

doi: 10.32620/oikit.2025.104.05

УДК 621.793

Д. Р. Степаненко, Є. О. Баранова, О. О. Баранов

Комбіновані технології PVD-методів осадження покриттів: від класифікації до інноваційних рішень

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

У статті представлено системний аналіз сучасних методів фізичного осадження з парової фази (PVD), спрямований на вдосконалення технологій нанесення функціональних покриттів для інженерних застосувань. Узагальнено ключові недоліки базових методів – таких як термічне випаровування, катодне та магнетронне розпилення – що обмежують їх ефективність у складних виробничих умовах. Серед основних проблем, що аналізуються: нерівномірне випаровування мішені, низька продуктивність, перегрів мішені, недостатня адгезія покриттів, а також ризик утворення дугових розрядів у плазмі. Для подолання цих обмежень розглянуто сучасні модифікації класичних PVD-процесів, зокрема імпульсне магнетронне розпилення високої потужності (HIPIMS), незбалансоване магнетронне розпилення, іонну імплантацію з осадженням за допомогою плазми (PIIID), а також методи з високочастотним живленням. На основі критичного аналізу сформовано аналітичну схему класифікації методів PVD, яка відображає як структурні особливості підходів до випаровування та розпилення, так і логіку їх еволюції у відповідь на конкретні технологічні виклики. Запропонована схема дозволяє виявити внутрішні зв'язки між традиційними та інноваційними методами та слугує основою для подальшої розробки комбінованих процесів осадження, здатних забезпечити високу якість, щільність, адгезію та зносостійкість покриттів. Схема також підкреслює ключову роль магнітних полів у вдосконаленні процесів розпилення, зокрема у магнетронному та незбалансованому магнетронному режимах, де магнітне обмеження електронів дозволяє досягти високого ступеня іонізації плазми та ефективнішого контролю над енергетикою осаджуваних частинок. Включення імпульсних режимів живлення, як у випадку HIPIMS, забезпечує можливість формування щільних, високоміцних покриттів з покращеною адгезією без необхідності високотемпературного підігріву підкладки. Таким чином, запропонована аналітична схема не лише структурує сучасні технології осадження, але й відкриває можливості для їх стратегічного вдосконалення на основі аналізу фізичних механізмів, що лежать в основі кожного методу. У роботі також акцентовано увагу на необхідності інтеграції різних методів осадження для досягнення синергійного ефекту, зокрема через поєднання методів іонізації, управління плазмою та контрольованого теплового впливу. Отримані результати можуть бути використані як методологічна основа для конструювання нових гібридних систем PVD-осадження в умовах концепції Індустрії 4.0 та адаптивного виробництва.

Ключові слова: фізичне осадження з парової фази (PVD), плазма, обробка поверхні, комбіновані методи формування покриттів.

Вступ

Захист поверхонь шляхом формування спеціальних покриттів є одним з пріоритетних напрямків розвитку матеріалознавства та технічних інновацій [1]. Найбільш поширені сучасні методи формування покриттів для різноманітних застосувань відносяться до однієї з двох груп: методу хімічного осадження з парової фази (Chemical Vapor Deposition – CVD) або методу фізичного осадження з парової фази (Physical Vapor Deposition – PVD) [2, 3]. Дослідження останніх десятиліть показали, що можливості індивідуальних методів досягли максимуму своєї ефективності застосування, тому перспективним є шлях комбінування різних методів з метою уникнення недоліків окремих методів та збереження їх переваг [4].

Метод хімічного осадження з парової фази (CVD) дозволяє формувати високоякісні покриття завдяки хімічним реакціям, що відбуваються під впливом контрольованих параметрів температури, тиску та складу робочого середовища [5, 6]. Основними перевагами технології є можливість осадження покриттів на поверхні складної геометрії, висока продуктивність процесу завдяки обробці великих партій виробів, а також здатність отримання плівок значної товщини [7]. Водночас одним із суттєвих обмежень методу є необхідність високотемпературного режиму роботи реактора, що не дозволяє застосовувати його для матеріалів, чутливих до термічної деструкції або структурних змін [8]. Окрім цього, значним недоліком CVD-покриттів є наявність високого рівня залишкових напружень, зокрема розтягувального типу, які можуть призводити до зниження механічної стабільності покриття та виникнення тріщин [9]. Визначення внутрішньосферних і міжсферних градієнтів напружень є складним і чутливим до методичних похибок завданням, що потребує застосування спеціалізованих підходів. Варто зазначити, що залишкові стискальні напруження, навпаки, здатні покращити експлуатаційні характеристики покриттів, зменшити ризик їх відшарування та підвищити довговічність інструментального оснащення [10].

За даним напрямком проводять багато досліджень для виявлення ефективних комбінацій матеріалів шарів та товщини покриттів, котрі мають високі експлуатаційні характеристики і підвищують працездатність елементів та обладнання. Наприклад, у роботі [11] досліджено механічну обробку з видаленням стружки для високотехнологічних матеріалів авіакосмічної промисловості або тугоплавких металів, де різальні інструменти потребують покриття з високою стійкістю до зношування. Показано, що покриття CVD TiN-TiB₂ має високу твердість та адгезію, а також залишкові стисні напруження, що забезпечують захист ріжучих кромek та збільшує міцність інструментів у цілому.

Фізичне осадження з парової фази (PVD) – це процес отримання матеріалу з твердого джерела (мішені) за допомогою теплової енергії або за рахунок розпилення атомів мішені високоенергетичними частинками [12]. Вивільнення атомів з матеріалу мішені під час процесу випаровування відбувається за допомогою таких методів, як термічне випаровування, випаровування електронним променем (Electron Beam PVD – EEB-PVD) або емісії на основі катодної дуги (Cathodic Arc Vapor Deposition) [13]. Загальною рисою цих методів є підведення тепла в кількості, достатній для емісії матеріалу внаслідок його розігріву, що відбувається в умовах термодинамічної рівноваги. Випаруваний матеріал в атомарній або молекулярній формі утворює потік осадження, спрямований на певну деталь (підкладку), де конденсується з утворенням покриття. Параметри потоку осадження впливають на мікроструктуру та морфологію плівки, а відтак — на її хімічний склад, щільність, оптичні властивості, внутрішнє напруження, питомий електричний опір, шорсткість тощо. Методи PVD мають свої недоліки, зокрема формування дефектів мікроструктури, що можуть виникати внаслідок заростання топографічних нерівностей (ямek, шорсткостей тощо) на поверхні підкладки або через наявність сторонніх часток різного походження (пил, сміття, лусочки). Все це впливає на якісні характеристики покриттів, такі як зносостійкість, корозійна стійкість та окислювання [14]. Для розширення діапазону регулювання параметрами потоку осадження широко застосовують плазму [15], яка є квазинейтральною сумішшю заряджених частинок (іонів і електронів) і дає можливість синтезувати метастабільні сполуки, які неможливо отримати в умовах термодинамічної рівноваги, що є неодмінною

ознакою методів CVD.

Історично першим методом використання плазми в технологічних процесах було катодне розпилення, яке не потребує плавлення основного матеріалу і не призводить до викиду крапель матеріалу на деталь-підкладку, що можна розглядати як певні переваги цього методу [16]. Суть методу полягає у створенні плазми між двома електродами — катодом, під'єднаним до негативного потенціалу, і анодом, під'єднаним до позитивного потенціалу джерела електричного живлення (позитивний електрод зазвичай одночасно під'єднаний до «землі»). Катодне розпилення характеризується високою адгезією та механічною стабільністю, при цьому зберігає хімічний склад вихідного матеріалу та стехіометрію, а також однорідність кристалічної структури [17]. Однак через відносно високі тиски газів (10...100 Па), які мають бути у технологічній камері при нанесенні, швидкість росту покриттів є досить низькою внаслідок зіткнень розпилених атомів з атомами і молекулами газової фази. Для зменшення тиску та збільшення швидкості нанесення покриття використовується метод магнетронного розпилення. Суть цього методу полягає у створенні такого магнітного поля у проміжку між катодом і анодом (розрядний проміжок), яке впливає на рух електронів і дозволяє значно подовжувати їх рух від катоду до аноду внаслідок того, що вони рухаються по складній спіральній траєкторії замість прямої лінії, як в умовах відсутності магнітного поля [18]. Така траєкторія дозволяє знизити тиск робочого газу в камері внаслідок компенсації зниження газу подовженням довжини пробігу електронів. Слід зауважити, що, незважаючи на значне підвищення щільності плазми у магнетронному розряді у порівнянні зі звичайним катодним розрядом, ступінь іонізації матеріалу, що був розпилений з мішені-катоду, є незначною (зазвичай < 10 %). Водночас низка експериментів довела, що іони розпиленого матеріалу створюють набагато більш щільні конденсати на поверхні деталей-підкладок. Для збільшення потоку іонів у плазмі та потоку осадження використовують метод іонізованого фізичного осадження з парової фази (Ionized Physical Vapor Deposition – IPVD)» [19]. Зазвичай система IPVD складається з магнетронної плазми постійного або змінного струму та вторинної плазми високої щільності, яка утворюється додатковим радіочастотним джерелом живлення. В іншому методі використовується порожнистий катод, конструкція якого утворює систему з багатократним відображенням електрону від електростатичного шару катоду, і таким чином також подовжує рух електрона у газі [20]. Перевагою порожнистого катоду є простота конструкції. Але при використанні плазми високої щільності постає інша проблема – перегрів катоду і необхідність забезпечувати відведення тепла. Щоб запобігти руйнуванню мішені-катоду, додатково з охолодженням водою застосовується схема імпульсного електричного живлення катоду, яка застосовується у методі імпульсного магнетронного розпилення (High-Power Impulse Magnetron Sputtering – HiPIMS) [21]. Цей метод дозволяє підвищити іонізацію розпиленого з мішені матеріалу та покращити температурний режим мішені, а також збільшити спектр використовуваних матеріалів за рахунок використання матеріалів, які не є провідниками електричного струму. Незважаючи на переваги магнетронних методів, використання магнітного поля призводить до ще однієї проблеми – нерівномірної утилізації матеріалу мішені, оскільки типовий трек розпилення на поверхні мішені являє собою траншею, яка охоплює тільки незначну (< 60 %) частину поверхні. Щоб уникнути цього, використовують незбалансований магнетрон (Unbalanced Magnetron Sputtering –

