

УДК 621.793

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2025.1\(499\).4](https://doi.org/10.15589/znп2025.1(499).4)**ANALYSIS OF THE QUALITY OF COATINGS MADE BY PLASMA SPRAYING FOR NODES AND PARTS OF GAS TURBINES ENGINES AND INSTALLATIONS****АНАЛІЗ ЯКОСТІ ВИКОНАНИХ ПЛАЗМОВИМ НАПИЛЕННЯМ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ВУЗЛІВ І ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ І УСТАНОВОК****Volodymyr A. Lebedev¹**

valpaton@ukr.net

ORCID: 0000-0003-0391-6113

Volodymyr V. Spihtarenko¹

vladimir.kherson11@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6328-9791

Serhii A. Loi¹

welding.kherson@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-1936-6390

Oleksiy M. Khalimovskyy²

o.khalimovskyy@ukr.net

ORCID: 0000-0003-3672-8530

В. О. Лебедєв¹,

докт. техн. наук., професор

В. В. Спіхтаренко¹,

доцент

С. А. Лой¹,

доцент, старший викладач кафедри зварювання

О. М. Халімовський²,

доцент

¹ *Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson*² *National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv*¹ *Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макаров, м. Херсон*² *Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

Abstract. An analysis of the available methods for assessing the quality of protective coatings applied by plasma spraying for strengthening and restoring assemblies and parts of gas turbine engines and installations has been carried out. The degree of influence of the structure of the coatings on their main quality indicators has been established. An assessment of the effectiveness of the methods for studying these indicators is given. It is noted that for assessing the quality indicators of coatings applied by plasma spraying, physical methods of instrumental research prevail among the methods of their analysis. However, recently, mathematical modeling methods have also been used. Such methods for analyzing the behavior of coatings significantly simplify the development and selection of technological processes. Using calculation methods and numerical modeling, it is possible to predict their behavior under different conditions with a sufficient degree of accuracy, depending on the selected operating mode of the plasma installation and the order of application of sprayed layers with different components. These calculations relate to descriptions of the stress state of plasma coatings. The possibility of such a forecast is confirmed by the obtained coincidence of the results of studies of estimates of numerical values of quality indicators of protective coatings properties, performed by mathematical and experimental methods. Along with the modes and materials of spraying, the operating conditions of the coating, the dependence obtained analytically proves the importance of choosing its thickness to ensure its given strength. It is concluded that in the case of uneven coating thicknesses due to deformation of parts from the thermal effect of the plasma flow, it is not possible to obtain an adequate assessment of the stress state of the coatings using already known methods of analytical calculation and modeling. The analysis showed that most methods of analysis and evaluation of coatings are not perfect and require both additions and new solutions, including using other physical phenomena and means.

Key words: plasma, spraying; coating; layer; crack; modeling; heat resistance; strength; base material.

Анотація. Проведено аналіз наявних методів оцінки якості захисних покриттів нанесених плазмовим напиленням для зміцнення та відновлення вузлів і деталей газотурбінних двигунів і установок. Встановлено ступінь впливу структури покриттів на їх основні якісні показники. Дана оцінка ефективності методів дослідження цих показників. Зазначено, що для оцінки показників якості покриттів, які наносяться плазмовим напилюванням серед методів їх аналізу превалюють фізичні методи інструментальних досліджень. Проте, останнім часом

знаходять застосування також методи математичного моделювання. Такі методи аналізу поведінки покриттів, значно спрощують розробку і вибір технологічних процесів. Використовуючи розрахункові методи та чисельне моделювання, можна з достатнім ступенем точності, залежно від обраного режиму роботи плазмової установи та порядку нанесення напиленних шарів з різними компонентами, прогнозувати їх поведінку в різних умовах. Ці розрахунки стосуються описів напруженого стану плазмових покриттів. Можливість такого прогнозу підтверджено отриманим співпадінням результатів досліджень оцінок чисельних значень показників якості властивостей захисних покриттів, виконаних математичними та експериментальними методами. Поряд з режимами і матеріалами напилення, умовами експлуатації покриття, залежність, що отримана аналітично, доводить важливість вибору його товщини для забезпечення заданої його міцності. Зроблено висновок про те, що для випадку утворення нерівномірності товщин покриттів внаслідок деформації деталей від дії теплового впливу плазмового потоку не можна отримати адекватну оцінку напруженого стану покриттів, використовуючи вже відомі методи аналітичного розрахунку та моделювання. Проведений аналіз показав, що більшість методів аналізу та оцінки покриттів не є досконалими та вимагають, як доповнень, так і нових рішень у тому числі з використанням інших фізичних явищ та засобів.

Ключові слова: плазма; напилення; покриття; шар; тріщина; моделювання; термостійкість; міцність; базовий матеріал.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Економічність і безпека роботи газотурбінних двигунів і установок визначається безпосередньо робочим станом основних вузлів і деталей їх конструкцій. До параметрів надійності роботи окремих з них пред'являються підвищені вимоги. При експлуатації газотурбінних двигунів такі вимоги стосуються стійкості робочих лопаток в умовах підвищених температур. Їх стійкість, значною мірою визначається надійними видами жароміцних покриттів, нанесених плазмовим напиленням. У разі тривалої експлуатації суден обсяги ремонтних робіт для обладнання такого типу постійно збільшуються. Тому завдання аналізу властивостей покриттів, виконаних плазмовим напиленням у технологіях відновлення та зміцнення вузлів і деталей газотурбінного та іншого обладнання, з метою розробки і створення методів та засобів, що підвищують ефективність їх застосування, є актуальною.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

До теперішнього часу проведено досить великий обсяг експериментальних і теоретичних досліджень [1], присвячених проблемам плазмового напилення, а також підвищенню експлуатаційного ресурсу вузлів та деталей газотурбінних двигунів і установок. Однак ці проблеми залишаються дуже актуальними. У зв'язку з цим постійно ведеться розробка та вдосконалення методів відновлення і зміцнення.

