення і подальшої термообробки залежатимуть не тільки від сформованої структури, фазового і хімічного складу даного покриття, але також і від стану контактної зони, її міжфазної міцності. Процеси, що протікають безпосередньо при ударі частинок о поверхню, зумовлюють формування певної площі контакту [8–10], і відповідний цій площі рівень міцності зчеплення, а також фізико-механічні характеристики системи «основа – покриття», в тому числі такої важливої характеристики покриття, як його тріщиностійкість. Адгезійні та міцнісні властивості є найбільш важливими характеристиками покриття, а також міжфазної контактної зони, і вони визначаються, перш за все, параметрами частинок, що напилюються.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи було опробування методики оцінки адгезійно-когезійних властивостей системи «основа – плазмове покриття», а також оцінки характеру руйнування та тріщиностійкості багатофазного плазмового покриття за умов випробування композиції на вигин на базі розгляду енергетичного балансу в момент виникнення тріщини, розтріскування та відшарування.

Викладення основного матеріалу дослідження

У роботі проводився аналіз тріщиностійкості та характеру руйнування матеріалів із плазмовими багатофазними покриттями різного складу та структури на основі сумішей порошкових матеріалів [1, 11]. Для визначення фізико-механічних характеристик, в тому числі, тріщиностійкості, на розтяг і згин системи «основа-покриття» запропоновані, як розрахункові, так і експериментальні методи досліджень [1, 2, 4].

Адгезійні властивості плазмових покриттів

Аналіз поверхневих властивостей і оцінка процесів утворення міцних зв'язків і їх руйнування в умовах плазмового напилення здійснюється із залученням розрахунково-експериментальних методів досліджень, і, як правило, ведеться у двох напрямках, заснованих або на термодинамічних рішеннях, або на розрахунках електронного розподілу поблизу поверхні та розрахунку на цій основі поверхневої енергії [12–14]. Простіші рішення для оцінки адгезійних характеристик отримані при використанні термодинамічних підходів [10, 13].

В результаті взаємодії двох компонентів (А і В), що контактують при ударній взаємодії, виникає адгезія покриття до твердого тіла, термодинамічною мірою якої є питома робота адгезії [1, 12]

$$W_{ad} = \sigma_A + \sigma_B - E_{мжф}, \tag{1}$$

де σ_A, σ_B – поверхневі енергії розділених контактуючих тіл (металів); $E_{мхф}$ – міжфазна поверхнева енергія, рівна роботі утворення одиниці поверхні розділу при контакті тіл.

Поверхнева міжфазна енергія, яка є наслідком протікання термодинамічної реакції і створення нової системи, згідно підходам В.Н. Єрьоменка і Ю.В. Найдіча запишеться у вигляді [12, 13]

$$E_{мжф} = \sigma_{Me'O} + \sigma_{Me'} + \Delta Z, \tag{2}$$

де $W_{ad} = -\Delta Z$ величина повної роботи реакції є роботою адгезії.

За значеннями роботи адгезії в подальшому можна оцінити міцність зчеплення покриття з основою.

Найбільш точне рішення для оцінки міжфазної енергії (адгезійних властивостей) двох тіл, розділених зазором, можна отримати на основі електронно-статистичної теорії із залученням квантовомеханічних методів (метод функціоналу щільності – МФЩ).

Проте, для багатьох систем металів, коли йдеться, у тому числі, про напилення кераміки, основні труднощі при знаходженні міцності зчеплення покриття з використанням електронно-статистичного підходу і методу функціонала щільності обумовлені труднощами визначення в рівнянні (2) міжфазної енергії $E_{мжф}(D)$. Енергія (робота) адгезії системи двох металів, розділених проміжком D, є надлишковою частиною поверхневої енергії цієї системи при видаленні тіл в нескінченність, і дорівнює роботі, яку необхідно витратити при збільшенні відстані між поверхнями від D до ∞ [1]. Для системи покриття - матриця межу розділу представимо у вигляді контакту двох поверхонь, що характеризуються нерівностями у вигляді сходинок дислокацій з кутом орієнтації

щодо геометричної площини розділу α, середньою висотою h_α і довжиною L_α. З урахуванням того, що взаємодія фаз відбувається на окремих ділянках – активних центрах, структуру границі контакту описуватимемо функцією розподілу $\Phi(\alpha)$, причому кількість активних центрів, орієнтованих у сегменті α, α + $d\alpha$ відповідно дорівнює $\Phi(\alpha)$ $d\alpha$ [1, 12]. Енергію адгезії для одного активного центра можна представити у вигляді рівняння:

$$E_{ad}(D, \alpha) = E_{AB}(+\infty) - E_{межф}(D, \alpha). \quad (3)$$

У рівнянні (3) перший доданок $E_{AB}(+\infty) = (\sigma_A + \sigma_B)h_\alpha L_\alpha$ – енергія вільних, не взаємодіючих поверхонь, орієнтованих під кутом α і нескінченно віддалених металів в області одного активного центру. Другий доданок є енергією системи основа-покриття, що має у вихідному стані зазор D_0, яка еквівалентна енергії видалення покриття від основи шляхом зсуву в площині одного центру і зміщення уздовж нормалі до нього [1, 12]. Якщо розглядати видалення покриття від основи вздовж осі як зсув в площині одного активного центру і зміщення уздовж нормалі до нього, то енергія системи основа - покриття, що має у вихідному стані зазор D_0, дорівнює

$$E_{\alpha d}(D) = E_{AB}(+\infty)L_\alpha[h_\alpha - (h_\alpha - D\sin\alpha)] \cdot \theta(x) + \sigma_{межф}(d)L_\alpha(h_\alpha - D\sin\alpha)\theta(x). \quad (4)$$