UBMS), у якому інтенсивність магнітного поля у центральній та периферійних частинах мішені спеціально регулюється [22].

В рамках методів осадження покриттів окремо від методів утворення потоку осаджуваного матеріалу розглядають методи забезпечення адгезії. Для всіх методів осадження покриттів суттєвою є проблема забезпечення адгезії утвореного покриття з поверхнею деталі-підкладки, яка характеризується зусиллям, яке необхідно прикласти для відриву покриття. За умови використання плазми у якості джерела матеріалу осаджуваних потоків, покращення адгезії покриття досягається шляхом подавання постійного, змінного або імпульсного електричного живлення на підкладку, що дозволяє додати значну енергію до іонів плазми, у чому полягає суть методу конденсації з іонним бомбардуванням (КІБ) (Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition – PIID) [23]. Цей метод має високу ефективність для модифікації поверхні металів, напівпровідників, кераміки та полімерних матеріалів, що широко використовується в авіонавігації, оптиці, біомедицині та електроніці [24]. Нанесення покриття із застосуванням цього методу дозволяє активувати широкий спектр плазмохімічних процесів на поверхні утворення конденсату, сприяє розриву зв'язків і процесу рекомбінації у хімічній структурі матеріалу і, як наслідок, викликає зміни в його хімічних, оптичних, механічних, біологічних і трибологічних властивостях. Додатковою перевагою методу КІБ (PIID) є екологічна безпека [25]. Слід зазначити, що ступінь модифікації поверхні критично залежить від хімічної чистоти та щільності плазми, параметрів джерел живлення (потужності, частоти), тиску та хімічного складу газу, характеристик імпульсу у разі застосування (амплітуди, довжини і частоти повторення) [26].

Основний акцент у роботі зроблено на аналізі іонно-плазмових методів осадження покриттів із забезпеченням високої адгезії з метою розробки перспективної схеми, яка дозволяє комбінувати переваги окремих методів та усувати їх недоліки. Для реалізації цієї мети виконано детальний огляд фізичних процесів, які забезпечують реалізацію технологічних методів.

Основний матеріал

Як відомо, в природі найпоширенішим способом утворення плазми є вплив високої температури, що реалізується, наприклад, у надрах зірок. При цьому високотемпературний газ піддається іонізації через кінетичну енергію хаотичного руху частинок газу. За умови теплової рівноваги ступінь іонізації газу можна розрахувати за допомогою рівняння Саха [27]:

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2,4 \cdot 10^{21} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-U_i/kT}, \quad (1)$$

де n_i і n_n – щільність іонізованих та нейтральних атомів (м^{-3}), відповідно, T – температура газу (К), K – постійна Больцмана ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К), U_i – енергія іонізації газу, Дж.

Оскільки енергії порядку 1 еВ відповідають температурам приблизно 11600 К, значна іонізація газового середовища за термічним механізмом не є ефективною при температурах, нижчих за кілька тисяч кельвінів. У зв'язку з цим, у технологічних системах для створення плазми застосовуються альтернативні методи, зокрема такі, що не потребують високотемпературного нагріву. Найменша енергія, необхідна для виривання електрона з твердого тіла, відома як робота виходу $e\phi$ [27]. Енергія, здатна викликати електронну емісію, може

надходити у вигляді теплової, фотонної, потенціальної (внутрішньоатомної або іонної) чи кінетичної складової.

Одним з ефективних шляхів є фотоемісія, яка виникає при опроміненні поверхні фотонами з енергією, вищою за роботу виходу $h\nu > e\phi$. У цьому випадку електрон не лише покидає поверхню, але й отримує надлишкову кінетичну енергію. Однак генерація електрон-іонних пар за таким механізмом обмежується необхідністю застосування ультрафіолетового або короткохвильового випромінювання. Значну роль у створенні вторинних електронів відіграють частинки з високим внутрішнім енергетичним потенціалом – іони та метастабільні атоми. Під час рекомбінації позитивного іона на поверхні вивільнюється енергія, еквівалентна потенціалу іонізації eV_i . Якщо сумарна енергія іона перевищує подвоєну роботу виходу ($\frac{1}{2}Mv^2 + eV_i \geq 2e\phi$), може виникнути явище вторинної електронної емісії.

Найпоширенішим методом генерації плазми у прикладних системах є іонізація електронним ударом. У цьому процесі електрон з достатньою кінетичною енергією взаємодіє з нейтральною частинкою – атомом або молекулою – утворюючи електрон-іонну пару. Найпростішу реалізацію такого процесу забезпечує система з двох електродів, під'єднаних до джерела постійного струму. При відповідному тиску та хімічному складі газу, а також під дією прикладеної напруги між електродами виникає електричний розряд, що супроводжується утворенням плазми.

Вольт-амперна характеристика такої системи має типовий вигляд, що демонструє стадії розряду – від темного до тліючого та дугового (Рис. 1, [28]). Аналіз фізики цих стадій дозволяє глибше зрозуміти механізми, що лежать в основі процесів катодного розпилення, а також дає змогу оптимізувати умови для одержання покриттів із заданими властивостями.

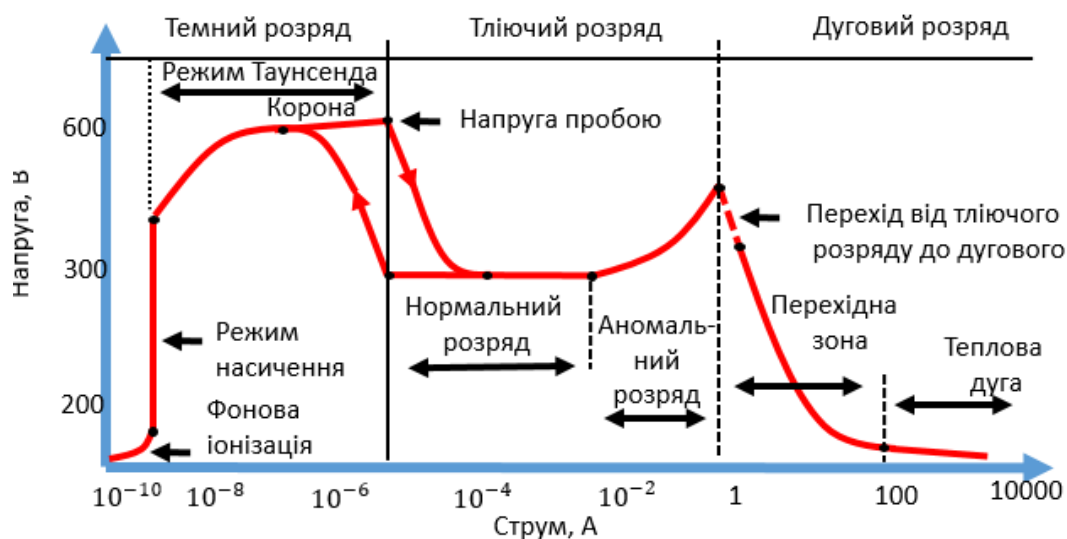


Рис. 1. Вольт-амперна характеристика розряду

Рисунок 1 ілюструє типову вольт-амперну характеристику газового електричного розряду, яка відображає зміну напруги між електродами в залежності від струму в міжелектродному проміжку. Графік поділяється на три основні області: темний розряд, тліючий розряд і дуговий розряд, кожна з яких

відповідає окремому режиму взаємодії плазми з електродами.