Ефективним способом захисту внутрішньої та проточної поверхонь лопаток від корозійного пошкодження та високотемпературного окислення є нанесення газотермічними методами напилення сучасних теплозахисних покриттів. Термобар'єрні покриття призначені для зниження теплоприпливу до матеріалу лопатки.

Як відомо, одним з найбільш поширених, внаслідок відносної простоти реалізації та інших аспектів ефективного застосування, є спосіб плазмового

напилення з різними типами обладнання та варіантами техніко-технологічного забезпечення процесу. Основні критерії якості покриттів стосовно газополум'яних способів нанесення і, зокрема, результату плазмового напилення, а також деякі методи їх об'єктивного визначення, викладені в роботі [2].

У роботах [3] проведено аналіз результатів застосування технологій з проведенням відповідних коригувань складу матеріалів та режимів виконання плазмового напилення.

Слід зазначити, що металеві покриття, одержувані за будь-якого способу їх нанесення, включаючи плазмове, згідно з матеріалами роботи [4] і нашого дослідницького та виробничого досвіду, майже у всіх випадках мають дещо гірші характеристики міцності, ніж суцільні матеріали, покриття з яких виконані, наприклад, електродуговим наплавленням. Однак спосіб плазмового напилення має серйозні переваги, серед яких – можливість застосування в різних просторових положеннях, а також використання при нанесенні на тонколистові деталі різної форми, можливість застосування автоматизації процесу в більшості випадків та ін.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Визначити чинники, що впливають на основні якісні показники покриттів, отриманих при плазмовому напиленні. Провести аналіз методів їхньої оцінки. Встановити шляхи покращення показників якості таких покриттів для створення найбільш ефективних засобів у технологіях відновлення та зміцнення вузлів та деталей газотурбінного та іншого обладнання.

Встановити ступінь впливу властивостей покриттів на їх основні якісні показники. Оцінити ефективність методів дослідження цих показників, а також визначити напрямки подальших розробок для виробництва технологічного обладнання, яке забезпечує підвищення якості покриттів, що наносяться плазмовим напилюванням.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для отримання якісного покриття існують і надалі розробляються методи їх аналізу та контролю, що дозволяє оцінити їх якість, спосіб нанесення та, що дуже важливо, прогнозувати напрями вдосконалення способів, систем, матеріалів плазмового напилення. До них необхідно віднести аналітичні методи оцінки стану покриття, методи математичного моделювання, а також методи експериментальних досліджень.

Основні методи контролю якості покриттів, нанесених плазмовим напиленням відображені на рис. 1.

Важливим є те, що характеристики міцності напиленого шару залежать від його когезійної та адгезійної міцності і практично знаходяться в пропорційній залежності від них. Ці складові міцності залежать від матеріалів напилення, від підготовки поверхонь та їх матеріалів, технологічних режимів, що використовуються та ін.

Вочевидь, що когезійна міцність має особливо значний вплив на міцність покриття при

багатшаровому напиленні, а адгезійна міцність та її властивості характеризують здатність покриття протистояти механічним впливам, що руйнують зв'язок покриття з основою – поверхнею деталі.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Першим етапом оцінки результату процесу напилення є огляд отриманого покриття на наявність тріщин, відшарувань, напливів, непокриттів та інших дефектів. Негативні результати огляду є підставою для визначення причин відсутності якості або підготовки повторного напилення.

Далі при позитивних результатах огляду проводиться дослідження механічної міцності покриття, яка визначає силу зчеплення покриття зі зразком. Результат дослідження дає повну підставу для висновку про міцність напилення загалом.

Для визначення міцності покриття застосовується два основних види досліджень – визначення зусиль при відриві напиленої ділянки від підкладки та визначення зусиль на зріз певного шару покриття. З огляду на те, що з техніко-технологічних особливостей