У виразі (4) $\sigma_{межф}(d)$ є міжфазна енергія одиниці площі границі розділу, що визначається за методом функціоналу щільності, який полягає у вирішенні варіаційної задачі про знаходження мінімуму енергії вільних електронів у полі зовнішнього потенціалу. При цьому взаємодіючі фази розташовуються на відстані $d = D_0 + D\cos\alpha$; D_0 – відповідає мінімуму вільної енергії. У рівнянні (4) $\theta(x) = 0$ при $x < 0$, та $\theta(x) = 1$ при $x > 0$, ($x = h_\alpha - D\sin\alpha$) – ступінчаста функція Хевісайда [1, 15]. Повна енергія адгезії усієї зони контакту залежно від величини зазору між контактуючими металами, з врахуванням функції розподілу $\Phi(\alpha)$ і параметрів активних центрів, які визначаються структурою поверхонь, обумовленою фізико-хімічними процесами при плазмовому напиленні, описується виразом:

$$E_{ad}(D) = h_0 L \int_0^{\pi/2} \left[\sigma_A + \sigma_B - \sigma_{AB}\left(D\cos\alpha + D_0\right)\right]\cos\alpha\left(1 - \frac{D}{h_0}\sin\alpha\right)\theta\left(1 - \frac{D\sin\alpha}{h_0}\right)d\alpha. \quad (5)$$

Визначивши міжфазну енергію, надалі за рівнянням (5) розраховується енергія адгезії. Знаючи енергію адгезії, як функцію відстані між контактуючими поверхнями, можна визначити їх силу взаємодії у вигляді:

$$P_{ad}(D) = -\partial E_{ad}(D) / \partial D. \quad (6)$$

Вирішуючи рівняння (6) отримаємо вираз для питомої міцності зчеплення по фізичній площі контакту S_d у вигляді

$$\sigma_{зч} = P_{ad}(D) / S_d, \quad E_{ad} = \int_0^D P_{ad}(D)dD \approx P(D)_{\max} D, \quad (7)$$

де S_d – фактична площа контакту; E_{ad}, P_{ad} – робота і сила адгезії покриттів з розрахунку на одиницю площі контакту між покриттям і твердим тілом; D – відстань дії міжатомних зв'язків (зазор між контактуючими поверхнями).

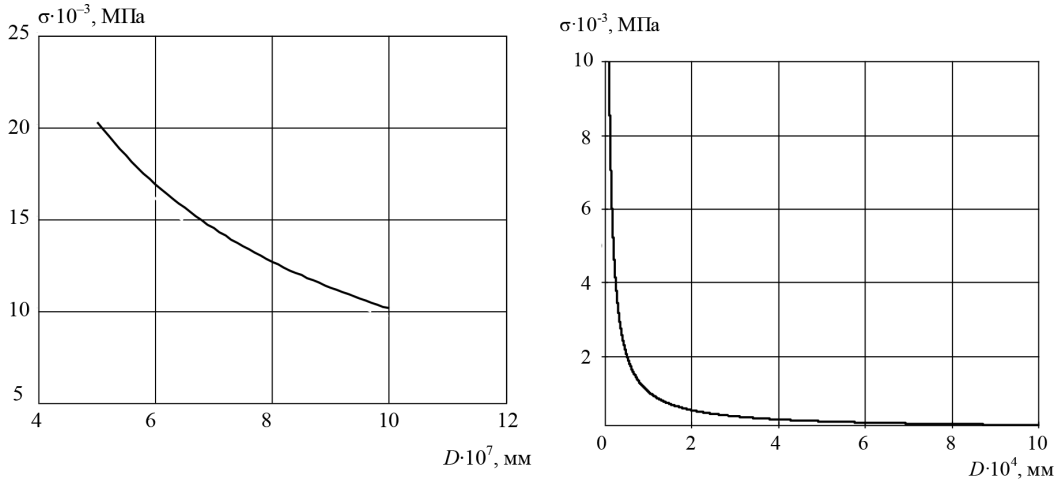
Отримані рішення, в загальному випадку, дозволяють провести розрахунки значень енергії і сили адгезії, а також міцності зчеплення покриттів з основою стосовно плазмового напилення. На рис. 1 приведені розрахунки міцності зчеплення залежно від дистанції зближення (D) двох контактуючих поверхонь на прикладі системи Fe (основа) – Mo (покриття) при плазмовому напиленні, при температурі в контакті T = 1400 K [1, 13].

На рис. 2 представлені результати розрахунків роботи (енергії) адгезії з врахуванням температури в контакті стосовно конкретних систем (основа – покриття).