У зоні темного розряду виділяють режим фонові іонізації, насичення, та режим Таунсенда. Тут іонізація середовища відбувається за рахунок одиничних іонізаційних актів без видимого світіння плазми. Подальше зростання напруги призводить до пробію та утворення тліючого розряду. Прикладом застосування розряду Таунсенда є формування покриття складної архітектури з гідрофільним ефектом, коли покриття осаджується на скло для запобігання утворення конденсату на дзеркалах [29]. Важливим для процесу відштовхування рідини є співвідношення складових для покриття тетраметилциклотетрасилоксану (TMCTS) і закису азоту (N_2O), що дозволяє отримати однорідний розряд Таунсенда для широкого діапазону концентрацій. Коронний розряд зазвичай формують за допомогою гострої геометричної поверхні електрода, форма якого суттєво впливає на параметри плазми [30]. Взагалі, проведені вимірювання ВАХ таунсендівського режиму в мкА-мА діапазоні виявили процеси формування просторового заряду, які можуть мати складну поведінку, що значно впливає на значення пробійної напруги [31].

У свою чергу, тліючий розряд поділяється на нормальний та аномальний режими. У нормальному режимі напруга залишається практично сталою при зростанні струму, що свідчить про стабільну іонізацію і рівномірне покриття катодної поверхні. У аномальному режимі струм перевищує здатність катоду до компенсації витрат зарядів, що спричиняє підвищення напруги. Подальше зростання струму переводить систему в перехідну зону, де виникають нестабільності, які завершуються переходом до дугового розряду. Дуговий режим характеризується низькою напругою (кілька десятків вольт), але дуже високою густиною струму, що призводить до значного локального нагріву – формування теплової дуги.

Наведена характеристика має ключове значення для аналізу та оптимізації технологічних процесів, зокрема катодного розпилення, оскільки дозволяє вибрати параметри, при яких розряд буде стабільним, іонізація – ефективною, а умови осадження – керованими. Зокрема, робота у межах тліючого розряду, особливо в нормальному режимі, є найбільш доцільною для формування якісних покриттів у магнетронних системах.

На відміну від темного розряду, тліючий розряд має значно ширшу сферу застосування у галузі технології [32]. Тліючий розряд також формується у вакуумній камері за допомогою спеціального устаткування. На початковому етапі катод і анод розташовують на відстані d один від одного і приєднують до джерела електричного живлення з метою утворення між ними напруги U_s . Після етапу створення попереднього вакууму (форвакууму) камеру наповнюють робочим газом, який при тиску P буде застосовуватися для генерації плазми. При досягненні певного рівня електричної напруги U_p настає швидка стадія електричного пробію, яка переходить в етап формування стаціонарного розряду. Напруга пробію залежить від тиску газу та відстані електродів, що описується законом Пашена [33]. Стаціонарний розряд утворює плазму, яка може світитись різними кольорами, що залежать від робочого газу, тиску та параметрів розряду. Однією зі складових плазми є заряджені частинки — іони, які мають високу енергію і здатні при взаємодії з твердим тілом активувати емісію електронів та нейтральних атомів. Під час взаємодії плазми тліючого розряду з твердим тілом електрони емітуються внаслідок вторинної електронної емісії [34], коли іони плазми, прискорені в електричному полі біля катоду, спричиняють емісію

електронів із твердого тіла. Для охарактеризування цього типу емісії використовують коефіцієнт вторинної електронної емісії, який залежить від матеріалу іонів плазми і матеріалу іонів. Наприклад, емпірична формула для опромінення чистої поверхні різними іонами описується залежністю [35]:

$$\gamma_{see} = 0,032(0,78\varepsilon_{iz} - 2\phi), \quad (2)$$

де ε_{iz} – енергія іонізації бомбардуючого іона (еВ), ϕ – робота виходу поверхні мішені (еВ).

При вибиванні електронів з металів цей коефіцієнт значно менший одиниці.

Умова пробігу розряду постійного струму має наступний вигляд [36]:

$$\alpha d = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma_{see}} \right), \quad (3)$$

де α – перший коефіцієнт Таунсенда, який є складною функцією тиску та прискорювального електричного поля E , і який можна описати наступною формулою:

$$\alpha = \frac{const}{\lambda_{inel}} \exp \left(-\frac{\varepsilon_{iz}}{E\lambda_{inel}} \right), \quad (4)$$

де λ_{inel} – середня довжина вільного пробігу для непружних (переважно іонізаційних) зіткнень електронів з атомами або молекулами газу, E – електричне поле, ε_{iz} – енергія іонізації.

При підтримці великого тиску відбувається ефективне використання енергії електронів для іонізуючих зіткнень при русі від катоду до аноду, і наступне рівняння дозволяє знайти концентрацію плазми у стаціонарному режимі [37]:

$$\frac{dn_e}{dt} = n_e n_a K_{iz} - \frac{2\phi w}{l}. \quad (5)$$

Потік заряджених частинок, що залишають плазму в планарній геометрії, визначається як:

$$\phi_w = h_1 n_0 u_B, \quad (6)$$

де n_0 – густина плазми в центрі розряду, u_B – Бомовська швидкість $u_B = (kT_e/M)^{1/2}$, h_1 – відношення щільності плазми біля електродів і у центрі розряду:

$$h_1 \approx 0,86 \left[3 + \frac{l}{2\lambda_i} + \frac{T_i}{5T_e} \left(\frac{l}{\lambda_i} \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (7)$$

де l – відстань між електродами, M – маса іона, T_i , T_e – температури іонів і електронів відповідно, λ_i – довжина вільного пробігу іона між зіткненнями з нейтральними частками, яка залежить від тиску.

Перший доданок домінує при низькому тиску ($\lambda_i \gg l$), другий доданок – при середньому тиску ($\lambda_i \approx l$), а останній – при високому тиску ($\lambda_i \ll l$). Таким чином, у низько-температурній плазмі, що використовується в технологічних установках, особливе значення має поведінка електронів.

Схематичне зображення пристрою для збудження та підтримки тліючого розряду зображене на рисунку 2.

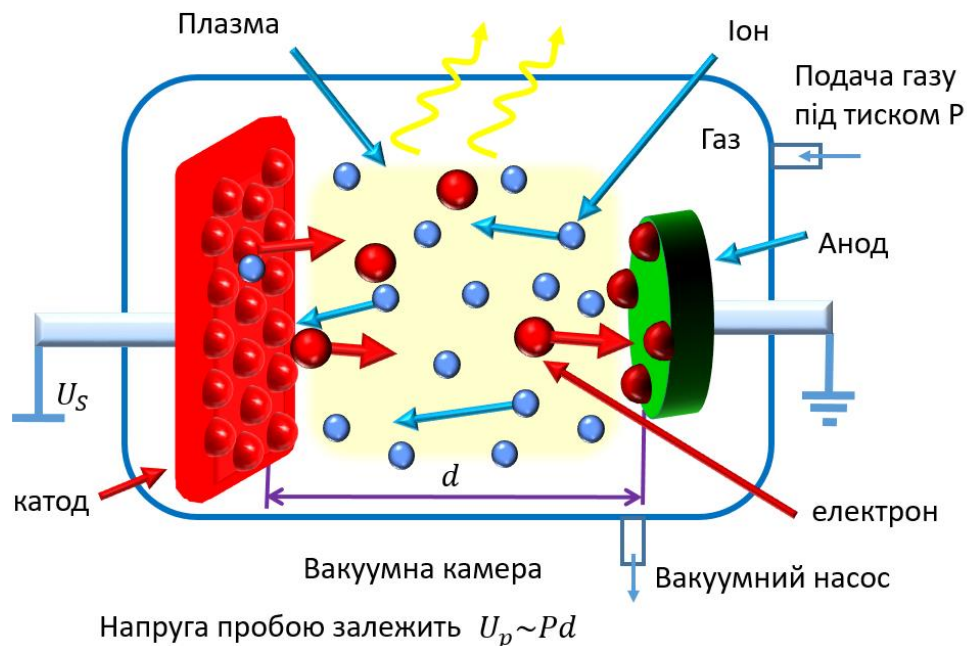


Рис. 2. Схематичне зображення пристрою для збудження та підтримки тліючого розряду

Незважаючи на більш ніж сторічну історію досліджень тліючого розряду, нові області його застосувань виникають, і багато питань є дискусійними. Для зниження втрат плазми на стінках реактору можливе використання аксіального магнітного поля. Але це впливає на параметри тліючого розряду і збільшує напругу пробою розряду [38]. Щільність плазми зростає зі збільшенням магнітного поля при низькому тиску, а при високому тиску густина плазми зменшується. Густина плазми збільшується зі збільшенням розрядної відстані в слабкому магнітному полі і зменшується при збільшенні відстані в сильному магнітному полі. Проведені дослідження провідності проміжку у рідині в тліючому розряді постійного струму атмосферного тиску [39]. Для чисельного моделювання самоорганізованого мікро-тліючого розряду в гелії [40] використовували рівняння Пуассона, рівняння збереження щільності потоку, транспорту та реакції для одного виду іонів та електронів, припускаючи певні наближення щодо дифузії та локального поля. Цікаво, що при переході між режимами формувались самоорганізовані, симетрично впорядковані візерунки однакового розміру. Методами поляризаційної спектроскопії Штарка була досліджена динаміка наносекундного імпульсного розряду в гелії при 16 кПа між металевими електродами [41]. Зображення з роздільною здатністю в часі вказує на перехід розряду від слабкосвітлого, дифузного фронту іонізації до тліючої структури, спрямованої на катод. Вимірювання електричного поля показує зростання просторового заряду біля катода, що узгоджено з моделюванням. Об'ємний заряд генерується протягом 20-30 нс за рахунок підвищеної швидкості іонізації та збільшеного електричного поля. Зміна розміру оболонки та густини струму веде до подальшого збільшення електричного поля на катоді. На момент, коли іонізація найсильніша біля катода, поблизу анода спостерігається нестабільність з утворенням ниткоподібних структур, які ростуть до катода. Щодо впливу на формування поверхневих структур, при інтенсивному іонному бомбардуванні

