

ЛЕВИНСЬКИЙ Олександр

Національний університет «Одеська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-9643-1494>

e-mail: levinskiy.a.s@gmail.com

КЕРДАНЬ Федір

Національний університет «Одеська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0009-4827-168X>

e-mail: teogof@stud.op.edu.ua

ЛАМБОВ Петро

Національний університет «Одеська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0003-1850-5998>

e-mail: vavilonua1@gmail.com

КНЯЗЄВ Олег

Національний університет «Одеська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0006-8896-3443>

e-mail: knязevolegvik@gmail.com

ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ НАПИЛЕННЯ АНТИФРИКЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ НАНОСТРУКТУРОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті представлено систематизоване дослідження інноваційних методів формування наноструктурованих антифрикційних покриттів для забезпечення зниження тертя та зносу робочих поверхонь деталей, що працюють в умовах інтенсивних навантажень, високих температур та агресивного середовища. Наноструктуроване покриття характеризується унікальними властивостями на міжфазному рівні, як то високою твердістю, зносостійкістю, корозійною стабільністю та здатністю до рівномірного розподілу механічного навантаження. Це забезпечує не лише продовження ресурсу технічних вузлів, але й зниження витрат на технічне обслуговування. Розглянуто шість основних методів нанесення покриттів: фізичне та хімічне осадження з парової фази, електрохімічне осадження, лазерне наплавлення, золь-гель синтез та розпилювальні методи. Для кожного методу описано принцип дії, діапазон керованих параметрів, а також наведено перелік цільових функцій, що використовуються при математичному моделюванні процесу. Показано, що ефективність синтезу залежить від вибору оптимального поєднання технологічних змінних, типу підкладки та функціонального призначення готового виробу. У роботі обґрунтовано доцільність багатокритеріального підходу до оптимізації процесу нанесення наноструктурованого покриття, який враховує морфологічні та фізико-механічні властивості шару, в також експлуатаційні обмеження, енергоспоживання, економічну доцільність та екологічну безпеку. Запропонована методика дозволяє адаптувати процес формування наноструктурованих покриттів до умов конкретного виробництва з урахуванням вимог стандартів безпеки, сертифікації та сталого розвитку. Результати можуть бути застосовані у високотехнологічних галузях і слугують основою для подальших досліджень у сфері наноматеріалів, машинобудування та експлуатації складних технічних систем.

Ключові слова: наноструктуровані покриття, антифрикційні матеріали, електрохімічне осадження, золь-гель метод, лазерне наплавлення, багатокритеріальна модель.

LEVYNSKYI Oleksandr, KERDAN Fedir, LAMBOV Petro, KNIAZIEV Oleg

Odesa Polytechnic National University

INNOVATIVE METHODS OF APPLYING ANTI-FRICTION COATINGS BASED ON NANOSTRUCTURED MATERIALS

The article presents a systematic study of innovative methods for the formation of nanostructured anti-friction coatings aimed at reducing friction and wear on working surfaces of components operating under intensive loads, high temperatures, and aggressive environments. Nanostructured coatings are characterized by unique interfacial properties, such as high hardness, wear resistance, corrosion stability, and the ability to evenly distribute mechanical loads. This not only extends the service life of mechanical assemblies but also reduces maintenance costs. Six primary coating deposition methods are considered: physical and chemical vapor deposition, electrodeposition, laser cladding, sol-gel synthesis, and spray coating techniques. For each method, the operating principle, the range of controllable parameters, and a list of objective functions used in mathematical modeling of the process are described. The study demonstrates that the efficiency of coating synthesis depends on selecting an optimal combination of technological variables, substrate type, and the functional purpose of the final product. The paper substantiates the relevance of a multi-criteria approach to optimizing the nanostructured coating application process, taking into account morphological and physicomaterial properties of the layer, as well as operational constraints, energy consumption, economic feasibility, and environmental safety. The proposed methodology enables adaptation of the coating formation process to specific production conditions while meeting safety, certification, and sustainability standards. The results can be applied in high-tech industries and serve as a foundation for further research in the fields of nanomaterials, mechanical engineering, and operation of complex technical systems.

Keywords: nanostructured coatings, anti-friction materials, electrodeposition, sol-gel method, laser cladding, multi-criteria model.

Стаття надійшла до редакції / Received 17.04.2026
Прийнята до друку / Accepted 19.06.2026
Опубліковано / Published 10.09.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© ЛЕВИНСЬКИЙ Олександр, КЕРДАНЬ Федір,
ЛАМБОВ Петро, КНЯЗЄВ Олег

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Розробка методів зі зменшення рівня тертя і зносу рухомих компонент є одним із ключових завдань сучасного матеріалознавства, машинобудування та авіакосмічної галузі, оскільки ці явища істотно обмежують довговічність і ефективність роботи механічних вузлів та конструкцій [1-3]. В умовах інтенсивних навантажень, високих температур та агресивного середовища поверхні деталей зазнають значного пошкодження, що зумовлює втрату функціональних властивостей та необхідність регулярного технічного обслуговування. Традиційні методи підвищення зносостійкості, як правило, супроводжуються зміною об'ємних характеристик матеріалу, що не завжди допустимо для складних та тонкостінних елементів конструкцій. У зв'язку з цим високої *актуальності* набувають інноваційні підходи з поверхневої модифікації, зокрема методи формування наноструктурованих антифрикційних покриттів, які дозволяють суттєво покращити експлуатаційні характеристики без зміни масогабаритних та вартісних параметрів виробу.