Роль фізичної площі контакту при плазмовому напиленні у встановленні міжфазної міцності

У загальній постановці можна вважати, що процес утворення з'єднання при ударній взаємодії частинок покриття пов'язаний з розривом або дисоціацією хімічних зв'язків атомів поверхні твердого тіла, коли здійснюється перегрупування атомів твердого тіла і встановлюється енергетично найбільш вигідний далекий і ближній порядок. В процесі високотемпературної і високошвидкісної ударної взаємодії здійснюється термо-деформаційна активація і перехід групи атомів в активований стан за рахунок внутрішньої енергії коливань атомів в твердому тілі. Міцні зв'язкі реалізуються і локалізуються на поверхні площиною ($F_ф$), в місцях з найбільшою енергією. Площа фізичного контакту ($F_ф$), по якій можна розрахувати міцність зчеплення всього покриття і основи, оцінена на підставі моделі ударної взаємодії частинок напилюваного матеріалу з поверхнею твердого тіла [1, 10]. Фізична модель враховує такі параметри напилення, як швидкість газового потоку, швидкість і розмір частинок, враховує співвідношення геометричних параметрів напилюваних частинок і мікрорельєфу поверхневих шарів основного матеріалу, їх фізико-механічні властивості. За площею контакту $F_ф$, енергією одиничного зв'язку між атомами E_a і числом атомних зв'язків на цій площі N_a можна розрахувати роботу адгезії, і, відповідно, міцність зчеплення покриття до основи [1, 13]:

$$U_a = E_a N_0 \overline{F}_\Phi \left\{1 - \exp\left[-\nu\left(t - t_0\right)\exp\left(-\frac{U_{ac}}{kT_K}\right)\right]\right\}, \quad (8)$$



(а) (б)

Рис. 1. Зміна міцності зчеплення плазмового покриття з основою в залежності від дистанції зближення взаємодіючих поверхонь в умовах ідеального (а) та звичайного (б) контактів (на прикладі молібденових частинок)

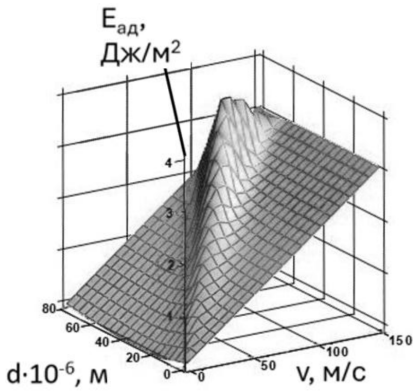


Рис. 2. Значення енергії адгезії залежно від швидкості та діаметра молібденових частинок в контакті для системи плазмове покриття – основа

де $\overline{F}_{\Phi} = F_{\phi}/F_{H}$ відносна площа фізичного контакту, відношення фізичної (фактичної) площі до номінальної (максимальної) площі.

На рис. 3 приведені значення роботи адгезії U_a від параметрів частинок напилюваного матеріалу [1, 9].

На рис. 3 крива 1 (верхня) відноситься до молібденових частинок, що знаходяться в розплавленому (передплавильному) стані, а крива 2 (нижча) – відповідно до частинок у пластичному стані, тобто при нижчих температурах,

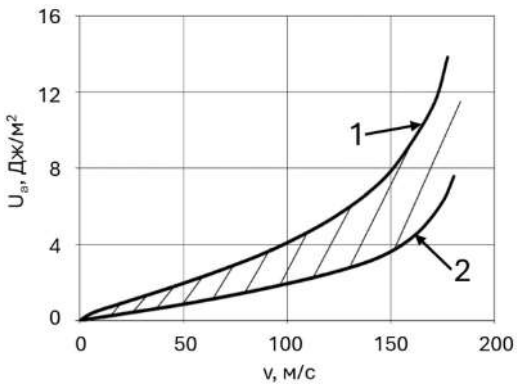


Рис. 3. Зміна роботи адгезії U_a залежно від швидкості частинок; зашрихована зона характеризує ступінь пластичності

інакше кажучи заштрихована область характеризує ступінь пластичності матеріалу покриття. Розрахунки проведені для відповідних значень енергії зв'язку атомів в основі E_a = 414 кДж/моль і значення енергії активації процесу утворення з'єднання $U_{ac} \approx$ 160кДж/моль, знайдених в рамках кінетичної теорії міцності твердих тіл. У момент схоплювання частинок з основою відбувається локальне підвищення активності поверхні твердого тіла під впливом ударного тиску частинок, а також навантаження міжатомних зв'язків та зниження активаційного бар'єру. Далі здійснюється теплова активація, тобто перехід групи атомів до активованого стану за рахунок внутрішньої енергії коливань атомів у твердому тілі.