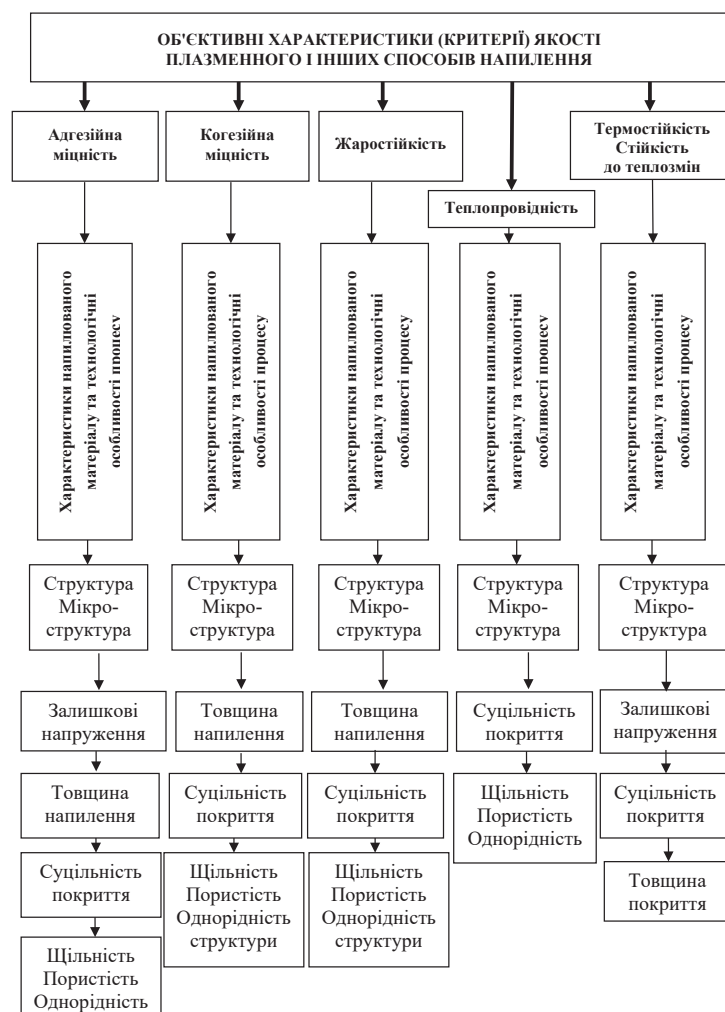


Рис. 1. Основні методи контролю за якістю покриттів, нанесених плазмовим напиленням

процесу напилання його шари мають різну адгезійну і когезійну міцності на різних ділянках зазвичай виконують ряд експериментів як при дослідженні на відрив, так і при дослідженні на зріз з подальшим усередненням отриманих результатів. Процедури визначення міцності напиленого шару широко представлені в чисельних публікаціях.

Найбільш поширеним методом досліджень на відрив є метод витягування конічного штифта із спільно напилених торцевої поверхні штифта і поверхні, що напилюється. Цей метод досить точний в оціночному дослідженні, проте застосувати його для вже напиленої деталі неможливо. В цьому випадку можна використовувати клейовий метод із застосуванням клеїв сучасного складу з міцністю відриву, що перевищує міцність напиленого покриття. Нами в дослідженнях використовувалися клеї на основі силан-модифікованих полімерів (STP) з високими показниками адгезії. Сам процес склеювання проводиться у спеціальному пристрої, що фіксує місце склеювання на необхідний час.

Випробування на зріз, що проводяться в наших дослідженнях, описані в роботі [5], де представлені способи підготовки зразків у вигляді циліндрів. Однак проводити випробування на зріз можна і на плоских зразках, підготовлених при необхідності з напилених ділянок деталі. Основним недоліком цього способу є непаралельність зрізу, що веде до помилок вимірювань.

В експериментальних дослідженнях використовують спеціальні лабораторні установки з механізмом, що забезпечує зусилля відриву або зрізу (зусилля, що руйнує) на кожній фазі руйнуючого зусилля. Таким чином, можна отримати уявлення про динаміку процесу. Для вирішення цього завдання нами запропоновано використовувати тяговий пристрій, який оснащений безредукторним вентильним електроприводом з прецизійним регулюванням частоти обертання механізму силового впливу. У якості датчика зусилля використані тензометричні пристрої фірми ZEMIC, встановлені в спеціальну важільну конструкцію. Структурну схему такої системи представлено на рис. 2.

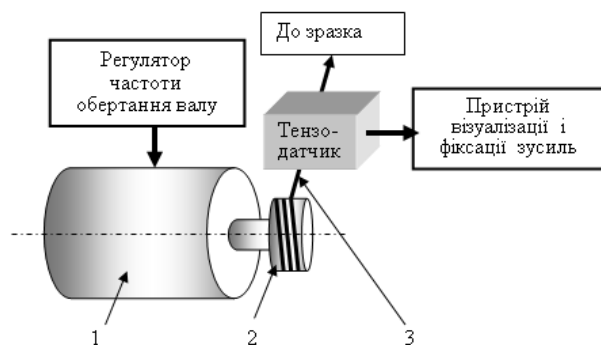


Рис. 2. Експериментальна установка для вимірювання міцності покриттів: 1 – вентильний електродвигун; 2 – шків; 3 – тросик

Установка вимірювань міцності покриттів дозволяє відстежити важливі характеристики – кожен етап відриву чи зрізу, тобто. динаміку руйнування. На установці, використовуючи програмовані можливості регулятора можна моделювати навантаження від плавного до навантажень різного виду, що відповідають реальним періодичним впливам на покриття, в тому числі і вібраційним. При цьому можна помітити, що адгезійна міцність залежить не тільки від характеристик напилуваного матеріалу та обраних режимів роботи установки для нанесення покриттів, але й від умов експлуатації газотурбінного обладнання і визначається, як частка відокремлена руйнівним навантаженням на площу торцевої поверхні у вигляді наступного виразу з урахуванням числа вимірювань n

$$\sigma_{mean} = \frac{P_1 + \dots + P_n}{n \cdot F}$$

де σ_{mean} – середнє значення (англ. – mean value) міцності зчеплення з основою;

$P_1, \dots, P_n$ – розтягуюча сила; F – площа поперечного перерізу досліджуваного зразка.

Для забезпечення працездатності вузла або деталі проводиться комплекс експериментів, що дозволяють виявити причини недостатньої міцності покриттів і, у подальшому, уникнути отримання незадовільних результатів характеристик зчеплення.

Спрямованість подальших експериментів значною мірою залежить від умов експлуатації обладнання. Для нашої теми досліджень, що відноситься до плазмових способів напилання вузлів та деталей газотурбінних двигунів і установок, найважливішим є вплив високих температур на покриття їх вузлів та деталей, зокрема лопаток. При цьому товщина покриттів є особливо важливою характеристикою робочих органів конструкції, що зазнають значні теплові впливи. Їхні покриття відносяться до теплозахисних і повинні мати певні параметри, що забезпечують підтримання температурних режимів поверхонь зі збереженням механічної міцності. У наших дослідженнях товщину покриттів визначали у профілометричний спосіб. Вибір товщини покриттів для практичного застосування, що забезпечує як необхідні теплозахисні властивості, так і механічну міцність – актуальне завдання, яке обумовлюється обмеженнями, в основному, за товщинами напиленого шару.