При цьому необхідно зазначити, що сучасні експлуатаційні умови на рівні постановки технічного завдання пред'являють жорсткі вимоги до поверхневих властивостей матеріалів у вузлах тертя [2, 3]. Поверхневий шар повинен не лише забезпечувати низький коефіцієнт тертя та високу зносостійкість, але й виявляти стабільну поведінку в агресивних хімічних середовищах, зберігаючи при цьому корозійну стійкість і довготривалу адгезію до основного матеріалу елемента конструкції. В умовах змінного теплового навантаження, яке характерне для багатьох галузей, як то енергомашинобудування, автомобілебудування та авіаційна промисловість, додатково висувається вимога до здатності покриття витримувати багаторазові термоциклічні коливання без втрати цілісності, утворення тріщин або розшарування. Високий рівень вимог до стабільності покриттів у цих умовах обумовлює потребу в ретельному підході до вибору не лише складу покриття, а й технології його нанесення. Це вказує на необхідність точного контролю мікроструктури поверхневого шару, яка формується у процесі напилення. Такий контроль включає оцінку морфології поверхні, рівня однорідності, ступеня окисованості, залишкових напружень, а також інших фізико-хімічних параметрів, що безпосередньо впливають на експлуатаційні характеристики покриття. Забезпечення стабільності цих параметрів є критично важливим для довготривалої та надійної роботи виробів в умовах високого навантаження та агресивного середовища.



Рис. 1. Логіко-функціональна діаграма застосування наноструктурованого антифрикційного покриття з метою підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів

Наноструктуровані покриття відкривають нові можливості для підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів за рахунок унікальних властивостей, що виникають на нанорозмірному рівні [2, 3]. Завдяки надзвичайно малій величині зерен та великій частці міжфазних меж, такі покриття характеризуються підвищеною твердістю, стійкістю до пластичної деформації, а також покращеною зносостійкістю та корозійною стійкістю. Крім того, наноструктуровані шари дозволяють досягти більш рівномірного розподілу механічного навантаження на контактній поверхні, що зменшує ймовірність виникнення мікротріщин та локальних руйнувань. Важливо, що технології створення таких покриттів забезпечують можливість

модифікації лише приповерхневого шару без зміни об'ємних властивостей основного матеріалу, що є критично важливим для деталей складної форми, елементів мікромеханіки та біомедичних імплантатів.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Результати досліджень, представлені у сучасних наукових публікаціях, вказують на те, що корозійні та трибологічні процеси істотно погіршують довговічність компонентів промислових систем, спричиняючи значні енергетичні, матеріальні та економічні втрати [3-5]. Це обумовило активний розвиток стратегій захисту поверхонь, посеред яких нанесення захисного наноструктурованого покриття є одним із найбільш перспективних напрямів [6, 7]. Проектування захисних покриттів у відповідності до конкретних умов експлуатації залишається складним завданням через вплив численних факторів, таких як товщина шару, розмір зерен, твердість та адгезія до підкладки [8-10]. При цьому зазначається, що моделювання поведінки системи «покриття-підкладка» вимагає впровадження міждисциплінарного підходу, що поєднує такі дисципліни як матеріалознавство, міцність матеріалів та електрохімія [10, 11]. Під час експлуатації наноструктуровані покриття зазнають механічних навантажень і термічних циклів, що спричиняє утворення мікротріщин та відшаровування [12-15]. Пошкодження захисного шару призводить до прямого впливу агресивного середовища або тертя на основний матеріал, що погіршує його експлуатаційні характеристики [10, 15]. При цьому слід зазначити, що ефективність промислового впровадження наноструктурованих антифрикційних покриттів визначається не лише трибологічними характеристиками, але й комплексом економічних та правових чинників, що регулюють доступність, безпечність і особливості комерціалізації відповідних технологій. З економічної точки зору, використання наноструктурованих покриттів здатне суттєво знизити витрати на технічне обслуговування обладнання завдяки зменшенню зносу і частоти регламентного обслуговування, а також підвищенню енергоефективності [10, 16]. Економічні переваги повинні бути розглянуті у контексті витрат на розробку, ліцензування та масштабування технологій напилення. Такі високотехнологічні методи як осадження за допомогою магнетронного розпилення та атомарно-шарове осадження вимагають дорогого обладнання, високої точності керування параметрами процесу та додаткової кваліфікації персоналу. У кожному конкретному випадку доцільність впровадження відповідного класу покриттів повинна оцінюватися через призму вартості життєвого циклу виробу, яка враховує не лише початкові інвестиції, але й експлуатаційні витрати, ризики відмов, вартість обслуговування та його подальшої утилізації. З правової точки зору, особливу увагу слід приділити регулюванню безпеки наноматеріалів і дотриманню галузевих стандартів. У країнах Європейського Союзу, США та Японії розроблені спеціальні нормативи щодо використання наноструктур, що можуть вступати в контакт із навколишнім середовищем. Так регламент ЄС №1907/2006 вимагає окремої реєстрації речовин у нанорозмірній формі та надання даних щодо токсичності та потенційного ризику [17]. Для виробничих підприємств це означає необхідність отримання сертифікації, забезпечення захисту працівників і валідації технологічних процесів у відповідності до вимог ISO/TR 12885:2018 та ISO 45001:2018 [18]. Таким чином, впровадження наноструктурованих антифрикційних покриттів вимагає комплексного аналізу економічної доцільності, техніко-правових обмежень та дотримання регуляторних вимог щодо безпеки, патентного захисту й відповідності міжнародним стандартам.

МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є розробка та вдосконалення методів формування наноструктурованих антифрикційних покриттів з підвищеними експлуатаційними характеристиками для застосування в умовах інтенсивного тертя, термічних навантажень та агресивного середовища. Досягнення поставленої мети передбачає послідовне вирішення наступного набору завдань:

- визначення критеріїв ефективності антифрикційних покриттів з урахуванням морфологічних, механічних та фізико-хімічних параметрів;
- обґрунтування вибору наноструктурованих матеріалів та методів їх напилення для створення стабільних і зносостійких шарів;
- розробка комплексної методики нанесення покриттів із заданими характеристиками;
- оцінка впливу технологічних параметрів процесу на мікроструктурні властивості матеріалу, а також адгезію, твердість та термостійкість покриття.

Таким чином, дослідження має комплексний характер і спрямоване на наукове обґрунтування та практичну реалізацію методів створення наноструктурованих покриттів, які забезпечують зниження зносу та подовження загального ресурсу експлуатації промислових об'єктів.

ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ ФОРМУВАННЯ НАНОСТРУКТУРОВАНОГО ПОКРИТТЯ

Як показав проведений аналіз, формування наноструктурованого покриття як технологічний та інженерний процес потребує чіткого визначення вихідних вимог до функціональних властивостей матеріалу, які мають бути досягнуті шляхом оптимального вибору методу синтезу, параметрів осадження та характеристик поверхні підкладки. У залежності від цільового призначення наноструктурованого покриття та

умов його експлуатації, застосовується широкий набір методів синтезу наноструктурованих шарів. Це включає у себе як традиційні методики, так і інноваційні підходи [19], як то:

- електрохімічне осадження (Electrodeposition Process, EDP);
- фізичне осадження з парової фази (Physical Vapor Deposition, PVD);
- хімічне осадження з парової фази (Chemical Vapor Deposition, CVD);
- розпилювальне нанесення покриття (Spray Coating, SpC);
- лазерне наплавлення (Laser Cladding, LCL);
- золь-гель метод (Sol–Gel Process, SGP).

Вибір методу синтезу наноструктурованих покриттів зумовлює необхідність багатофакторного аналізу, що враховує специфіку цільового застосування, властивості підкладки, умов експлуатації та взаємозалежність технологічних параметрів, таких як температура, склад середовища, енергетичні характеристики процесу й геометричні особливості покриття. Процес підготовки поверхні підкладки, у свою чергу включає у себе процедури очищення, знежирення, усунення оксидів і хімічну модифікацію, що дозволяє мінімізувати вплив поверхневих дефектів, знизити рівень забруднення та оптимізувати шорсткість поверхні, що визначає ступінь адгезії та однорідність нанесеного шару.

Метод CVD передбачає утворення покриття в результаті хімічних реакцій між газоподібними або пароподібними прекурсорами, які дисоціюють у безпосередній близькості до нагрітої у рамках фіксованого температурного режиму поверхні підкладки. Унаслідок цього реакційні продукти осаджуються на поверхні, утворюючи захисний шар з необхідними функціональними властивостями. Такий підхід пропонується застосовувати для нанесення покриття на металічні та керамічні матеріали, включаючи підкладки складної геометрії, завдяки здатності до рівномірного осадження в різних напрямках [20]. Ключовим технологічним параметром у методі CVD є температура підкладки T_{sub} , яка визначає швидкість хімічних реакцій, ступінь адгезії покриття до підкладки та морфологію наноструктурованого шару. Крім того, до контрольованих змінних належать такі величини як тиск у реакційній камері P_{ch} , концентрації реагентів $\{C_{\text{react}}^{(i)}\}$, швидкість подачі газової суміші v_{gas} , а також тривалість експозиції Δt_{exp} . Метод CVD характеризується низькою швидкістю росту шару осадження v_{gr} і вимагає дотримання високих температур $T_{\text{sub}} \in [600^\circ\text{C}; 1200^\circ\text{C}]$, що накладає обмеження на вибір матеріалів підкладки та ускладнює можливість його застосування при роботі з великогабаритними об'єктами. Таким чином, задача формування наноструктурованого покриття у рамках CVD може бути подана як оптимізаційна задача багатокритеріального типу, на основі наступного набору цільових функцій:

- максимізація ступеня адгезії, що виражається як $f_{\text{adh}} \rightarrow \max(f_{\text{adh}}(T_{\text{sub}}, C_{\text{react}}^{(i)}, P_{\text{ch}}))$;
- мінімізація пористості та шорсткості поверхні $f_{\text{por}} \rightarrow \min(f_{\text{por}}(v_{\text{gas}}, v_{\text{gr}}))$;
- мінімізація вартості процесу при заданій товщині шару $f_{\text{cost}} \rightarrow (f_{\text{cost}}(T_{\text{sub}}, P_{\text{ch}}, \Delta t_{\text{exp}}))$.

У залежності від способу ініціації хімічної реакції [21]: метод CVD класифікується як атмосферний (Atmospheric Pressure CVD, APCVD), низькотемпературний (Low-Pressure CVD, LPCVD), лазерний (Laser CVD, LCVD), плазово-активованій (Plasma-Assisted CVD, PACVD), плазово-підсилений (Plasma-Enhanced CVD, PECVD), а також атомно-шаровий метод (Atomic Layer Deposition, ALD). Кожна з цих модифікацій переваги відповідно точності формування наноструктурованого шару, енергоспоживання та температурного режиму.