Формування контакту безпосередньо між частинками, що напилюються (когезійна міцність), і між частинками і основою (міжфазна міцність)

В умовах нанесення покриття, а також впливу зовнішніх факторів можливе зародження та розповсюдження тріщин, що супроводжується розтріскуванням або відшаруванням покриття. При цьому механізм і характер такого руйнування залежать від умов розвитку мікротріщин по межах між зернами (частинками), як усередині самого покриття, так і на межі покриття з основою [1, 8, 12]. Поверхневі фізичні процеси, що протікають, як при створенні з'єднання, так і при його руйнування, внаслідок дефектності кристалічної структури, енергетичної неоднорідності поверхні твердого тіла приводять до ситуації, коли хімічна взаємодія відбувається та локалізується у місцях з найбільшою енергією. Саме в цих зонах виникають осередки схоплювання та процес з'єднання виявляється дискретним. Така міжфазна зона у вигляді дискретного контакту покриття з поверхнею твердого тіла при випробуванні на розрив може бути представлена моделлю матеріалу, ослабленого тріщинами в його об'ємі [1, 4].

Згідно з моделлю, з однієї сторони, розглядається дискретний контакт плазмового покриття з основою, який подається у вигляді окремих плям контакту ламелів (диаметром d) з поверхнею основи. З іншої сторони, така модель стосується також контакту частинок покриття між собою. В цих обох випадках для руйнування окремої плями контакту між частинками, а також між частинкою та основою необхідне навантаження оцінюється виразом [1, 4, 7]:

$$p = d\sqrt{d}K_{1C}(1 - f(z)); \quad K_{1C} = \sqrt{\frac{2\pi E\gamma_{еф}}{(1-\nu^2)}}. \tag{9}$$

У рівнянні (9) функція $f(z) = 0{,}339z^2 + 0{,}136z^5$, у нашому випадку $f(z) \ll 1$; $\gamma_{еф}$ – питома (ефективна) робота руйнування; E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона; h – відстань між плямами контакту радіуса a; $z = 2a/h$; K_{1c} – коефіцієнт інтенсивності напруги.

Визначивши площу фактичного контакту покриття з основою і необхідне навантаження для його руйнування p, можна оцінити міцність зчеплення покриття з основою. У процесі формування багатошарового плазмового покриття міцний зв'язок реалізується не на всій площі фізичного контакту $f_ф$ між атомами деформованих частинок, а тільки на деякій її частині f_d, що складається з певної кількості активних центрів. Остаточний вираз для навантаження, необхідного для руйнування окремої плями контакту набуде вигляду:

$$p = d \cdot \sqrt{\pi \cdot d \cdot (1-\nu^2)^{-1} \cdot \overline{f}_{\Phi}^{d} \cdot E \cdot \gamma_{мф}}. \tag{10}$$

На рис. 4 представлена залежність розривного навантаження p від відносної площі при руйнуванні одиночного контакту $\overline{f}_{\phi}^{d} = F_{\phi}/F_{н} = f_d/f_{\phi}$ частинок металевого термоактиваційного порошку NiAl, його суміші із порошком аеросилом ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$), а також суміші металевого порошку NiCr із аеросилом ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$). Аеросил ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) це нанопорошковий матеріал, отриманий за спеціальною технологією [1, 12].

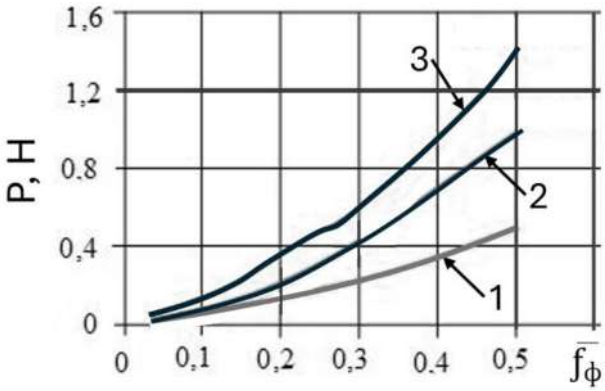


Рис. 4. Залежність зусилля, необхідного для руйнування одиничної плями контакту від відносної площі контакту двох частинок (ламелей) з порошку: 1 – NiAl; 2 – NiAl – ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$); 3 – NiCr – ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$)

Моделювання руйнування покриття та міжфазної зони

Нанесення покриття в більшості випадків спрямоване на зміцнення композиційного матеріалу, але, в той же час, процес напилення пов'язаний з підвищенням дефектності поверхневих шарів, і може також призвести до руйнування.

Характеристикою опору руйнування матеріалів служить коефіцієнт інтенсивності напруги K_{1c}, пов'язаний в свою чергу з роботою, яку необхідно виконати для ініціювання поширення тріщини G_{1c}, інтенсивності вивільненої енергії. Поряд з критичними параметрами K_{1c} і G_{1c} ініціювання тріщин визначається інтегральною характеристикою – питомою ефективною роботою руйнування $\gamma_{еф}$, за допомогою якої можна регулювати кінетику руйнування. За цих умов діють основні залежності [1, 7, 8, 14]:

$$K_{1C} = \sqrt{\frac{2\pi E \gamma_{эф}}{(1-\nu^2)}}, \quad G_{1C} = \frac{(1-\nu^2)K_{1C}}{E}, \quad K_{1C} = \lambda\left(G_{1C}E\right)^{1/2}, \quad G_{1C} = 2\gamma_{1c}, \tag{11}$$

де ν – коефіцієнт Пуассона; E – модуль пружності; λ – постійна, яка залежить від коефіцієнта Пуассона.