методом PVD формуються дефекти та стискаючі напруги в плівці, що призводить до більшої твердості [42]. Це стосується першого покоління PVD-покриттів (TiN, Ti(CN), ZrN) які використовувались на різцях з помірними умовами різання; при підвищеній швидкості різання підвищується термічне навантаження і залежна від напруги складова твердості втрачається. Наступне покоління покриттів було спрямоване на розширення діапазону функціональної твердості для розширення умов різання металу. Це покриття з термічно стабільними потрійними або четверними шарами, а також наноструктурними сполуками (TiAlN, TiZrN, CrN, TiB₂). При цьому вплив параметрів іонної обробки на поверхню є предметом інтенсивного вивчення і на теперішній час. До недоліків тліючого розряду можемо віднести необхідність підтримки високого тиску (приблизно 100 Па), відсутність роздільного керування струмом та енергією іонів, схильність до переходу до дугового розряду, малу щільність плазми.

Отже, на основі тліючого розряду був розвинений метод катодного розпилення, який є одним з ключових процесів у виробництві покриттів та тонкоплівкових матеріалів. При обробці поверхні плазмою за допомогою тліючого розряду широке застосування отримав порожнистий катод, в якому утримується плазмовий розряд і геометрична структура якого призначена для відбиття електронів від електростатичного шару, пов'язаного зі стінками катоду. Це дозволяє отримати більшу густину в порівнянні з тліючим розрядом, коли підсилення концентрації плазми відбувається через електростатичне віддзеркалення вторинних електронів на його шляху від місця емісії на поверхні катоду до анода. Завдяки конструктивним особливостям катоду, енергія електронів використовується набагато ефективніше. Електрони, отримані в результаті іонного бомбардування катода (або внаслідок термоелектронної емісії з нагрітого катода) описуються як граничні (або «гарячі») електрони, що коливаються між зарядженими стінками катода і створюють плазму, яка містить «холодні» електрони. Відомі також і промислові пристрої для іонної імплантації та осадження за допомогою плазми, в яких електростатичне утримання електронів здійснюється за допомогою розряду з порожнистим катодом [43]. При цьому значно збільшується потік плазми, що спрямовується з тліючого розряду на підкладку. У запропонованих теоретичних моделях такого розряду [36, 37] «гарячі» електрони генеруються через іонне бомбардування двох пластин, і ці електрони прискорюються електричним полем плазмового шару біля поверхні катоду і прямують до іншої стінки, де відбиваються, таким чином коливаючись між стінками. Для ефективної генерації такого розряду розрядний проміжок L між стінками має бути меншим за довжину релаксації енергії електронів:

$$\lambda_{er} = \lambda_{el} \left[\frac{2m}{M} + \frac{v_{ee}}{v_m} + \frac{2}{3} \left(\frac{e\varepsilon_{ex}}{kT_e} \right) \frac{v_{ex}}{v_m} + \frac{2}{3} \left(\frac{e\varepsilon_{iz}}{kT_e} \right) \frac{v_{iz}}{v_m} + 3 \frac{v_{iz}}{v_m} \right]^{-1/2}, \quad (8)$$

де λ_{el} – довжина вільного пробігу пружних електрон-атомних зіткнень; $\frac{2m}{M}$ – частка втрат енергії електронів через пружні зіткнення та відповідне нагрівання фонового газу; $\frac{v_{ee}}{v_m}$ – частка втрат енергії електронів на електрон-електронні кулонівські зіткнення; $\frac{2}{3} \left(\frac{e\varepsilon_{ex}}{kT_e} \right) \frac{v_{ex}}{v_m}$ та $\frac{2}{3} \left(\frac{e\varepsilon_{iz}}{kT_e} \right) \frac{v_{iz}}{v_m}$ – частка втрат енергії електронів на іонізацію та збудження, відповідно; $3 \frac{v_{iz}}{v_m}$ – частка втрат енергії на границях плазми; v_{ee} , v_m , v_{ex} , v_{iz} – частоти електрон-електронних зіткнень,

електрон-атомних пружних зіткнень, збудження та іонізації, відповідно.

Автори [44] досліджували покриття (CrAl,Al)N та (Cr,Al)ON, нанесені методом високошвидкісного фізичного осадження з парової фази, що базується на розряді з порожнистим катодом. Експериментально підтверджена перевага даного методу – висока швидкість осадження. Розглядався вплив параметрів процесу на морфологію покриття, швидкість осадження та фазовий склад. В результаті можливо ефективно синтезувати покриття товщиною більше 35 мкм за швидкості осадження близько 20 мкм/год, що дійсно є високим показником.

При нанесенні покриття, важливим параметром є показник ступеню іонізації плазми. Для покращення даного показника виник метод іонізованого фізичного осадження з парової фази IPVD. В роботі [19] представлена проста модель іонізації металу. Рівняння балансу частинок у стаціонарному стані для іонів металу має вигляд:

$$k_{miz}n_en_M + k_p n_{Ar^*} n_M = \frac{n_{M^+}}{\tau_{M^+}}, \quad (9)$$

де n_M – густина нейтральних атомів металу, n_{M^+} – густина іонів металу, n_{Ar^*} – густина метастабільних атомів Ar

τ_{M^+} – час життя іонів металу в розряді і визначається коефіцієнтом амбіполярної дифузії іонів металу.

Баланс частинок для генерації та втрати метастабільних атомів Ar можна описати наступним чином:

$$k_{ex}n_en_{Ar} = n_{Ar^*} \left[k_{iz^*}n_e + k_p n_M + \tau_{Ar^*}^{-1} \right] \equiv \frac{n_{Ar^*}}{\tau}, \quad (10)$$

де k_{iz^*} – коефіцієнт іонізації, $\tau_{Ar^*}^{-1}$ – час життя збудженого стану атому Ar.

Частку іонів металу в розряді подано як:

$$\frac{n_{M^+}}{n_M + n_{M^+}} = \frac{(k_{miz} + k_p k_{ex} \tau n_{Ar}) \tau_{M^+} + n_e}{1 + (k_{miz} + k_p k_{ex} \tau n_{Ar}) \tau_{M^+} + n_e}. \quad (11)$$

Температура електронів T_e визначається додаванням умови квазінейтральності:

$$n_e = n_{Ar^+} + n_{M^+} \quad (12)$$

та балансу частинок для іонів Ar:

$$k_{iz}n_en_{Ar} + k_{iz^*}n_en_{Ar^*} = \frac{n_{Ar^+}}{\tau_{Ar^+}}. \quad (13)$$

При застосуванні плазми першочергове значення мають потоки частинок, які будуть осаджуватись. Плазма, яка є квазінейтральною, пов'язана з поверхнями стінок через тонкі позитивно заряджені шари. Потік іонів металу на поверхні враховує прискорення іонів через шар:

$$\Gamma_{M^+} \approx 0,61 u_B n_{M^+}, \quad (14)$$

де $u_B = \left(\frac{k_B T_e}{m_{M^+}} \right)^{1/2}$ – Бомовська швидкість, а m_{M^+} – маса іонів металу.

Потік нейтрального металу, з іншого боку, визначається тепловою швидкістю атомів газу:

$$\Gamma_M = \frac{1}{4} v_M n_M, \quad (15)$$

де $v_M = \left(\frac{8k_B T_g}{\pi m_M} \right)^{1/2}$ – середня теплова швидкість газу.

Таким чином, можна отримати співвідношення потоків іонізованого і нейтрального газу на поверхню:

$$\frac{\Gamma_{M^+}}{\Gamma_M} \propto \left(\frac{T_e}{T_g} \right)^{1/2}. \quad (16)$$

Магнетронне розпилення – це один із найбільш поширених PVD-методів фізичного осадження тонких плівок, який широко використовується в промисловості та наукових дослідженнях для створення покриттів на поверхнях різних матеріалів [45].

Принцип дії магнетронного розпилення полягає в наступному: у вакуумній камері створюється газове середовище (зазвичай аргон), в якому за допомогою електричного розряду утворюється плазма. Позитивно заряджені іони газу під дією електричного поля прискорюються та бомбардують катод (мішень) – матеріал, з якого потрібно отримати плівку. Під час удару атоми з мішені вибиваються і конденсуються на підкладці, утворюючи тонкий шар покриття.