У свою чергу, метод PVD ґрунтується на фізичному перенесенні матеріалу з твердого агрегатного стану у газоподібний за допомогою енергетичного впливу, з подальшим осадженням парової фази на поверхню підкладки. Переведення у газову фазу здійснюється за допомогою теплового випаровування, лазерної абляції, електронно-променевого нагрівання, катодного розпилення або дії високоенергетичних іонів. На відміну від CVD, у методі PVD відсутня хімічна реакція між прекурсором і підкладкою, а формування наноструктурованого шару відбувається за рахунок фізичної конденсації матеріалу на поверхні. Процес PVD, таким чином, складається з трьох основних стадій: випаровування матеріалу, перенос іонів у напрямку підкладки і конденсація осадженого матеріалу з утворенням наноструктурованого покриття [23]. Серед основних технологій PVD-осадження слід відзначити: термічне випаровування, магнетронне розпилення, імпульсне лазерне осадження та катодне дугове осадження [21, 23]. Метод PVD дозволяє формувати як неорганічні, так і деякі органічні покриття з обмеженням на рівномірність покриття поверхні об'єкта складної форми; крім того необхідність використання вакуумної камери вносить обмеження на лінійні розміри відповідного об'єкту.

Ключові технологічні параметри процесу поза T_{sub} , P_{ch} , Δt_{exp} і v_{gr} включають у себе напругу підкладки U_{sub} , що впливає на залишкові напруження та твердість наноструктурованого шару і динамічний кут осадження $\theta_{\text{gr}}(t)$, як часова функція, що дозволяє визначити показник анізотропності мікроструктури. Оптимізаційна задача формування наноструктурованого покриття в рамках PVD може бути представлена у вигляді багатокритеріального підходу на основі наступного набору цільових функцій:

- максимізація показника зносостійкості наноструктурованого шару, що виражається як $f_{\text{wear}} \rightarrow \max(f_{\text{wear}}(U_{\text{sub}}, \theta_{\text{gr}}, T_{\text{sub}}))$;
- мінімізація шорсткості поверхні, що виражається як $f_{\text{rough}} \rightarrow \min(f_{\text{rough}}(v_{\text{gr}}, P_{\text{ch}}))$;
- оптимізація товщини наноструктурованого шару (Throughput, TP) для заданого рівня продуктивності, що виражається як $f_{\text{TP}} \rightarrow f_{\text{TP}}^{\text{opt}}(v_{\text{gr}}, \Delta t_{\text{exp}})$;
- мінімізація показника залишкових напружень (Residual Stress, RT), що виражається як $f_{\text{RT}} \rightarrow \min(f_{\text{RT}}(U_{\text{sub}}, T_{\text{sub}}))$.

Окреме значення мають новітні покриття на основі фулереноподібних наноструктур, що формуються методом магнетронного розпилення. Завдяки відсутності незв'язаних хімічних зв'язків, такі покриття мають низьке водопоглинання та високий рівень хімічної інертності, що робить їх також придатними для застосування в системах магнітного зберігання даних [24].

Електрохімічне осадження також є одним із поширених методів формування металевих та сплавних покриттів з наноструктурованою морфологією [28]. В основі методу лежить електролітичне перенесення іонів металу з електроліту на поверхню провідного матеріалу підкладки, зануреної в електроліт, під дією прикладеного електричного струму. Осадження відбувається в результаті електрохімічної реакції відновлення катіонів металу на катоді. Мікроструктура, хімічний склад і топологія сформованого шару значною мірою залежать від керованих параметрів процесу, серед яких ключову роль відіграють потенціал осадження E , густина струму j , тривалість процесу Δt_{PR} , температура розчину T_{el} , концентрації активних іонів металу в розчині C_{ion} , а також рН середовища. Контроль зазначених параметрів дозволяє модифікувати товщину шару h_{gr} , лінійні розміри зерен d_{grain} , морфологію поверхні, як то гладкість і ступінь дендритності, а також текстуру кристалічної ґратки. Параметри процесу електроосадження залежать від обраного режиму проведення процедури, що дозволяє виділити такі категорії як безперервне осадження, де напруга U_0 або струм I_0 подаються постійно, та імпульсне, що базується на подачі електричних імпульсів визначеної амплітуди $\{U_{\text{imp}}^{\text{max}}, \{I_{\text{imp}}^{\text{max}}\}\}$, тривалості Δt_{imp} та частоти ω_{imp} , що забезпечує більш тонкий контроль над ростом кристалічних структур. У рамках побудови математичної моделі процесу електрохімічного осадження задачі можуть бути сформульовані у вигляді багатфакторної оптимізації, на основі наступного набору цільових функцій:

- максимізація показника однорідності шару, що виражається як $f_{\text{uni}} \rightarrow \max(f_{\text{uni}}(E, j, C_{\text{ion}}))$;
- мінімізація рівня шорсткості поверхні, що виражається як $f_{\text{rough}} \rightarrow \min(f_{\text{rough}}(d_{\text{grain}}, j, T_{\text{el}}))$;
- максимізація рівня адгезії наноструктурованого шару до поверхні підкладки, що виражається як $f_{\text{adh}} \rightarrow \max(f_{\text{adh}}(E, pH, T_{\text{el}}))$;
- оптимізація структури покриття під цільову функціональну властивість, як то твердість, зносостійкість, електропровідність, тощо.

Завдяки можливості налаштування параметрів осадження при відносно низьких температурах та атмосферному тиску, електрохімічне осадження розглядається як економічно ефективний і технологічно гнучкий метод, придатний для отримання наноструктурованих металевих та композитних покриттів на поверхнях зі складною геометрією.