Особливо це важливо при багатошаровому напиланні, коли відсутня повна контактна взаємодія між шарами і дуже високий рівень залишкової напруженості в напиленому матеріалі (деталі), особливо в режимах роботи деталі при динамічних навантаженнях, пов'язаних з деформуванням. Все це значною мірою залежить від видів застосовуваних порошків, їх складу, розмірів та режимів, при яких виконується напилання та подальша термічна обробка.

Нами запропоновано і представлено в роботі [6] методику розрахунку з комп'ютерним моделюванням

напруженого стану покриття, яка в досить значному обсязі описує основні явища напруженого стану з використанням необхідних залежностей. Ця методика може бути основою для вироблення цілеспрямованих технологічних рекомендацій при напилюванні конкретних вузлів та деталей техніки. Такими елементами механічних конструкцій можуть бути, наприклад, лопатки турбін та інших види технічних систем, де однією з основних вимог застосування є їх надійність і ресурс. Важливим висновком визначення характеристик напруженого стану є обмеження товщини покриття. Внаслідок цього висновку важливо контролювати реальну товщину напиленого шару, яка повинна забезпечити задані теплозахисні властивості та мати необхідні механічні характеристики.

Для інших умов експлуатації вузлів та деталей у тому числі з фрикційними впливами (вузли тертя) актуальними є покриття з високими значеннями опору зношування. Зносостійкість напиленого шару забезпечується комплексом технологічних рішень як за матеріалами, так і за методиками їх нанесення. До цих заходів також входить і забезпечення необхідної товщини покриття для забезпечення тривалого періоду експлуатації. Вузли та деталі газотурбінних двигунів та установок також піддаються фрикційному впливу і для них характерною умовою є забезпечення заданої товщини.

Захист вузлів та деталей від значних теплових навантажень повинен здійснюватися на підставі експериментальних досліджень з визначення якості покриттів за певними методиками. Виходячи з умов експлуатації газотурбінних двигунів та установок велике значення для оцінки якості покриттів має їх зносостійкість та міцність при різних видах теплових впливів. Для нагріву зразка використовувалася розроблена установка визначення стійкості покриттів до теплових впливів [7]. Як джерело нагрівання застосовується джерело інверторного типу з блоком програмованого управління, що дозволяє задавати час витримки, необхідний рівень температури нагрівання та підтримувати його. Важливою особливістю блоку є обмеження струму короткого замикання. Установка може бути використана для низки дослідницьких завдань. Склад установки для керованого нагріву представлений на рис. 3.

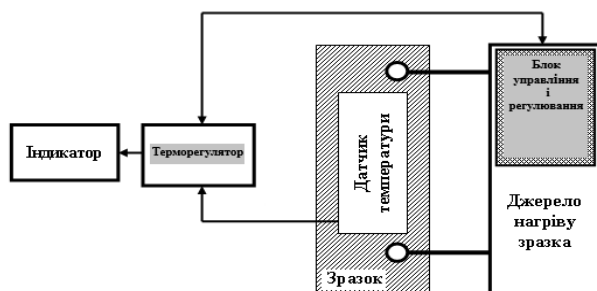


Рис. 3. Структурна схема установки визначення стійкості покриття до теплових впливів

Для комплектування установки вибрано терморегулятор UDS-12.R TP995 з автоматичним утриманням заданої температури у зоні нагріву. До складу регулятора включено цифровий індикатор температури. Установка використовується для порівняльного дослідження плазмових ущільнювальних покриттів вузлів газотурбінних агрегатів, які використовуються, в тому числі, й у складі суднового обладнання.

Як уже згадувалося раніше із застосуванням плазмового напилення можна отримати вузли та деталі, що дістають особливі службові властивості – зносостійкість, жароміцність, корозійну стійкість, термостійкість та ряд інших, які досить докладно описані в роботах [7, 8].

Слід особливо відзначити, що обране джерело нагрівання дозволяє організацію на його основі практично будь-якого алгоритму управління температурою, включаючи різноманітні циклічні зміни, що буває характерним для цілого ряду об'єктів.

Вузли та деталі газотурбінних двигунів та установок також піддаються фрикційному впливу. Вимогою до їх покриттів є забезпечення як заданої товщини теплозахисного шару, так і їх певні трибологічні властивості. Отже, визначення трибологічних властивостей (зносостійкості) при різних параметрах отримання напиленого шару є важливим завданням для забезпечення якості отриманого покриття.

Проведено дослідження зносостійкості при застосуванні різних порошків у складі покриття, а також при різному числі шарів та різних температурах. Випробування на зносостійкість при терті металу по покриттю проводили на установці для комплексної оцінки властивостей наплавленого металу, розробленої в ІЕС ім. Е. О. Патона (Е.О. Paton Electric Welding Institute) з деяким доопрацюванням вузлів установки, за таких умов: питомий тиск у місці контакту 100 МПа; швидкість тертя 11...12 м/мин; початкова температура кільця-контртіла (за GOST 12423-66) – $23 \pm 2^\circ\text{C}$; температура на поверхні випробуваного зразка у контактній зоні 30...40°C. Розміри кільця-контртіла, виготовленого із загартованої сталі St 45, становили: діаметр 110 mm, ширина 30 mm, товщина 20 mm; розміри зразка – 10×20×40 mm.