Схематичне зображення магнетронного розряду наведено на рис. 3.

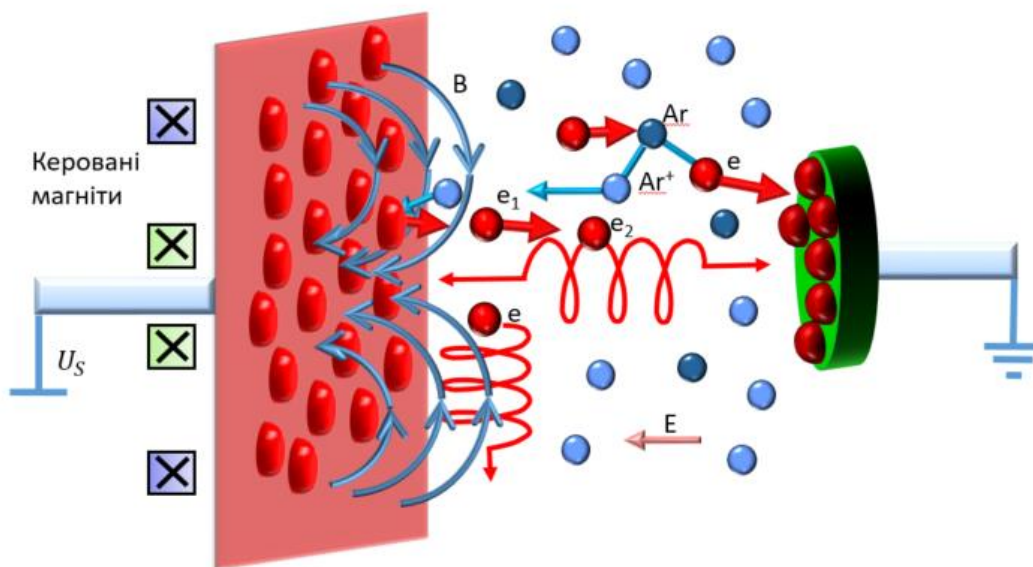


Рис. 3. Схематичне зображення магнетронного розряду

Основними перевагами магнетронного розпилення є висока однорідність та якість плівок; можливість осадження різноманітних матеріалів (метали, оксиди, нітриди тощо); низька температура процесу, що дозволяє покривати чутливі матеріали; висока швидкість осадження; легкість масштабування для промислових застосувань. Цей метод широко використовується у виробництві напівпровідників, захисних та декоративних покриттів, оптичних плівок (дзеркала, фільтри), покриттів для антикорозійного захисту, а також твердих покриттів для інструментів.

Магнетронний розряд базується на взаємодії електричного та магнітного полів у вакуумному середовищі з низьким тиском інертного газу [46]. На початковому етапі у вакуумній камері створюється розріджена атмосфера аргону при тиску в діапазоні 10^{-3} - 10^{-2} Торр ($1 \text{ Торр} \approx 133 \text{ Па}$). Між катодом (мішенню) та анодом прикладається електричне поле напругою близько 300-600 В. Під дією цього поля електрони прискорюються і, зіштовхуючись із атомами аргону, викликають їхню іонізацію, утворюючи плазму. Ключовою особливістю магнетронного розряду є наявність магнітного поля, яке накладається перпендикулярно електричному полю. Магніти, розташовані за катодом, утримують електрони поблизу поверхні мішені, змушуючи їх рухатися по спіральних траєкторіях. Це суттєво збільшує довжину шляху електронів, кількість зіткнень із атомами газу та, відповідно, рівень іонізації плазми. Саме завдяки цьому магнетронне розпилення відбувається при нижчих робочих тисках та з меншою витратою енергії порівняно зі звичайним розпиленням без магнітного поля. Іони аргону, прискорені електричним полем, бомбардують поверхню катода. Внаслідок цього відбувається вибивання («розпилення») атомів матеріалу мішені, які спрямовуються до підкладки, де конденсуються, утворюючи тонкий шар осажденного матеріалу. Таким чином, фізичні процеси, що визначають магнетронний розряд, включають: іонізацію інертного газу, затримку електронів у магнітному полі, збільшення ефективності іонізації, бомбардування мішені та осаження матеріалу на підкладку. Завдяки цим процесам магнетронне розпилення забезпечує високу густину плазми, підвищену продуктивність процесу осаження та можливість отримання високоякісних тонких плівок з керованими властивостями.

У сучасних технологіях нанесення тонких плівок широко застосовуються різні модифікації магнетронного розпилення, кожна з яких має свої фізичні особливості та області застосування.

Магнетронне розпилення розрядом постійного струму (DC Magnetron Sputtering) – це класичний метод, що базується на прикладенні постійної напруги до катода (мішені) [47]. Процес забезпечує ефективне розпилення електропровідних матеріалів, переважно металів. Метод вирізняється простотою реалізації та низькою вартістю, однак не придатний для розпилення діелектричних матеріалів через проблему накопичення електричного заряду на мішені.

Реактивне магнетронне розпилення (Reactive Magnetron Sputtering) – у цьому варіанті до робочого середовища додається реактивний газ (наприклад, кисень або азот), що призводить до утворення нових хімічних сполук, таких як оксиди або нітриди, безпосередньо під час розпилення [48]. Цей метод дозволяє отримувати функціональні покриття, наприклад TiN, Al₂O₃ або ZnO. Основною технологічною складністю є контроль процесу неконтрольованої зміни хімічного складу («отруєння») мішені, що може впливати на стабільність розряду [49].

Запропонована модель [50] для планарного магнетронного розряду, враховуючи механізм Бома електронної провідності та рух енергетичних первинних електронів у іонізаційному проміжку. Електрони, що генеруються в об'ємі, взаємодіють з електричним полем та створюють іонні електронні пари, зменшуючи напругу розряду. Струм і напруга розряду корелюють через вплив струму на густину газу біля катода та процес іонізації в іонізаційному проміжку. Модель вміщує області іонізації – одна з первинними та об'ємними електронами, а інша, що регулюється магнітним полем, впливає на струм розряду. Довжина цієї області зростає зі збільшенням струму та досягає режиму насичення. Модель

дозволяє відтворити вольт-амперні характеристики розряду та знайти практичні застосування для різноманітних плазмових процесів.

Незбалансоване магнетронне розпилення (Unbalanced Magnetron Sputtering – UBMS) є модифікацією класичного процесу магнетронного розпилення, яка передбачає спеціальне конфігурування магнітного поля з метою розширення плазмового потоку в напрямку підкладки [46]. На відміну від збалансованої системи, де силові лінії магнітного поля замкнені біля поверхні мішені, незбалансована конструкція створює умови для витоку електронів і часткової міграції плазми до підкладки. Основним фізичним ефектом у незбалансованому магнетроні є збільшення щільності іонного потоку на поверхню підкладки, що забезпечує інтенсивніше іонне бомбардування, яке сприяє ущільненню плівки, покращенню її механічних властивостей та адгезії до підкладки. До основних переваг незбалансованого магнетронного розпилення належить можливість осадження щільних, однорідних плівок з підвищеною зносостійкістю, корозійною стійкістю та оптичними характеристиками без потреби у високотемпературному нагріванні. Крім того, завдяки контролю енергетичних характеристик іонного потоку, стає можливим керування залишковими напруженнями у покриттях. Водночас незбалансовані системи мають і певні недоліки, серед яких слід відзначити складніше налаштування магнітної топології та підвищене теплове навантаження на підкладку внаслідок інтенсивного іонного бомбардування. Це обмежує використання даної технології для осадження на чутливі матеріали або термолабільні підкладки без відповідного охолодження.

Магнетронне розпилення змінним струмом (AC Magnetron Sputtering) – метод і пристрої, що використовують для запобігання накопиченню заряду на непровідних мішенях змінну напругу високої частоти, зокрема в діапазоні 13,56 МГц (радіочастотне розпилення, RF) [51]. Це забезпечує стабільність розряду під час розпилення діелектриків та розширює спектр матеріалів, які можуть бути використані.

Імпульсне магнетронне розпилення (Pulsed Magnetron Sputtering) – у цьому методі прикладається періодична імпульсна напруга, що дозволяє знизити ймовірність нестабільності розряду, особливо під час реактивного розпилення [52]. Застосування імпульсів зменшує ризик електричних пробів і покращує якість сформованих покриттів.

Імпульсне магнетронне розпилення високої потужності (High Power Impulse Magnetron Sputtering – HiPIMS) є передовим методом, що використовує надпотужні короткочасні імпульси для створення надщільного іонізованого плазмового середовища [53]. Це дозволяє формувати дуже щільні, однорідні та високоадгезійні плівки з покращеними фізико-механічними властивостями. Незважаючи на вищу якість покриттів, технологія характеризується нижчою швидкістю осадження та вищими енергетичними витратами порівняно з традиційними методами.