Золь-гель метод ґрунтується на використанні розчинника з хімічно активним прекурсором, що надає можливість проводити процедури гідролізу та поліконденсації, внаслідок яких утворюється так звана «золь-система». У процесі повільної полімеризації золь перетворюється у гель, який піддається термічній обробці (Heat Treatment, HT) для формування наноструктурованого покриття [19, 26] з керованими і однорідними хімічними та фізичними властивостями. На характеристики покриття, сформованого за золь-гель методом, суттєво впливають такі параметри, як склад каталізатора, властивості вихідної речовини для створення золь-системи, температурний режим термічної обробки, товщина наноструктурованого шару і рівень рН середовища [28]. Водночас існують технологічні обмеження для утворення наноструктурованих покриттів золь-гель методом, що пов'язано з тенденцією до утворення мікротріщин у гелі, через які при термічній обробці відбувається дегазація, що призводить до усадки структури. [23]. Крім того, масштабування золь-гель процесу на рівні промислового виробництва супроводжується рядом недоліків, як то:

- значна тривалість технологічного циклу;
- висока собівартість синтезу вихідних реагентів;
- токсичність органічних компонентів на етапах як синтезу, так і утилізації.

З метою формалізації процесу золь-гель методу в межах побудови математичного апарату доцільно розглянути параметричну модель із цільовою функцією мінімізації внутрішніх напружень у покритті при забезпеченні заданого рівня однорідності шару. У відповідності до зазначеного підходу за основні вхідні параметри цільової функції можна обрати концентрацію прекурсора C_{pr} , температура режиму термообробки T_{HT} , тривалість гідролізу t_{hydr} , рівень рН середовища, швидкість термообробки v_{HT} , товщину наноструктурованого шару h_{gr} , рівень пористості структури ϕ_{gr} . У рамках побудови математичної моделі

золь-гель процесу задачі можуть бути сформульовані у вигляді багатофакторної оптимізації, на онові наступного набору цільових функцій:

- мінімізація рівня залишкових напружень (Residual Stresses, RS) у сформованому наноструктурованому шарі, що виражається як $f_{RS} \rightarrow \min(f_{RS}(T_{HT}, v_{HT}, h_{gr}, \phi_{gr}))$;
- мінімізація ступеня усадки та утворення тріщин у наноструктурованому шарі, що виражається як $f_{shr} \rightarrow \min(f_{shr}(C_{pr}, t_{hydr}, pH))$;
- максимізація рівня однорідності структури наноструктурованого шару, що виражається як $f_{uni} \rightarrow \max(f_{uni}(T_{HT}, C_{pr}, pH))$;
- оптимізація товщини наноструктурованого шару h_{gr} під задану функціональну властивість, таку як прозорість, бар'єрні властивості, або зносостійкість, залежно від технологічного призначення покриття.

Завдяки можливості точного керування хімічним складом прекурсору, температурним режимом та іншими параметрами термообробки, золь-гель метод у рамках дослідження розглядається як перспективний для створення наноструктурованих оксидних, композитних та функціональних покриттів на широкому спектрі підкладок, включно з об'єктами складної форми або температурної чутливості.

Лазерне наплавлення є високотемпературним методом формування наноструктурованих покриттів шляхом локального розплавлення базового матеріалу за допомогою енергії високоінтенсивного лазерного випромінювання безпосередньо на поверхні підкладки [19, 29]. У результаті утворюється щільне покриття з чітко вираженою зоною термічного впливу. Ключову роль у забезпеченні якості покриття відіграють параметри лазерного процесу, зокрема: потужність лазера P_L , швидкість подачі матеріалу v_{mat} , швидкість сканування лазерного променя v_L , діаметр плями сфокусованого променя лазерного випромінювання d_L , а також тип і гранулометричний склад вихідного порошку [30]. При дотриманні високої швидкості охолодження і високої концентрації базового металу, а також за умов автоматизації процесу технологія на основі методу лазерного наплавлення демонструє високу технологічну ефективність. Метод лазерного наплавлення забезпечує сумісність з широким спектром матеріалів, зокрема легованих сталей, нікелевих, кобальтових, титановмісних порошків та керамічних композицій. Водночас можна відзначити і технологічні недоліки, як то ймовірність утворення тріщин, неоднорідність хімічного складу шару та понижену металургійна якість покриття у разі порушення технологічного режиму [19]. Для формалізованого аналізу процесу лазерного наплавлення в межах математичного моделювання доцільно ввести додаткові параметри цільових функцій, що відображають якість сформованого наноструктурованого шару, як то ефективний час охолодження шару t_{cool} , хімічна однорідність покриття C_{chem} і рівень залишкових напружень σ_{RS} . У рамках побудови математичної моделі процесу лазерного наплавлення можуть бути сформульовані у вигляді багатофакторної оптимізації, на онові наступного набору цільових функцій:

- мінімізація залишкових напружень у шарі наноструктурованого покриття, що виражається як $f_{RS} \rightarrow \min(f_{RS}(P_L, v_L, d_L, t_{cool}))$;
- мінімізація ризику тріщиноутворення внаслідок термошоку та інших факторів, що виражається як: $f_{crack} \rightarrow \min(f_{crack}(P_L, v_L, v_{mat}))$;
- максимізація хімічної та фазової однорідності шару наноструктурованого покриття, що виражається як $f_{hom} \rightarrow \max(f_{hom}(C_{chem}, v_L, v_{mat}))$;
- оптимізація товщини покриття та глибини проникнення залежно від функціонального призначення виробу, як то захист від зносу, корозії, теплового впливу, тощо.