При розрахунку енергії, запасеної в системі «основа-покриття» ΔU, в момент виникнення тріщини в покритті враховується робота, виконана прикладеною силою, робота розсіювання, пов'язане з пластичною деформацією поверхневих шарів основи, зміна міжфазної енергії та енергія деформації, яка звільняється при розвитку тріщини [1, 8, 14]:

$$\Delta U = \Phi(\Delta W, \Delta W_d, \Delta U_s, \Delta U_e. \tag{12}$$

Метою досліджень в цьому напрямку є визначення коефіцієнтів тріщиностійкості K_{1c}, інтенсивності вивільненої енергії G_{1c} при розгляді балансу енергій у момент виникнення тріщини у різних ділянках системи основа-покриття. Шляхом введення до розрахунку критеріальних залежностей надається можливість прогнозування характеру руйнування системи на основі співвідношень коефіцієнтів тріщиностійкості K_{1c} та деяких безрозмірних параметрів, що описують в сукупності розтріскування, відшарування, а також деформаційні процеси, які проходять при цьому Інтенсивність вивільненої енергії системи при розтріскуванні дорівнює відношенню витраченої на цей процес енергії до товщини покриття [1, 8, 14]:

$$G = \Delta U/h = G = -\frac{\sigma^2 h}{E_n}\left[\frac{\sigma}{3\tau} + \pi F\left(\Sigma\right)\right]. \tag{13}$$

У рівнянні (13) σ – сумарна напруга в покритті (з врахуванням залишкової); $F(\Sigma)$ – табульована функція, залежна від відношення модулів пружності покриття та основи $\Sigma = E_n/E_o$; h – товщина покриття.

Результати розрахунків, згідно рівнянню (12), представлені на рис. 5, де показано розподіл складових енергії системи «сталь 20 – суміш ZrO_2-NiCr», залежно від прикладеної напруги,

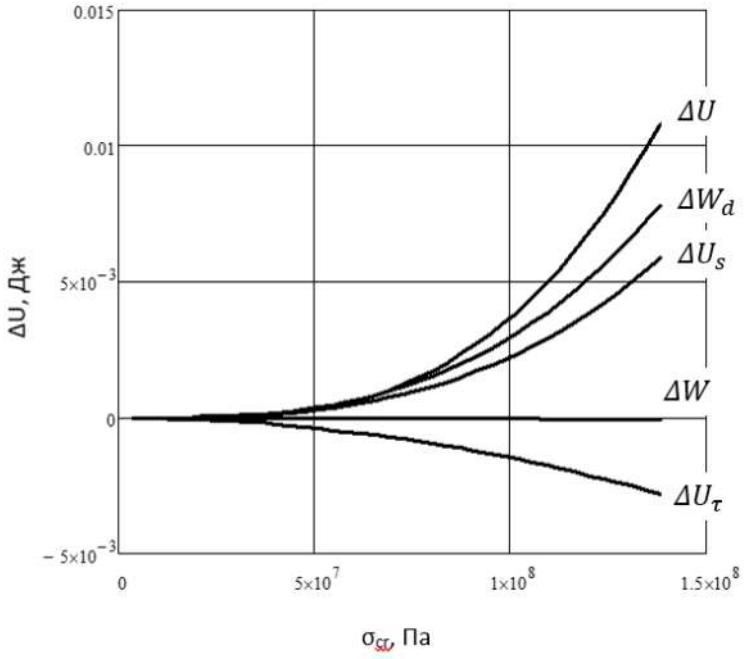


Рис. 5. Енергетичний баланс, згідно рівнянню (12), у системі «основа – покриття», залежно від прикладеної напруги, покриття (ZrO_2-NiCr)

При розгляді фізичної моделі взаємодії і фактичної площі контакту необхідно враховувати основні параметри і фізико-механічні характеристики, як елементів покриття (швидкість і дисперсність частинок), так і поверхневих шарів, такі як структуру, дислокаційну будову, параметри грат, температуру в контакті, міцність міжатомних зв'язків. що у свою чергу впливає на адгезійні і когезійні властивості покриття.

Для міжфазної тріщини (відшарування) отримуємо рішення:

$$K_{1C} = \left[\left(\overline{F}_{\phi}\right)^2 \frac{(\sigma_b^{осн})^2 \cdot d(1-\nu^2)}{8\pi} \sigma_n \right]^{1/2} \text{ та } \gamma_{мф} = (\overline{F}_{\phi})^2 \frac{(\sigma_в^{осн})^2 \cdot d}{E_o} \left(\frac{1-\nu^2}{16\pi} \right). \quad (14)$$

На рис. 6 представлена функціональна залежність різних параметрів (швидкість, дисперсність частинок, площа фізичного контакту), що характеризують процес напилення покриття, з одного боку, і адгезійно-когезійні властивості ($\Delta G_{мф}$, ΔG_n) при навантаженні композиційного матеріалу до моменту руйнування покриття, з іншого боку.