У процесах магнетронного розпилення ключовими фізичними характеристиками, що визначають ефективність осадження плівок, є щільність плазми, рівень іонізації матеріалу, швидкість осадження, енергоспоживання системи та твердість отриманих плівок. Щільність плазми визначається як концентрація заряджених частинок у плазмовому середовищі. Зростання щільності плазми безпосередньо корелює з підвищенням інтенсивності процесу розпилення, оскільки більша кількість електронів і іонів забезпечує ефективніше вибивання атомів з поверхні мішені. Рівень іонізації характеризує відношення

кількості іонізованих атомів до загальної кількості атомів матеріалу мішені. Високий рівень іонізації сприяє поліпшенню властивостей осаджених плівок, зокрема їхньої щільності, адгезії та однорідності. Швидкість осадження описує темп формування плівки на поверхні підкладки, що зазвичай виражається у нанометрах за хвилину (нм/хв). Цей показник має важливе значення при масштабному виробництві, де необхідно досягти оптимального балансу між якістю покриття та продуктивністю процесу. Енергоспоживання визначає типову потужність, яку споживає джерело живлення установки під час розпилення. Величина енергоспоживання залежить від типу розряду (DC, RF, HiPIMS) та безпосередньо впливає на економічну ефективність процесу. Твердість плівок відображає орієнтовну мікротвердість сформованого покриття, що вимірюється у гігаскалях (ГПа). Вона є важливим критерієм міцності, зносостійкості та експлуатаційної довговічності осаджених матеріалів.

Таким чином, комплексне розуміння зазначених параметрів є критичним для оптимізації процесів магнетронного розпилення відповідно до вимог сучасних технологічних застосувань.

Порівняльна характеристика різних видів магнетронного розпилення наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Характерні значення параметрів різних видів магнетронного розпилення

Параметр	DC Магнетронне	RF Магнетронне	Імпульсне і HiPIMS
Щільність плазми	$\sim 10^{15} \text{ м}^{-3}$	$\sim 10^{16} \text{ м}^{-3}$	$\sim 10^{18} \text{ м}^{-3}$
Рівень іонізації	$\sim 5\text{--}10\%$	$\sim 20\text{--}30\%$	$\sim 70\text{--}90\%$
Якість плівки	Пориста, груба поверхня	Щільна, гладка поверхня	Дуже щільна, надзвичайно гладка
Швидкість осадження	$\sim 100\text{--}300 \text{ нм/хв}$	$\sim 50\text{--}150 \text{ нм/хв}$	$\sim 10\text{--}50 \text{ нм/хв}$
Енергоспоживання	$\sim 0.5\text{--}1 \text{ кВт}$	$\sim 1\text{--}2 \text{ кВт}$	$\sim 3\text{--}10 \text{ кВт}$ (імпульсно)
Стійкість отриманих плівок	Помірна твердість ($\sim 10\text{--}20 \text{ ГПа}$)	Висока твердість ($\sim 20\text{--}30 \text{ ГПа}$)	Дуже висока твердість ($\sim 30\text{--}50 \text{ ГПа}$)
Основне призначення	Метали (DC); оксиди, нітриди (реактивне)	Діелектрики	Реактивні середовища (імпульсне); високоякісні покриття
Особливість	Простота, дешевизна (DC); хімічні перетворення (реактивне)	Унікає накопичення заряду	Стабільність розряду (імпульсне); дуже щільна плазма (HiPIMS)

Технологія HiPIMS на сьогоднішній день вважається однією з найперспективніших для створення тонких плівок завдяки низці унікальних переваг, що суттєво перевершують характеристики традиційних методів постійного струму (DC) та радіочастотного (RF) магнетронного розпилення. Однією з ключових особливостей HiPIMS є високий ступінь іонізації розпилюваного матеріалу. На відміну від класичних методів, коли близько 90-95 % частинок мішені залишаються нейтральними, в умовах HiPIMS завдяки надпотужним імпульсам (до 1-10 кВт/см²) іонізується до 70–90 % атомів. Це забезпечує покращений контроль енергії та напрямку потоку частинок, що, у свою чергу, сприяє формуванню щільних, однорідних покриттів із мінімальною кількістю пор та дефектів, а також покращує адгезію завдяки інтенсивному іонному бомбардуванню підкладки.

В роботі [54] покриття TiN було нанесене на підкладку Zr за допомогою DC магнетронного розпилення. Вивчали вплив рельєфу підкладки та потужності розпилення на мікроструктуру, товщину/швидкість осадження, адгезійні властивості та залишкові напруги покриттів. Результати показали, що ці параметри значно впливають на рельєф підкладки та потужність розпилення. Адгезійні властивості та залишкові стискаючі напруги також залежать від цих факторів (при низькій потужності напилення покриття залишкові напруги вищі і навпаки). Досліджено структуру та властивості покриттів на основі нітридів та боридів перехідних металів [55], отриманих реактивним магнетронним напиленням. Узагальнені результати показують, що умови осадження впливають на текстуру та структуру плівок. Плівки нітридів мають текстури росту вздовж площини (111) та нанотвердість 36-39 ГПа, у той час як покриття Ti-Zr-Si-N та (TiHfZrVNb)N мають текстуру росту (Zr,Ti)N (111) та підвищену твердість до 40-44 ГПа. Плівки на основі диборидів перехідних металів формують гексагональну тісно-упаковану структуру та мають покращені механічні властивості. Усі плівки відзначаються стовпчастою мікроструктурою та високою нанотвердістю (44-48 ГПа) через надстехіометричний вміст бору. Показано динаміку електронів у радіочастотному розряді магнетронного розпилення в аргоні на частоті 13,56 МГц при напрузі 200 В та тиску 10 мТорр шляхом застосування методу моделювання PIC/MCC [56]. Виявлено просторово залежне заряджання на поверхні мішені під впливом магнітної пастки. Доведено, що розподіл енергії іонів уздовж мішені може призвести до аномального профілю ерозії. Механізм поглинання енергії електронів досліджено за допомогою просторово-часового аналізу – поглинання потужності в основному відбувається через омічне поглинання в напрямку $E \times B$. Динаміка зіткнень та ефекти тиску також впливають на поглинання енергії електронів, а швидкість іонізації досягає максимуму у другій половині періоду РЧ, коли електрони прискорюються до області плазми. Наведені результати вказують на придушення нелокального руху електронів у магнетронних розрядах, а внесок вторинних електронів досліджено та виявлено як незначний. Все це також свідчить про складні фізичні процеси, багато з яких ще потребують подальшого уточнення.

Для планарного магнетрону з посиленням електромагнітом і структурою з порожнистим катодом були досліджені характеристики електричного пробоя [57]. Запропонована модель пробоя магнетронного розряду з урахуванням параметрів фонових тиску газу та магнітного поля описує рух електронів, які отримують енергію в електричному полі і зазнають зіткнень з нейтральними частинками, генеруючи таким чином нові електрони. Електрони, у свою чергу,

прискорюються в електричному полі та ефективно іонізують достатню кількість нейтральних частинок, щоб забезпечити режим самопідтримки розряду. Модель заснована на припущенні про комбінований класичний та пристінковий механізми електронної провідності поперек магнітного поля і узгоджується з результатами експерименту. В експерименті [58] покриття наносилося магнетронним розпиленням, причому вміст N_2 в покритті сягає 9%. При дослідженні втрати маси Ti мішеней, потік становив $1,3 \times 10^{-6}$ кг/с, причому значна частина загального потоку Ti осідає на оснащенні та камері і лише $4,36 \times 10^{-7}$ кг/с із загального потоку формують шар покриття.

При магнетронному напиленні покриття з покращеними характеристиками наносились методом HiPIMS, хоча процес відбувався повільніше, ніж при застосуванні методу DC MS [59]. Для підвищення продуктивності пропонується встановлення циліндрично-симетричного пакету магнітів TriPack. Проведено дослідження плазмової динаміки рухомих локалізованих зон іонізації при однаковій середній потужності, а також запропоновано просту модель зони іонізації для прогнозування певних умов експерименту. Плівки, отримані методом HiPIMS, відзначаються вищою мікротвердістю (30-50 ГПа порівняно із 10-20 ГПа для класичних методів), підвищеною зносостійкістю, корозійною стійкістю та оптичною якістю, що робить цю технологію надзвичайно привабливою для оптичних, фотонних та високонавантажених механічних застосувань. Додатковою перевагою HiPIMS є покращена адгезія плівок до підкладки без необхідності додаткового нагрівання чи механічної обробки, що досягається за рахунок імплантації іонів у приповерхневі шари матеріалу. Також завдяки керуванню енергетичними характеристиками іонного потоку можна зменшувати залишкові напруження в плівці, оптимізуючи умови осадження для різних типів тонких і товстих покриттів. Технологія HiPIMS демонструє універсальність у роботі як із металами (Ti , Al , Cr), так і зі складними сполуками, такими як нітриди (TiN , CrN), карбіди (TiC , SiC), оксиди (Al_2O_3 , ZnO), а також композитними і багат шаровими структурами. Однак HiPIMS має і певні обмеження, зокрема низьку швидкість осадження (у 2–10 разів нижчу порівняно із DC-методами), високе енергоспоживання та вищу вартість обладнання через необхідність використання спеціалізованих джерел імпульсної потужності.