Завдяки високій точності, локалізованому впливу та можливості автоматизації, лазерне наплавлення вважається ефективним методом створення зносостійких, ерозійностійких та функціональних наноструктурованих покриттів у галузі авіації, енергетики, біомедичних технологій та машинобудування.

Розпилювальне нанесення покриття є технологічним процесом, у якому цільовий матеріал наноситься на поверхню підкладки шляхом імпульсного осадження, що забезпечує формування шару покриття [25]. Речовина, яка розпилюється, може перебувати у рідкому стані, а також у вигляді розплавлених або розм'якшених частинок [20]. Методи розпилювального нанесення активно застосовуються в промисловості для покриття поверхонь складної геометрії зі скла, металів, деревини, текстилю органічними лаками, смолами та функціональними зв'язувальними речовинами. Одним із найпоширеніших є термічне розпилення (Thermal Spraying, ThSP), при якому покривний матеріал нагрівається або розплавляється та наноситься на підкладку. Джерелом нагріву можуть бути електричні або хімічні процеси. У порівнянні з методами CVD та PVD, термічне розпилення дозволяє наносити покриття на підкладки великої площі з вищими швидкостями осадження. Альтернативним підходом є холодне розпилення (Cold Spraying, CSP), що дозволяє наносити покриття при значно нижчих температурах, при цьому висока швидкість зіткнення частинок з підкладкою компенсує відсутність плавлення та забезпечує необхідний рівень зв'язування. Холодно-розпилені покриття демонструють високу міцність, знижену пористість та покращену адгезію [23]. Для побудови математичної моделі процесу розпилювального нанесення покриттів доцільно враховувати такі параметри як розподіл розмірів частинок наноструктурованого покриття $\Phi(d_{part})$, швидкість подачі порошку

матеріалу v_{mat} , відстань між соплом і підкладкою Δh , швидкість частинок при розпиленні v_{part} , температурний режим процесу T_{proc} , адгезійна міцність наноструктурованого шару A_{gr} , рівень пористості структури ϕ_{gr} . У рамках побудови математичного апарату завдання можуть бути сформульовані у вигляді багатофакторної оптимізації на основі наступних цільових функцій:

- мінімізація пористості сформованого шару наноструктурованого покриття, що виражається як $f_{\phi} \rightarrow \min(f_{\phi}(\phi_{\text{gr}}, \Phi(d_{\text{part}}), v_{\text{mat}}, v_{\text{part}}, \Delta h))$;
- максимізація міцності адгезії шару наноструктурованого покриття з підкладкою, що виражається як $f_{\text{adh}} \rightarrow \max(f_{\text{adh}}(\Phi(d_{\text{part}}), T_{\text{proc}}, v_{\text{part}}))$;
- мінімізація варіацій товщини шару наноструктурованого покриття для нерівномірних поверхонь, що виражається як $f_{\text{th}} \rightarrow \min(f_{\text{th}}(v_{\text{mat}}, v_{\text{part}}, \Delta h))$;
- оптимізація функціональної структури шару наноструктурованого покриття відповідно до вимог до зносостійкості, електропровідності, теплоізоляції, тощо.

Завдяки широкому діапазону температур, можливості керування кінетикою розпилення та універсальності застосування, розпилювальне нанесення покриття, включаючи холодне та термічне розпилення, є ефективними підходами до створення наноструктурованих функціональних покриттів для транспортної, оборонної та енергетичної промисловості.

КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ НАНОСТРУКТУРОВАНОГО ПОКРИТТЯ

Проведений аналіз сучасних методів формування наноструктурованих покриттів свідчить про те, що вибір оптимальної технології нанесення та налаштування параметрів є критично важливим для досягнення заданих експлуатаційних характеристик у специфічних умовах дії агресивного середовища, механічного тертя або термічних навантажень (рис. 2).



Рис. 2. Структурно-функціональна характеристика методів синтезу наноструктурованого покриття

Представлені методи вказують на потребу у формалізованому підході до побудови системи прийняття технологічних рішень, який ґрунтується на поетапному аналізі морфологічних, механічних, термостійких і трибологічних параметрів покриття. При цьому показано, що ефективність формування захисного шару суттєво залежить від взаємодії низки змінних, включаючи склад прекурсорів, температуру, швидкість росту шару, напружено-деформований стан і властивості підкладки. З урахуванням цього, процес нанесення покриття доцільно трактувати як багатофакторну оптимізаційну задачу, у якій кожен метод має свій набір контрольованих параметрів і цільових функцій, що дозволяють узгоджено досягати таких властивостей, як однорідність, адгезія, твердість, товщина шару та пористість. Особливо важливим є врахування обмежень, накладених на матеріали підкладки (температурна стабільність, електропровідність, активність поверхні), а також специфіки подальшого функціонування виробу (наприклад, циклічне

навантаження, контакт з рідинами, термічні градієнти). У зв'язку з цим, впровадження єдиної методології, що поєднує фізико-хімічні закономірності процесів осадження з інструментами математичного моделювання, розглядається як необхідна умова для досягнення прогнозованої якості покриттів. Такий підхід забезпечує не лише підвищення довговічності конструкцій і зниження вартості їх обслуговування, але й оптимізацію виробничих витрат та адаптацію технологічних рішень до конкретних галузевих стандартів, включаючи вимоги щодо безпеки наноматеріалів, екологічної відповідальності та міжнародної сертифікації.