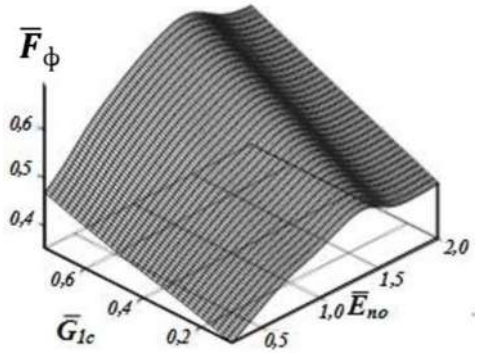


Рис. 6. Співвідношення інтенсивності вивільненої енергії при утворенні міжфазної тріщини та при розтріскуванні покриття $\overline{G}_{1c} = \Delta G_{мф} / \Delta G_n$ залежно від відносної площі контакту $\overline{F}_{\phi}$ та відношення модулів пружності покриття/основа $\overline{E}_{по}$

На рис. 7 представлені результати розрахунків енергетичних параметрів систем (G та U) від параметрів напилення і властивостей сформованого покриття.

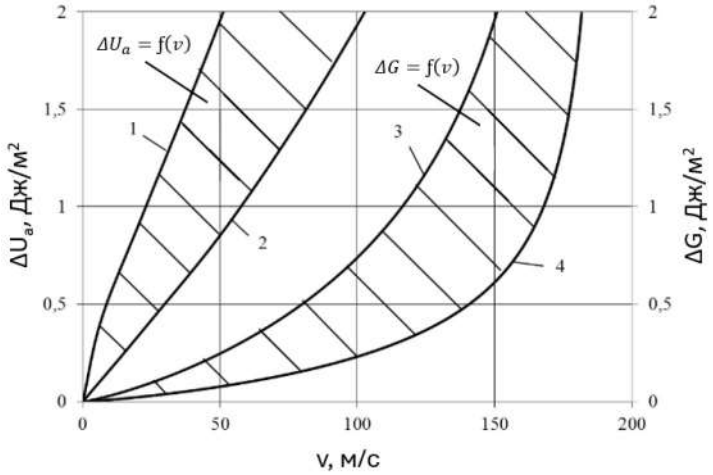


Рис. 7. Енергетичні характеристики системи «основа – покриття» в залежності від параметрів напилення: залежність роботи адгезії ΔU_a (заштрихована зона між кривими 1–2) і залежність вивільненої енергії при руйнуванні міжфазної зони ΔG (область між кривими 3–4) від швидкості частинок v

Маючи у своєму розпорядженні теоретичні або експериментальні дані про швидкість і діаметр частинок, що напиляються, відносної площі фізичного контакту або міцності зчеплення таких частинок (ламелів, сплетів) до основи, можна оцінити тріщиностійкість даного покриття. Під впливом навантаження для покриттів різного складу характерний різний режим руйнування – адгезійне чи когезійне. У деяких випадках когезійна руйнація може супроводжуватися розривом адгезійних зв'язків. Результати обробки експериментальних даних за рівнянням (14) представлені на рис. 8 та рис. 9.

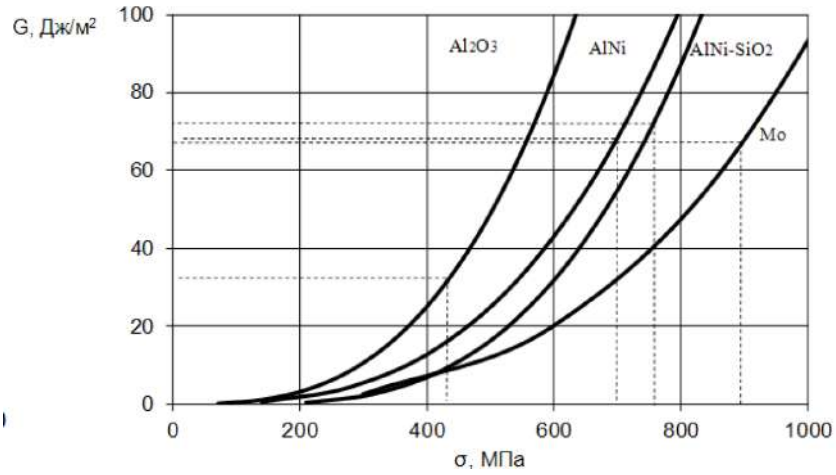


Рис. 8. Залежність вивільненої енергії в момент виникнення тріщини для різних систем покриттів від напруги в покритті

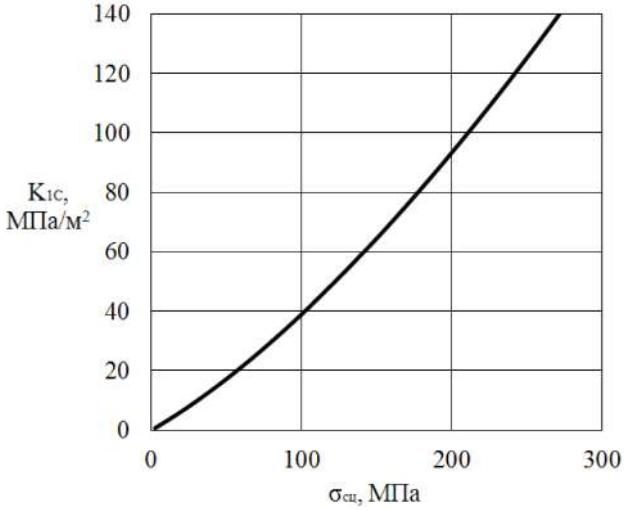


Рис. 9. Залежність тріщиностійкості та міцності зчеплення плазмових покриттів

На рис. 8 штриховими лініями показані критичні значення параметрів, а на рис. 9 продемонстровано взаємозв'язок міцності зчеплення від коефіцієнта тріщиностійкості, яка пов'язує когезійні та адгезійні властивості напилених покриттів.