Вакуумно-дуговий розряд (ВДР) є одним з найефективніших інструментів нанесення тонких і надтвердих покриттів, що зумовило його широке застосування в сучасному матеріалознавстві, машинобудуванні, електроніці та біомедицині. Основною фізичною перевагою даного методу є надзвичайно високий ступінь іонізації розпиленого матеріалу (до 90–100 %), що забезпечує формування щільних, гомогенних плівок з високою адгезією до підкладки. Завдяки наявності потужного іонного потоку, можливе ефективне очищення та активування поверхні перед осадженням, а також кероване іонне бомбардування, що сприяє поліпшенню механічних властивостей покриття. Методи на основі ВДР дозволяють здійснювати осадження з високою швидкістю, включаючи матеріали з високою температурою плавлення, такі як титанові, цирконієві, хромові та їхні нітриди. Крім того, вакуумні умови процесу забезпечують високу чистоту плівок і низький рівень забруднення, що є критично важливим для оптичних і електронних застосувань. Суттєвою перевагою методів ВДР також є можливість керування параметрами процесу, зокрема енергією іонів, струмом дуги та потенціалом підкладки. Це створює передумови для осадження наноструктурованих, багат шарових і функціонально-градієнтних покриттів з контрольованою

мікроструктурою та властивостями. Зважаючи на зазначені чинники, вакуумно-дуговий розряд є перспективною технологією для виготовлення захисних, декоративних та функціональних покриттів у різних галузях промисловості. У дуговому розряді також пропускається струм через газове середовище між двома електродами, утворюється іонізована газова плазма. Оскільки при цьому у місці генерації дуги досягається висока температура, даний тип розряду підтримується не вторинною, а термоелектронною емісією.

Потік електронів, викликаний термоелектронною емісією, проявляє високу температурну залежність і залежить від властивостей матеріалів, що можна описати рівнянням Річардсона-Дешмана [60]:

$$j = AT^2 \exp\left(\frac{-e\phi}{kT}\right), \quad (17)$$

де j – потік електронів, A – константа, T – температура, $e\phi$ – робота виходу електрона, k – стала Больцмана.

У дугових розрядах плазма взаємодіє з катодом в зоні плями [61, 62]. Катодна дуга – низьковольтний високострумний плазмовий розряд [63]. У відсутності магнітних полів дугові плями рухаються випадково по поверхні катоду. Час перебування плями на місці становить мікросекунди або менше, а густина струму на плямах коливається між 10^6 та 10^{12} А/м². У порівнянні з тліючим розрядом, в основному процес емісії матеріалу полягає у нагріванні, а не в розпиленні. В результаті нагрівання та дії електричного поля в плазмовому шарі відбувається виділення та прискорення потоку первинних електронів. Ці електрони викликають нагрівання та іонізацію випаровування матеріалу. Після цього утворюються дві категорії електронів: електрони високої енергії з катода та повільні електрони з плазми. Нагрівання катода залежить від потоку іонів і зворотного потоку електронів, тоді як різниця між потоками випарених атомів з катода та важких частинок з плазми визначає потік ерозійного матеріалу. Сам процес термоелектронної емісії, який підсилюється ефектом Шоттки, є основою дугового розряду:

$$Y = \frac{\phi_{e0}(T, E)}{\phi_{n0}(T)} = AT_0^{5/2} \exp\left[\frac{eW_{evap}(1-\chi)}{k_B T_0}\right], \quad (18)$$

$$\chi = \frac{W}{W_{evap}}, \quad (19)$$

де A – константа, що залежить від матеріалу; W_{evap} – енергія випаровування (еВ), W – приведена робота виходу Шоттки (еВ).

На рис. 4 схематично показано дугове випаровування або дугове іонне напилення (Arc Ion Plating – AIP), коли матеріал випаровується і його частинки осідають на інші поверхні. Встановивши поруч із джерелом дугового розряду заготовку, на яку потрібно нанести випарований матеріал, отримаємо на ній тонку плівку. При правильному підборі матеріалів ці властивості будуть покращувати властивості виробів, такі як стійкість до корозії, міцність, зменшення сил тертя тощо.

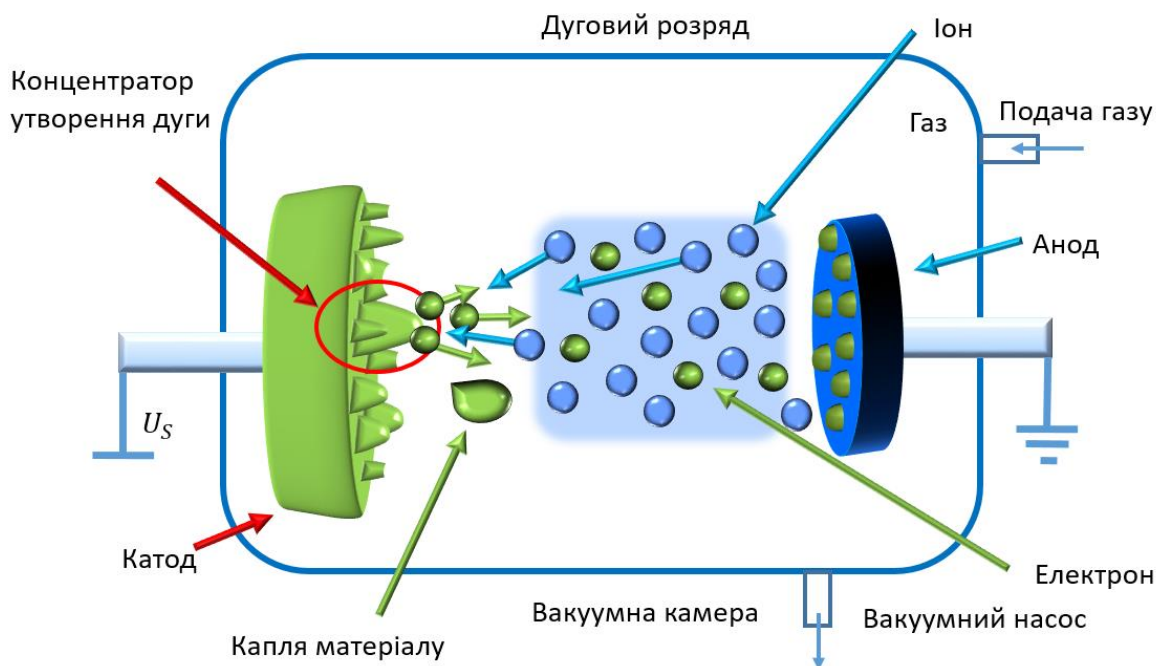


Рис. 4. Схематичне зображення дугового розряду

В [62] проведено аналіз двох основних теорій катодних дуг. У першій описано нагрівання катоду джоулевою дисипацією енергії (об'ємне джерело тепла, різке зростання густини струму), майже постійне падіння потенціалу катоду та інші початкові умови. У другий проведено дослідження з використанням математично замкненої системи рівнянь, яке показує, що виникнення та розвиток плями визначається не зростанням струму емісії електронів, а збільшенням щільності потужності дуги, що впливає на джерела тепла, включаючи енергію іонного потоку до випаруваного катода (джерело тепла на поверхні). При дослідженні початкові умови плазми перехідної плями рекомендують об'єднати, оскільки це необхідно для самоузгодженого моделювання процесу розвитку плями. Початкові характеристики плазми, наведені як параметричні незалежні дані, включаючи мікро-розмір поточного розташування, можуть привести до результатів, які не узгоджуються з реально спостережуваними явищами. При запалюванні дуги зародження плями підтримується підвищенням електричної потужності (різке зростання катодного падіння потенціалу з помірними змінами густини струму).

З точки зору теоретичних і експериментальних досліджень, вивчення катодних плям є дуже складними процесами, тому використовують чисельне моделювання [64]. Метод PIC (Particle-in-Cell) забезпечує рішення для просторово-часового електромагнітного поля та дозволяє отримати мікроскопічні функції розподілу частинок плазми у фазовому просторі, з яких можна розрахувати макроскопічні параметри плазми.

Профіль підкладки значно впливає на морфологію та трибологічні характеристики покриття [65]. Оптимізація параметрів осадження, зокрема, парціальний тиск азоту, допомагає уникнути внутрішніх дефектів. Для оцінки ефективності покриття важливо враховувати механічні, морфологічні, електрохімічні та трибологічні властивості. Нанометрична багатошарова конфігурація може бути найефективнішою для трибологічних застосувань.