З огляду на широкий спектр методів формування наноструктурованого покриття, кожен з яких має власні обмеження, переваги та специфічні параметри, відповідну процедуру доцільно розглядати як складну інженерну задачу багатокритеріального типу. Такий підхід вимагає інтеграції трьох ключових складових: формалізованого опису технологічного процесу, системи цільових функцій, що відображають оптимальні експлуатаційні характеристики, та підходи з оптимізації параметрів із урахуванням обраного методу.

Таким чином, у загальному вигляді процедура формування шару наноструктурованого покриття передбачає послідовне виконання наступних завдань:

1. Визначення цільових функціональних властивостей, які мають бути реалізовані відповідно до кінцевих вимог до наноструктурованого покриття, що базуються на показниках зносостійкості, прозорості та адгезії шару покриття.

2. Вибір методу осадження, що відповідає експлуатації промислового об'єкту, типу підкладки, обмеженням температурного режиму і об'єму виробництва.

3. Побудова параметричної моделі процесу, яка включає у себе технологічні змінні (температура, тиск, швидкість подачі матеріалу, енергія впливу, тривалість осадження), властивості вихідних речовин (склад прекурсорів, гранулометрія, концентрації), характеристики підкладки (хімічна активність, електропровідність, теплофізичні властивості та ступінь обробки поверхні).

4. Формалізація задачі як багатофакторної оптимізації за допомогою системи цільових функцій виду $f_i(\vec{x}) \rightarrow \max/\min$ за умови $\vec{x} \in \Omega$, де $\vec{x}$ є вектором параметрів процесу, а Ω є областю допустимих значень з урахуванням фізико-хімічних обмежень процедури.

5. Аналіз вибору компромісу між цільовими функціями із застосуванням відповідних методів багатокритеріального прийняття рішень, таких як метод зважених коефіцієнтів, аналіз Парето-оптимальних рішень та евристичні підходи.

6. Вибір режиму роботи на основі отриманого оптимального або квазіоптимального набору параметрів та їх перевірка в експериментальних умовах.

Представлена методологія є достатньо гнучкою, що допускає підключення додаткових цільових функцій, які відображають екологічну безпеку, енергоспоживання та стабільність структури при циклічному навантаженні. При цьому запропоновані методи порівнюються не лише в межах однієї групи, але й між принципово різними підходами. Таким чином, формування наноструктурованих покриттів у сучасних умовах має розглядатися не як ізольований фізико-хімічний процес, а як оптимізована процедура, що ґрунтується на адаптивному виборі параметрів і детальній взаємопов'язаній оцінці результатів.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК УДАНОМУ НАПРЯМІ

У дослідженні проаналізовано та запропоновано комплексну методологію формування наноструктурованих антифрикційних покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів, що працюють в умовах інтенсивного тертя, термічних навантажень та агресивного середовища. Проаналізовано фізико-хімічні основи та оптимізаційні підходи до застосування ключових методів осадження, зокрема CVD, PVD, електрохімічного осадження, золь-гель процесу, лазерного наплавлення та розпилювального нанесення. Запропоновано багатокритеріальну модель вибору параметрів нанесення покриття, що враховує специфіку підкладки, морфологічні та трибологічні властивості шару, а також вимоги до його однорідності, адгезії, товщини й залишкових напружень. Узагальнено методичні підходи до формалізації задачі як процедури оптимізації із залученням відповідних цільових функцій та обмежень, що забезпечує адаптацію процесу під задані експлуатаційні умови. Отримані результати дозволяють не лише підвищити довговічність і надійність покриттів, але й знизити витрати на технічне обслуговування та забезпечити відповідність міжнародним стандартам безпеки наноматеріалів. Запропонована методологія може бути використана як база для розробки адаптивних технологічних рішень у галузях авіації, енергетики, машинобудування та біомедицини.

References

1. Ruderman, M. (2023). Compensation of friction in Motion Control. Analysis and Compensation of Kinetic Friction in Robotic and Mechatronic Control Systems, 35–48. <https://doi.org/10.1201/9781003415015-4>
2. Abdeen, D. H., El Hachach, M., Koc, M., & Atieh, M. A. (2019). A review on the corrosion behaviour of nanocoatings on metallic substrates. *Materials*, 12(2), 210. <https://doi.org/10.3390/ma12020210>
3. Kumar, R., & Sawada, S. (2025). Atomic layer deposition + parylene conformal nanocoatings for robust corrosion protection of Electronics. *IMAPSource Proceedings*, 2024(DPC). <https://doi.org/10.4071/001c.129018>.