Результати трибологічних досліджень напилених сталевих зразків з матеріалів вузлів та деталей з тертям ковзання (за звичайних температурних умов) при обертовому та зворотно-поступальному русі проводилися з використанням трьох зразків з різними видами покриттів та збереженням однакових умов постановки експериментів. Результати досліджень наведені у табл. 1. Дослідження покриттів лопаток турбін із застосуванням сучасних, в тому числі керамічних покриттів для визначення їх трибологічних властивостей з використанням вищевказаного способу не проводилося через досить велику твердість цих покриттів. За результатами досліджень (табл. 1),

зношування покриття залежить, також, від кількості наплавлених шарів.

Таблиця 1. Результати трибологічних досліджень покриттів

Кількість шарів	Темп зношування матеріалу напилення, мм ³ /км		
	Матеріал напилення БрОФ 10-1	Матеріал напилення самофлюсуючий сплав ПГ-10К-01 з подальшим оплавленням	Матеріал напилення, ПГ-10К-01 із шлаковою компонентою
1	12,3	6,7	6,1
2	11,2	6,4	5,9
3	9,4	5,0	5,5

Така залежність, на нашу думку, корелює з висновок роботи [9] про те, що зростання залишкового напруження розтягування суттєво знижує міцність покриття та у свою чергу веде до погіршення трибологічних властивостей напиленого шару.

Для вузлів і деталей газотурбінних двигунів та установок, що працюють в зонах значного нагріву та високих температур, набувають великого значення такі характеристики як жаростійкість, термостійкість та стійкість до теплових змін. Ряд питань, що стосуються цих проблем, були розглянуті в роботі [5].

Особливо важливо визначити способи забезпечення захисту лопаток газотурбінних двигунів, які виготовляються із жароміцних сплавів в умовах високих температур та зазнають великих навантажень за різних режимів роботи. Ці дії також призводять до високотемпературної корозії, яка в більшості випадків визначає ресурс роботи лопаток та агрегату загалом. Тверді частинки, що знаходяться в газовому потоці, призводять до ерозійного зносу лопаток. Великий діапазон зміни температур – від температури навколишнього середовища до робочої температури турбіни (950–1000°C) повинен визначати стійкість плазмових покриттів до теплових змін. Все це дає підстави для подальших досліджень та випробувань на термоциклічну стійкість.

Проведені у зазначеній роботі дослідження на термоциклічну стійкість напиленого покриття виконувались для умов стаціонарного нагріву у муфельній

печі, що не цілком відповідає реальним умовам роботи покриттів, де крім нагріву зразка існує потік газів з досить високою абразивною складовою, що містить тверді частинки. Отримати результати, що наближаються до реальних умов роботи, було можливим на розробленій нами лабораторній дослідницькій установці з газополум'яним нагріванням і високою швидкістю витоку пального газу при введенні в потік абразивних частинок, склад яких характерний для роботи реальних газотурбінних агрегатів (в основному це продукти згоряння палива). Результати експериментальних досліджень представлені у табл. 2.

У ряді випадків мікротвердість можна віднести до основних характеристик плазмового напилення, так як властивості поверхні, зокрема, багато в чому визначають функціональні характеристики покриття. Застосовується визначення мікротвердості також для інших характерних фаз покриття (двох та тришарового напилення).

Традиційним та показовим способом визначення мікротвердості є вдавлення алмазної піраміди з певним зусиллям на приладі спеціального типу. Найчастіше цей метод використовується для порівняльного аналізу. При цьому особливо важливо вимірювати мікротвердість характерних фаз двошарового, а також тришарового плазмових покриттів, зокрема з проміжним шаром. У цих випадках є експериментально отримані вихідні дані для вибору режимів напилення та його складу.

Метод рентгеноструктурного аналізу застосовується для вивчення фазового та структурного складу при аналізі плазмових покриттів, які становлять практичний інтерес. Для цих цілей використовують дифрактометри із застосуванням певного складу фільтрів випромінювання із записом дифрактограм. За отриманими зображеннями можна визначити розподіл окремих елементів у напиленому шарі.

Позитивні результати можна отримати, використовуючи можливості мікросондових аналізаторів. На рис. 4 представлені характерні результати досліджень на мікроаналізаторі Superproba 733 фірми Jol (Японія) по розподілу вуглецю C, нікелю Ni і хрому Cr в напиленому шарі, на підставі яких за їх концентрацією можна оцінити вплив цих речовин на міцність покриттів.

Таблиця 2. Міцність зчеплення та результати випробувань на термоциклічну стійкість ущільнювальних покриттів при порівняльних дослідженнях

Склад покриттів	Товщина, мм	Умови напилення	Міцність зчеплення на зріз, МПа	Кількість термоциклів до руйнування	Характер руйнування
ПГ-10-01+20%ZrO ₂ (Ni)	0,4	Повітря	350	145	Часткове відшарування
ПГ-10К-01+20%BN(Ni)	1,8	Звичайні	350	145	
ПГ-10-01+20%ZrO ₂ (Ni)	0,4	У газовому потоці	350	145	Повне відшарування
ПГ-10К-01+20%BN(Ni)	1,8		350	145	

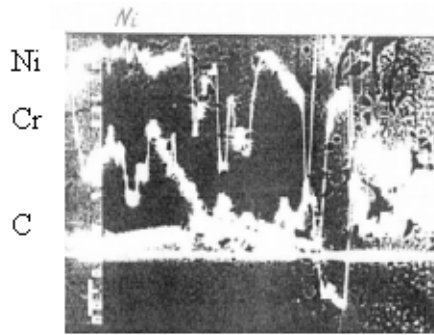


Рис. 4. Розподіл вуглецю хрому та нікелю в покритті ПГ-10К-01+20% С(Ni)

Дуже інформативними є дослідження мікроструктури зразків, отриманих плазмовим напыленням. Незважаючи на трудомісткість отримання результатів цього виду досліджень дуже важливо мати у вигляді зображень структури напыленого покриття та місця їх зчеплення з базовим матеріалом як для загального аналізу, так і аналізу після певного виду досліджень, зокрема, при дослідженнях стійкості для теплових випробувань з використанням різних за складом покриттів. При цьому в багатьох випадках за зображеннями можна визначити розподіл окремих елементів в напыленому шарі.