Таблиця 1

Параметри тріщиностійкості та напружень в покритті в системі «основа – покриття» за випробуваннями на згин для плазмових покриттів

№	Матеріал суміші для покриттів	σ_{cr}, ИПа	G, Дж/м²	K_{1c}, МПа · м$^{1/2}$
1	Mo	136	100,28	3,32
2	NiAl	236	263,94	6,44
3	Al_2O_3	46	16,6	1,2
4	NiAl-Al_2O_3	80	42,36	1,84
5	NiAl-Alal	436	985,01	12,42
6	NiCr-Alal	536	2029,00	18,93
7	NiCr-ZrO_2, (1:1) без штучної тріщини	86,32	505	2,51
8	NiCr-ZrO_2, (1:1), із однією трішиною	74,93	357	2,11
9	NiCr-ZrO_2 (1:1), з двома трішинами	59,19	202	1,59
10	NiAl-ZrO_2 (1:1)	69,40	336	2,09

Примітка: Alal – це нанопорошковий матеріал складу $Al_2O_3 \cdot SiO_2$

В умовах багатофазної структури плазмового покриття характер зародження та розвитку мікротріщин обумовлюється нерівноважним станом границь між окремими розплющеними частинками, рівнем їх взаємодії в зоні контакту, співвідношенням модулів пружності різних кристалітів у покритті.

Отримані експериментально-теоретичні дані дають можливість описати взаємозв'язок параметрів напилення з характеристиками тріщиностійкості системи (K_{1c}, ΔG). Зі збільшенням щільності покриття та з наближенням його модуля пружності до пружних характеристик основного матеріалу збільшується стійкість до руйнування.

Розрахунково-експериментальні дані для низки покриттів та систем в результаті випробувань на вигин, у тому числі і за наявності штучно наведених тріщин, концентраторів напруги, (що робиться для порівняння), представлені у таблиці 1.

Висновки

Досліджені в роботі покриття продемонстрували досить високі показники в'язкості руйнування (G_{1c} і K_{1c}). З отриманих даних випливає, що системи з ультрадисперсними складовими мають більш високі показники тріщиностійкості. Дані результати пояснюються наявністю у порошкової суміші дисперсної наноскладової у вигляді аеросилу (SiO_2) при відповідній технології плазмового напилення. Наявність наноскладових у багатофазному покритті сприяє формуванню міцних когезійних та адгезійних зв'язків усередині покриття та міжфазній зоні.

Список використаної літератури

1. Копилов В. І., Смирнов І. В., Сєліверстов І. А. Формування та властивості плазмових багатофазних покриттів із нанорозмірними складовими : монографія. Київ : Наукова думка, 2019. 480 с.

2. Kopylov V. I. Effect of multiphase structure of plasma coatings on their elastic and strength properties. *Eastern-Eurohean Journal of Enterprise Technologies*. 2016. №5/5 (83). P. 49–57. DOI:10.15587/1729-4061.2016.79586

3. Розов Ю. Г., Сєліверстов І. А., Сошко В. О. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів : навч. посіб. Херсон : Олді-плюс, 2010. 338 с.

4. Фізико-хімічна механіка матеріалів / за ред. В. В. Панасюка. Львів : НАН України, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка, 2010. 448 с.

5. Ahn J., Hwang B., Song E. P., Lee S., Kim N. J. Correlation of microstructure and wear resistance of Al_2O_3-TiO_2 coatings plasma sprayed with nanopowders. *Metall. Mater. Trans*. 2006. Vol. 37A. P. 1851-1861. DOI:10.1007/s11661-006-0128-5

6. Chang-Jiu Li, Wei-Ze Wang, Yong He. Dependency of fracture toughness of plasma sprayed Al_2O_3 coatings on lamellar structure. *J. Thermal Spray Technology*. 2005. Vol 13. № 3. P. 425-431. DOI:10.1361/10599630419364

7. Morks M. F., Tsunekawa Y., Okumiya M., Shoeib M. A. Splat Microstructure of Plasma Sprayed Cast Iron With Different Chamber Pressures. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2003. Vol. 12(2). P. 282–289. DOI: 10.1361/105996302770348880

8. Антоненко Д. А., Копилов В. І. Тріщиностійкість композитних матеріалів з нанокерамічними складовими. *Вісник Донбаської машинобудівної академії*. 2012. № 3 (28). С. 24–29.

9. Копилов В. І., Смирнов І. В. Вплив параметрів частинок і мікрорельєфу поверхні на формування фізичної площі контакту при газотермічному напиленні. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування*. 2008. № 53. С. 5–16.

10. Копилов В. І. Поверхневі фізико-хімічні процеси : навч. посіб., ред. В. І. Копилов, І. В. Смирнов. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 284 с.