4. Berisha, A., & Podvorica, F. (2023). Graphene and graphene oxides in anticorrosive coatings. *Carbon Allotropes*, 101–111. <https://doi.org/10.1201/9781003323976-8>
5. Pélissier, K., & Thierry, D. (2020). Powder and high-solid coatings as anticorrosive solutions for Marine and offshore applications? A Review. *Coatings*, 10(10), 916. <https://doi.org/10.3390/coatings10100916>
6. Padgurskas, J., Rukuiža, R., & Žunda, A. (2022). Evaluation of tribological and mechanical properties of carbon steel with fluoroligomeric film at Piezoelectric Actuator Contact. *Coatings*, 12(4), 463. <https://doi.org/10.3390/coatings12040463>
7. Ressel, J., Seewald, O., Bremser, W., Reicher, H.-P., & Strube, O. I. (2018). Low friction poly(amide-imide) coatings with silicones as tethered liquids. *Progress in Organic Coatings*, 124, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.07.029>
8. Ahmad Khan, Z., Latif, J., Nazir, H., Saeed, A., & Stokes, K. (2017). Predictive and prognostic modelling and simulation of coatings subject to corrosion and mechanical failures. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 6(3), 487–498. <https://doi.org/10.2495/cmcm-v6-n3-487-498>
9. Nazir, M. H., Khan, Z. A., Saeed, A., & Stokes, K. (2015). Modeling the effect of residual and diffusion-induced stresses on corrosion at the interface of coating and substrate. *Corrosion*, 72(4), 500–517. <https://doi.org/10.5006/1804>
10. Farooq, S. A., Raina, A., Mohan, S., Arvind Singh, R., Jayalakshmi, S., & Irfan Ul Haq, M. (2022). Nanostructured coatings: Review on processing techniques, corrosion behaviour and tribological performance. *Nanomaterials*, 12(8), 1323. <https://doi.org/10.3390/nano12081323>
11. Safakish, G. R. (2012). Temperature estimation in the combustion chamber of an internal combustion engine. *Advances in Mechanical Engineering*, 4. <https://doi.org/10.1155/2012/931584>
12. Du, K., Calautit, J., Wang, Z., Wu, Y., & Liu, H. (2018). A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges. *Applied Energy*, 220, 242–273. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.005>
13. Ito, Y. (2013). *Heat-resistant coating technology for gas turbines*. Handbook of Advanced Ceramics, 789–806. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385469-8.00043-5>
14. Ranjbar, Z., Modaberi, M. R., & Ashhari, S. (2024). Polymer nanocomposite films and coatings in Aerospace Applications. *Polymer Nanocomposite Films and Coatings*, 591–629. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-19139-8.00023-1>
15. Nazir, Mian Hammad, Khan, Z. A., & Saeed, A. (2018). A novel non-destructive sensing technology for on-site corrosion failure evaluation of coatings. *IEEE Access*, 6, 1042–1054. <https://doi.org/10.1109/access.2017.2777532>
16. Pietschmann, J. (2024). *Industrial Powder Coating: Basics, methods, practical application*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-37592-8>
17. Європейський Парламент та Рада Європейського Союзу. (2024). *Про реєстрацію, оцінку, авторизацію і обмеження хімічних речовин та препаратів*. Регламент (ЄС) № 1907/2006 від 18.12.2006. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=67690
18. ISO/TR 12885:2018. *Nanotechnologies -- Health and safety practices in occupational settings*. (2018). <https://www.evcs.ee/en/iso-tr-12885-2018>
19. Gu, Y., Xia, K., Wu, D., Mou, J., & Zheng, S. (2020). Technical characteristics and wear-resistant mechanism of Nano Coatings: A Review. *Coatings*, 10(3), 233. <https://doi.org/10.3390/coatings10030233>
20. Capeletti, L. B., & dos Santos, J. H. (2016). Optical sensor coating development for industrial applications. *Industrial Applications for Intelligent Polymers and Coatings*, 537–552. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26893-4_25
21. Ulbani, S.I. (2022). Polyethylene stability for structures using chemical and physical vapor deposition. *Earth & Environmental Science Research & Reviews*, 5(1). <https://doi.org/10.33140/eesrr.05.01.04>
22. Baptista, A., Silva, F. J. G., Porteiro, J., Míguez, J. L., Pinto, G., & Fernandes, L. (2018). On the physical vapour deposition (PVD): Evolution of magnetron sputtering processes for industrial applications. *Procedia Manufacturing*, 17, 746–757. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.125>
23. Nguyen-Tri, P., Nguyen, T. A., Carriere, P., & Ngo Xuan, C. (2018). Nanocomposite coatings: Preparation, characterization, properties, and applications. *International Journal of Corrosion*, 2018, 1–19. <https://doi.org/10.1155/2018/4749501>
24. Goyenola, C., Stafström, S., Hultman, L., & Gueorguiev, G. (2012). Structural patterns arising during synthetic growth of fullerene-like Sulfolcarbene. *The Journal of Physical Chemistry C*, 116(39), 21124–21131. <https://doi.org/10.1021/jp307347t>
25. Yilmaz, O., & Yorgancioglu, A. (2019). Nanocoatings. *Polymeric Nanomaterials in Nanotherapeutics*, 299–331. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813932-5.00008-x>
26. Boumaza, S., Boudjellal, L., Brahimi, R., Belhadi, A., & Trari, M. (2020). Synthesis by citrates sol-gel method and characterization of the perovskite lafeo3: Application to oxygen photo-production. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 94(2), 486–492. <https://doi.org/10.1007/s10971-020-05275-2>
27. Claire, L., Marie, G., Julien, G., Jean-Michel, S., Jean, R., Marie-Joëlle, M., Stefano, R., & Michele, F. (2016). New architected hybrid sol-gel coatings for wear and corrosion protection of low-carbon steel. *Progress in Organic Coatings*, 99, 337–345. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.06.015>
28. Osaka, T., Komaba, S., & Momma, T. (2010). Conductive polymers: Electroplating of organic films. *Modern Electroplating*, 421–432. <https://doi.org/10.1002/9780470602638.ch16>
29. Koti, D., Powell, J., Naesstroem, H., & Voisey, K. T. (2023). Powder catchment efficiency in laser cladding (directed energy deposition). an investigation into standard laser cladding and the ABA cladding technique. *Journal of Laser Applications*, 35(1). <https://doi.org/10.2351/7.0000904>
30. Zou, Y., Ma, B., Cui, H., Lu, F., & Xu, P. (2020). Microstructure, wear, and oxidation resistance of nanostructured carbide-strengthened cobalt-based composite coatings on Invar alloys by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 381, 125188. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125188>