Порівняльні мікроструктури плазмових покриттів на основі нікелю, що виконані у вакуумі та на повітрі після випробувань наведені на рис. 5.

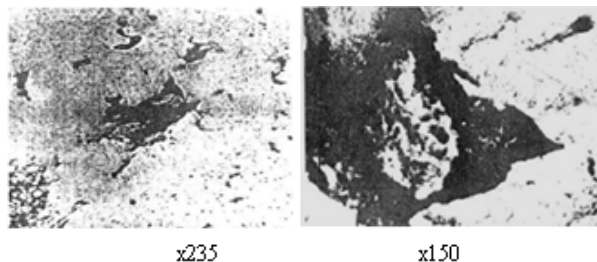


Рис. 5. Мікроструктура покриття ПГ-10К-01+20% С(Ni) (зразок № 0011) після випробувань

Зображення на фотографіях, виконані за допомогою растрового електронного мікроскопа. По структурі покриттів можна визначити якість напыленого шару, його щільність і рівномірність, та на підставі цих досліджень здійснити вибір складу матеріалу для напылення, а також режимів його нанесення.

На рис. 6 наведені різні характерні ділянки мікроструктур ущільнювальних покриттів після корозійних та термоциклічних випробувань.

За видом і тоном структур можна було визначити, що найсвітліші ділянки розміром близько 30% мають відносно низьку мікротвердість з малим розкидом значень. Ділянки темніші (сірі) площею близько 40% мають високу мікротвердість, але також із значним розкидом. Такі ділянки містять елементи, що зміцнюють покриття. У зразках, що розглядаються, є до

30% темних ділянок, які можна ідентифікувати як пори. Важливе значення має аналіз складу та будови пористих утворень в ущільнювальних покриттях, оскільки вони забезпечують зносостійкість у процесі експлуатації.

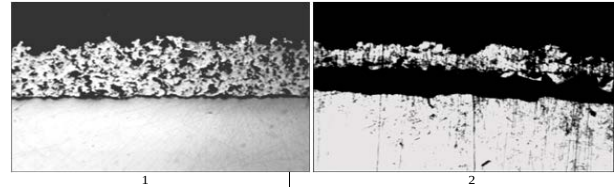


Рис. 6. Порівняльні мікроструктури плазмового напылення, що виконані: 1 – у вакуумі; 2 – на повітрі

Таким чином, мікроструктури, що вивчені за допомогою отриманих на растровому мікроскопі знімків з подальшим дослідженням їх складу, дають достатні підстави для оцінки результатів працездатності покриттів при термічній дії та пошуку шляхів поліпшення їх якісних показників, у тому числі і за рахунок характеристик міцності.

Застосовуючи методику дослідження мікроструктур напыленого матеріалу, можна виявити деякі особливі характеристики покриття. Так на основі аналізу мікроструктур покриттів визначено, що в порах можуть бути залишки твердого мастила, які утворюються в процесі його вигорання (С).

Методи аналізу покриттів, які зазначені вище, засновані здебільшого на пасивних дослідженнях, коли не застосовуються інші фізичні дії. Нині дедалі ширше застосовуються ультразвукові методи контролю, і навіть ефекти лазерного впливу, що зокрема зазначено в роботі [10]. Ці методи досліджень дозволяють вивчити властивості покриттів, виконаних плазмовим напыленням, не руйнуючи їх. Дієвість цих способів досліджень структур покриттів, виконаних плазмовим напыленням, підтверджується дослідницькою практикою і варта окремого опису.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Крім описаних вище способів визначення якості плазмових покриттів, що засновані на методиках фізико-механічних та хімічних досліджень реальних зразків, є інші методики, застосовуючи які можна прогнозувати результати напылення з різноманітними характеристиками матеріалів і режимами їх нанесення на різні базові матеріали. До таких методів можна віднести метод дослідження напруженого стану покриттів з використанням засобів програмування та моделювання [6, 9]. Такі методи аналізу поведінки покриттів, що наносяться, значно спрощують розробку і вибір технологічних процесів. Перевірка адекватності результатів методів такого прогнозу підтверджена низкою експериментальних робіт. Так для компонентів напылення, що самофлюсуються залежність

міцності покриття σ , від товщини його шару h , яка визначена аналітичним шляхом у вигляді

$$\sigma = f(h)$$

підтверджена експериментальними дослідженнями. Результати досліджень, що наведені на графіках рис. 7 у вигляді апроксимацій прямими лініями є достатніми для їх практичного використання при розробці технологій напilenня.

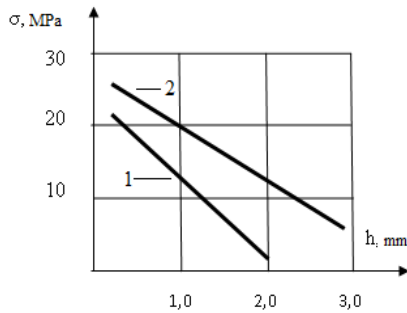


Рис. 7. Залежність міцності покриття σ від товщини h його плазмового напilenня: 1 – напilenня компонентною St. 3; 2 – напilenня високоміцним матеріалом

Вочевидь, вивчення впливу напруженого стану напilenного шару моделюванням може мати практичний інтерес, зокрема, при встановленні кількісних співвідношень між величинами напруженості та товщинами покриттів, що нанесені у два шари.