11. Порошок для плазмового нанесення покриттів: пат. 69338 Україна: МПК C23C4/10. №201112209; заявл. 18.10.2011; опубл. 25.04.2012; бюл. № 8.

12. Копилов В. І. Адгезійні властивості і міцність зчеплення газотермічних покриттів. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»* / В. І. Копилов, І. В. Смирнов, Д. О. Антоненко. Київ, 2010. № 1. С. 93–103.

13. Поверхневі властивості розплавів та твердих тіл та їх використання у матеріалознавстві / за ред. Найдича Ю. В. Київ : АН УРСР, ін.-т пробл. матеріалознавства ім. І. М. Францевича. Наук. думка, 1991. 280 с.

14. Hu M. S., Evans A. G. The cracking and decohesion of thin films on ductile substrates. *Acta metall*. 1989. Vol. 37, № 3. P. 917–925. DOI: https://doi.org/10.1016/0001-6160(89)90018-7

References

1. Kopylov V. I., Smirnov I. V., Sieliverstov I. A. (2019) *Formuvannya ta vlastivosti plazmovikh bagatofaznikh pokrittiv iz nanorozmirnimi skladovimi: monografiia* [Formation and properties of plasma multiphase coatings with nanoscale components: monography]. Kyiv : Naukova dumka. (in Ukrainian)

2. Kopylov V. I. (2016) Effect of multiphase structure of plasma coatings on their elastic and strength properties. *Eastern-Eurohean Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5/5 (83), pp. 49–57. DOI:10.15587/1729-4061.2016.79586

3. Rozov Yu. G., Sieliverstov I. A., Soshko V. O. (2010) Materialoznavstvo i tekhnologiya konstruktsiinikh materialiv: navch. posib. [Materials science and technology of structural materials: a textbook]. Kherson : Oldi-plyus. (in Ukrainian)

4. Panasyuk V. V. (ed.) (2010) *Fiziko-himichna mehanika materialiv* [Physicochemical mechanics of materials], Lviv : National Academy of Sciences of Ukraine, Karpenko Institute of Physics and Mechanics. (in Ukrainian).

5. Ahn J., Hwang B., Song E. P., Lee S., Kim N. J. (2006) Correlation of microstructure and wear resistance of Al_2O_3-TiO_2 coatings plasma sprayed with nanopowders. *Metall. Mater. Trans*., vol. 37A, pp. 1851–1861. DOI: 10.1007/s11661-006-0128-5

6. Chang-Jiu Li, Wei-Ze Wang, Yong He (2005) Dependency of fracture toughness of plasma sprayed Al_2O_3 coatings on lamellar structure. *J. Thermal Spray Technology*, vol 13, no 3, pp. 425–431. DOI: 10.1361/10599630419364

7. Morks M. F., Tsunekawa Y., Okumiya M., Shoeib M. A. Splat (2003) Microstructure of Plasma Sprayed Cast Iron With Different Chamber Pressures *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 12(2), pp. 282–289. DOI: 10.1361/105996302770348880

8. Antonenko D. A., Kopilov V. I. (2012) *Trishinostijkist kompozitnih materialiv z nanokeramichnimi skladovimi* [Crack resistance of composite materials with nanoceramic components]. Visnik Donbaskoi mashinobudivnoi akademii [Donbass Machine-Building Academy], vol. 3 (28), pp. 24–29. (in Ukrainian).

9. Kopylov V. I., Smirnov I. V. (2008) *Vpliv parametriv chastinok i mikrorelyefu poverhni na formuvannya fizichnoyi ploshi kontaktu pri gazotermichnomu napilenni* [Influence of particle parameters and surface microrelief on the formation of physical contact area during gas-thermal spraying]. *Visnyk NTUU "KPI". Mashinostroenie* [Machine-Building], vol. 53, pp. 5–16. (in Ukrainian).

10. Kopylov V. I. (2012) *Poverhnevi fiziko-himichni procesi: navch. posib*. [Surface physicochemical processes: a textbook]. Kyiv : NTUU "KPI". (in Ukrainian).

11. *Poroshok dlya plazmovogo nanesennya pokrittiv* [Plasma coating powder] (2011) Pat. 69338 Ukraine: MPK C23S4/10. №201112209; zayavl. 18.10.2011; opubl. 25.04.2012; byul. № 8. (in Ukrainian).

12. Kopylov V. I. (2010) *Adgezijni vlastivosti i micnist zcheplennya gazotermichnih pokrittiv* [Adhesive properties and adhesion strength of gas-thermal coatings]. Kopilov V. I., Smirnov I. V., Antonenko D. O. (ed.). *Naukovi visti NTUU "KPI"*, no. 1, pp. 93–103. (in Ukrainian)

13. Najdich Yu. V. (ed.) (1991) *Poverhnevi vlastivosti rozplaviv ta tverdih til ta yih vikoristannya u materialoznavstvi* [Surface properties of melts and solids and their use in materials science]. Academy of Sciences of the USSR, Frantzevych Institute of Materials Science. Nauk. dumka. (in Ukrainian).

14. Hu M. S., Evans A. G. (1989) The cracking and decohesion of thin films on ductile substrates. *Acta metall*, vol. 37, no. 3, pp. 917–925.

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025