На рис. 8 наведені результати розрахунку та моделювання величин поздовжніх напруженостей $\sigma = f(\frac{a_1}{a_2})$, де a_1 та a_2 – товщини шарів, що напilenі.

Відображені залежності, що отримані за розробленими методиками досить близькі до результатів експериментальних досліджень.

Як відомо, напружений стан покриття може спричинити утворення тріщин, що в свою чергу характеризує погіршення експлуатаційних характеристик виробу.

Шляхом моделювання встановлено, що найімовірнішим місцем утворення тріщини з причин, що обумовлені напруженим станом одношарового покриття, є поверхня розділу покриття з базовим матеріалом.

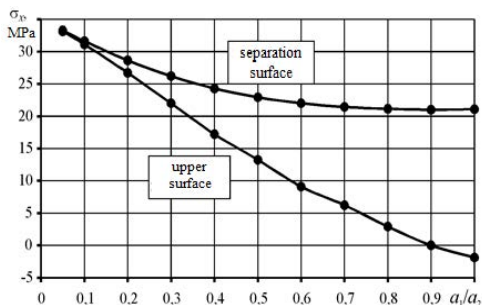


Рис. 8. Залежність поздовжніх напружень від співвідношення товщин шарів $\frac{a_1}{a_2}$ в покритті при нагріванні до 100°C

За результатами моделювання також встановлено і експериментально підтверджено, що найбільш ймовірним місцем зародження тріщин в напilenних шарах при нагріванні є поверхня розділу між ними. При цьому кращим з точки зору зменшення поздовжньої напруженості в напilenому покритті та підвищенні його термостійкості є співвідношення товщин $\frac{a_1}{a_2} > 0,5$.

Результати комп'ютерного моделювання поздовжньої напруженості покриттів у разі їх збігу з результатами, отриманими аналітичним розрахунком, дозволяють визначити поперечні та дотичні напруженості на ділянках викривлення перерізів. Саме на цих ділянках, як показали результати моделювання, створюються сприятливі умови для утворення тріщин у крихкому матеріалі напilenного шару, оскільки розтягувальні поперечні напруженості на стадії зниження температури співмірні з поздовжніми в середній частині зразка на стадії нагріву. Крім того, великі дотичні напруги на межі розділу цих ділянок створюють небезпеку відшарування напilenного шару.

Як відомо, зменшення величини залишкової напруженості у покритті призводить до збільшення його міцності. Керуючи кількістю напilenного матеріалу, його вмістом, а також витратою та складом газу, який застосовується для утворення плазми, формують умови горіння плазмового струменя. Змінюючи умови формування плазмового струменя і режими напilenня можна досягти зниження величини залишкової напруженості у покритті.

Нерівномірність товщин покриттів, спричинених (обумовлена) деформацією самих деталей від нагрівання плазмовим потоком вважається ще одним з чинників, що впливає на експлуатаційні властивості покриттів при багатошаровому напilenні. Наслідком прояву цього ефекту є зниження міцності одержуваних покриттів.

При багатошаровому напilenні зносостійкими сплавами також додатково існує проблема технологічної міцності покриття.

Для випадку утворення нерівномірності товщин покриттів внаслідок деформації деталей від дії теплового впливу плазмового потоку не можна отримати адекватну оцінку напруженого стану покриттів, використовуючи вже відомі методи їх аналітичного розрахунку та моделювання. Вирішення проблеми зниження міцності покриття, обумовленої впливом зазначеного вище явища нерівномірності товщин покриття, передбачає проведення нових досліджень, у тому числі розробки нових методик розрахунків і алгоритмів програм для комп'ютерного моделювання.

ВИСНОВКИ

Розроблена та існує в даний час велика кількість методів аналізу та контролю плазмового напilenня вузлів та деталей газотурбінних двигунів та

установок, які призначені для оцінки як окремих особливостей покриття, так і їх комплексної оцінки.

Серед методів аналізу та оцінки превалюють фізичні методи інструментальних досліджень, проте останнім часом знаходять застосування методи математичного моделювання, які в ряді випадків дозволяють прогнозувати результати напilenня, що стосується описів напруженого стану плазмових покриттів.

Практично всі вищеописані методики застосовувалися при розробці технологій зміцнення і відновлення вузлів і деталей робочих органів різних виробів, в тому числі поверхні газотурбінних двигунів і установок, що інтенсивно нагріваються. Проведений

аналіз показав, що більшість методів аналізу та оцінки покриттів не є досконалими та вимагають, як доповнень, так і нових рішень у тому числі з використанням інших фізичних явищ та засобів.

До цього часу розроблено та запропоновано досить багато методів та способів оцінки якості результатів плазмового напilenня покриттів для різних умов їх експлуатації. Проте не існує ефективних комплексних рішень для завдань оцінки покриттів, які б дозволили одночасно спростити процедури оцінки, скоротити час її виконання, а також підвищити результативність дослідження. Такі завдання є багатокритеріальними та потребують проведення нових перспективних напрямків досліджень.

REFERENCES

- [1] Lebedev, V.O., Loy, S.A., & Spikhtarenko, V.V. (2022). *Mozhlyvosti pokrashchennya yakosti plazmovoho napylennya pry zmitsnenni ta vidnovlenni vuzliv ta detaley sil's'kohospodars'koyi ta inshoyi tekhniki* [Possibilities of improving the quality of plasma spraying during strengthening and restoration of units and parts of agricultural and other machinery]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi*. № 1. 92–101 [in Ukrainian].
- [2] Lebedev, V.O., Loy, S.A., Matviyenko, M. V., Yermolayev, H. V., & Spikhtarenko, V.V. (2022). *Vyvchennya napruzhеного стану plazmovykh pokryttiv yak zasib pokrashchennya yakosti napylennya* [Study of the stressed state of plasma coatings as a means of improving the quality of spraying]. *Vazhke mashynobuduvannya. Problemy ta perspektyvy rozvytku : materialy KHKH Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi. Kramators'k – Ternopil'*, 130–131 [in Ukrainian].
- [3] Spray Nature of Thermal Coatings. Retrieved from: <http://www.gordonengland.co.uk/tsc.htm>
- [4] Handbook of Thermal Spray technology / ed. By I.R. Davis. 2d ed., ASM International. 2005. 339 p.
- [5] Lebedev, V.O., Dubovy, O.M., & Loy, S.A. (2020). *Osoblyvosti formuvannya (strukturoutvorenniya) ta vlastyvyty teplozakhysnykh pokryttiv pry plazmovomu napylenni* [Features of formation (structure formation) and properties of heat-shielding coatings during plasma spraying]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi*. Chernihiv. № 1. 39–48 [in Ukrainian].
- [6] Lebedev, V.O., & Loy, S.A. (2019). *Modelyuvannya stiykosti plazmovoho napylennya lopatok hazoturbinykh dvyhunyv ta ustanovok* [Modeling the stability of plasma spraying of gas turbine engine blades and installations]. *Modern question of production and repair in industry and in transport: Materials of the 19th International Scientific and Technical Seminar (February 18–23)*. Kosice, Slovak Republic, 97–99.
- [7] Lebedev, V.O., Dubovy, O.M., & Loy, S.A. (2019). *Doslidzhennya ta otsinka termotsyklichnoyi stiykosti plazmovykh ushchil'nyuyuchykh pokryttiv dlya vuzliv hazoturbinykh ustanovok* [Research and evaluation of thermocyclic stability of plasma sealing coatings for gas turbine unit assemblies]. *Novi materialy i tekhnolohiyi v metalurhiyi ta mashynobuduvanni*, № 2, 39–46 [in Ukrainian].
- [8] Lebedev, V.O., & Loy, S.A. (2020). *Mitsnist' pokryttiv pry plazmovomu napylenni robochykh orhaniv hazoturbinykh dvyhunyv ta ustanovok pry vyprovuvannyakh na vidryv* [Strength of coatings during plasma spraying of working parts of gas turbine engines and installations during tear-off tests]. *Aktual'ni napryamy materialoznavstva: zbil'shennya resursu konstruktsiy na osnovi konverhentsiyi suchasnykh tekhnolohiy obrobky materialiv (24–25 veresnya)*. 10–12 [in Ukrainian].
- [9] Pavlowski L., Wiley John & Sons Ltd. (2008). *Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. 2nd ed. 656 p.
- [10] Ducos M. et al. (2004). *Non-Destructive Adhesion Testing of plasma-sprayed coatings using ultrasounds and laser shocks / Proc. Of ITSC*.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Лебедев, В.О., Лой, С.А., & Спихтаренко, В.В. (2022). *Можливості покращення якості плазмового напilenня при зміцненні та відновленні вузлів та деталей сільськогосподарської та іншої техніки*. *Технічні науки та технології*. № 1. С. 92–101 [in Ukrainian].
- [2] Лебедев, В. О., Лой, С. А., Матвієнко, М. В., Єрмолаєв, Г. В., & Спихтаренко, В. В. (2022). *Вивчення напруженого стану плазмових покриттів як засіб покращення якості напilenня. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції. Краматорськ–Тернопіль*. 130–131 [in Ukrainian].
- [3] Spray Nature of Thermal Coatings. URL: <http://www.gordonengland.co.uk/tsc.htm>
- [4] Handbook of Thermal Spray technology / ed. By I.R. Davis. 2d ed., ASM International. 2005. 339 p.
- [5] Лебедев, В.О., Дубовий, О.М., & Лой, С.А. (2020). *Особенности формирования (структурообразования) та властивості теплозащитных покрытий при плазмовом напilenні*. *Технічні науки та технології*. Чернівці. № 1. 39–48 [in Ukrainian].
- [6] Лебедев, В. О., & Лой, С. А. (2019). *Моделирование стойкости плазмового напilenня лопаток газотурбинных двигунів та установок. Modern question of production and repair in industry and in transport : Materials of the 19th International Scientific and Technical Seminar (February 18–23)*. Kosice, Slovak Republic, Pp. 97–99.

- [7] Лебедев, В.О., Дубовий, О.М., & Лой, С.А. (2019). Дослідження та оцінка термоциклічної стійкості плазмових ущільнюючих покриттів для вузлів газотурбінних установок. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні* № 2. 39–46 [in Ukrainian].
- [8] Лебедев, В.О., & Лой, С.А. (2020) Міцність покриттів при плазмовому напыленні робочих органів газотурбінних двигунів та установок при випробуваннях на відрив. Актуальні напрями матеріалознавства: збільшення ресурсу конструкцій на основі конвергенції сучасних технологій обробки матеріалів (24-25 вересня) 10–12 [in Ukrainian].
- [9] Pavlowski L., Wiley John & Sons Ltd (2008). *Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. 2nd ed. 656 p.
- [10] Ducos et al M. Non-Destructive Adhesion Testing of plasma-sprayed coatings using ultrasounds and laser shocks. *Proc. Of ITSC 2004*.

© Лебедев В. О., Спіхтаренко В. В., Лой С. А., Халімовський О. М.

Дата надходження статті до редакції: 16.02.2025

Дата затвердження статті до друку: 27.02.2025