покращуючи загальну якість покриття. В роботі [66] досліджується дуговий розряд постійного струму та вплив спірального аноду на параметри плазми та якість покриття. Дослідження показали, що даний спосіб дозволяє в 1,5 рази прискорити процес нанесення покриття, а кількість крапель металу на плівці зменшилась, причому твердість покриття була покращена на 10%. При використанні джерела іонів Пеннінга для негативних іонів водню розряд постійного струму вимагає великої потужності для забезпечення високого струму пучка іонів. В роботі [67] досліджували зв'язок між розміром катода та станом плазми, щоб продовжити термін служби джерела іонів, і було встановлено, що при зменшенні розміру катода збільшується струм пучка. У дослідженні [68] автори вивчали багатоелементні азотні та міжметалеві покриття, отримані методом дугового вакуумного напылення на основі унікальних комбінацій елементів (Nb-Si-Cu і Ti-Nb-Al) – покриття розроблені для біосумісних поверхонь у металевих імплантатах та медичних пристроях. Вивчали склад поверхні, мікроструктуру, контактний кут та біосумісність покриттів. Рентгеноструктурний аналіз XRD показав утворення мультифазового стану (γ -TiAl, TiAl₂, α -Nb₅Si₃) у покриттях TiAlNb через часткове зайняття Nb-Ti вузлів решітки. Тестування на біосумісність із використанням стовбурових клітин пуповини людини показало кращу проліферацію клітин на міжметалевих покриттях у порівнянні з азотними. Незважаючи на великі кути контакту, всі покриття мали гідрофільні властивості, що сприяли адгезії та росту клітин.

Слід зазначити, що вакуумно-дугові джерела плазми використовуються також для космічної техніки [69]. Космічні мікрорушійні системи реактивної тяги використовують плазму та електричні поля для прискорення та виштовхування маси, причому такі системи можуть створювати дуже високий питомий імпульс і переміщувати супутники.

Наведені вище PVD методи осадження покриттів описували певні методи генерації плазми як інструменту для створення потоку осаджуваних частинок. Метод конденсації з іонним бомбардуванням (КІБ), або Plasma Immersed Ion Implantation and Deposition (PIII&D), виник як відповідь на обмеження і недоліки традиційних методів осадження, зокрема магнетронного розпилення, вакуумно-дугового випаровування та інших фізичних методів осадження плівок – і, перш за все, він є методом керування енергією іонів плазми при їх взаємодії з оброблюваною підкладкою, а не методом генерації плазми. Основною передумовою розвитку цього методу стала потреба в одночасному контролі хімічного складу, мікроструктури та залишкових напружень у плівці з метою отримання високоякісних функціональних покриттів з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Окрім того, в умовах недостатньої енергетичної активності осаджуваних частинок часто утворюються покриття з пористою структурою або внутрішніми дефектами, що суттєво знижує експлуатаційні характеристики матеріалів. Ще одним недоліком описаних методів є їх обмежена ефективність при нанесенні покриттів на об'єкти зі складною геометрією. Через лінійність траєкторій осаджуваних частинок формування рівномірного шару на тривимірних або затінених ділянках поверхні є проблематичним. Крім того, в умовах відсутності гнучкого контролю над енергетикою осадження ускладнюється керування мікроструктурою плівки, зокрема розміром зерен, ступенем кристалічності або рівнем внутрішніх напружень. Такі розповсюджені у використанні технології, як магнетронне розпилення та вакуумно-дугове осадження, продемонстрували недостатній

рівень адгезії покриттів до підкладки, особливо у випадках відсутності попередньої обробки поверхні. Формування слабо зв'язаного міжфазного шару в таких системах призводить до зниження механічної стійкості плівок та їх схильності до відшаровування під дією навантажень. Розвиток методу КІБ, або PIII&D, зумовлений низкою технічних та технологічних обмежень, притаманних традиційним фізичним методам осадження плівок – завдяки імпульсному зануренню зразка в плазму та прикладенню високовольтних імпульсів або сталої напруги забезпечується енергетично кероване іонне бомбардування усього поверхневого рельєфу, незалежно від геометричної складності деталі. Це дає змогу значно покращити адгезію плівки до підкладки, контролювати глибину модифікації приповерхневого шару, а також зменшити кількість дефектів і пустот. Додатково, метод дозволяє отримувати покриття з градієнтними або наноструктурованими властивостями. Серед причин практичного застосування КІБ – відсутність потреби у складних системах фокусування іонного пучка, здатність обробляти тривимірні об'єкти та біосумісні матеріали, а також можливість інтеграції процесу в умовах низькотемпературного осадження. Завдяки цьому метод знайшов застосування у мікроелектроніці, біомедицині, авіаційній та інструментальній промисловості для створення твердих, зносостійких, корозійно- та термостійких покриттів. У роботі [70] було досліджено механізм формування поверхневих шарів вакуумно-дугових покриттів у зв'язку з імплантаційними процесами, спричиненими негативним потенціалом на підкладці. У багат шарових наноструктурованих покриттях TiN/Ti, текстура шарів нітриду титану розвивається відповідно до товщини шару, при цьому стимулюється радіаційним бомбардуванням під час осадження, а товщина шарів Ti понад 30 нм сприяє розвитку напружено-деформованого стану в TiN шарах без їх істотної релаксації. Зі збільшенням потенціалу зсуву зростають макронапруження стиснення в TiN шарах, спостерігається підвищення досконалості текстури та збіднення легкими атомами. Також наноструктуровані покриття TiAlN з співвідношенням Ti/Al 46/54 наносили з швидкістю 1 мкм/год та температурою 550 °C [71]. Таким чином, метод конденсації з іонним бомбардуванням (КІБ), або Plasma Immersed Ion Implantation and Deposition (PIII&D), є інноваційною технологією, що поєднує процес осадження плівок із глибоким іонним впливом на підкладку. PIII&D дозволяє ефективно вирішити ці проблеми завдяки можливості імплантації іонів безпосередньо в поверхневі шари матеріалу на глибину до кількох десятків нанометрів, що суттєво підвищує якість міжфазного контакту. У процесі нанесення покриття під впливом керованого іонного бомбардування формується щільна, однорідна плівка з поліпшеними механічними, трибологічними та хімічними властивостями. Цей метод є універсальним для обробки виробів з різною геометрією та забезпечує високу ступінь рівномірності навіть у важкодоступних ділянках. Таким чином, впровадження КІБ стало закономірним етапом технологічного прогресу, спрямованого на подолання обмежень класичних методів фізичного осадження плівок.

Слід ще раз підкреслити, що метод КІБ є *методом керування енергією іонів*, що обробляють поверхню, до якої підводиться керуючий електричний потенціал зміщення, а не *методом генерації плазми*. Метод КІБ може комбінуватися з методами генерації плазми, заснованими на застосуванні магнетронного або вакуумно-дугового розряду. У сукупності така комбінація може бути ефективною для вирішення певної виробничої задачі. При цьому недоліки

окремих складових таких комбінацій можуть бути наслідувані цими комбінованими технологіями. Так, при вакуумно-дуговому випаровуванні з матеріалу можуть відокремлюватись краплі, які, потрапляючи на покриття, знижують його якість. Для боротьби з цим явищем створюють методи, котрі зменшують кількість крапель або фільтрують їх перед покриттям – і фактично це вже є методами *керування розподілом іонного струму*. Одним з варіантів боротьби можна зазначити магнітні пастки. Так, до комбінації «метод генерації плазми»-«метод керування енергією іонів» додається певний метод транспортування потоку плазми за допомогою викривленого магнітного поля, яке дозволяє згенерувати електричне поле у плазмі, достатнє для змінення траєкторії іонів («електромагнітне фокусування іонного потоку плазми»).

Необхідність такого «електромагнітного» підходу замість простого застосування магнітного поля, яке теоретично може змінити напрям руху іонів, можна описати у рамках наступного наближення. У класичному підході рух електронів у плазмі можна описати так [27]:

$$mn \frac{d\vec{v}}{dt} = -en(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) - \nabla p - mnv\vec{v}, \quad (20)$$

де $\vec{v}$ – швидкість електрона, $\vec{E}$ і $\vec{B}$ – електричне і магнітне поля, n – густина електронів, ∇p – градієнт тиску, e і m – заряд і маса електрона відповідно, v – частота зіткнень електронів з нейтралами.

При введенні плазми у постійне магнітне поле $\vec{B}$ виникають різні типи рухів [72], оскільки магнітне поле робить плазму анізотропним середовищем з переважним напрямком руху електронів уздовж $\vec{B}$. Під час руху іонів або електронів із зарядом q на них діє сила Лоренца $q(\vec{v} \times \vec{B})$, яка перпендикулярна як швидкості $\vec{v}$, так і полю $\vec{B}$. Ця сила не впливає на компонент швидкості паралельно полю $\vec{B}$, але змушує частинку обертатися по циклотронній орбіті в перпендикулярній площині, причому циклотронна частота ω_c не залежить від швидкості і залежить лише від відношення заряду до маси частинки. Однак радіус кола обертання, який називають радіусом Лармора або гірорадіусом r_L , залежить від швидкості. Якщо $v_{\perp}$ є компонентом швидкості в площині, перпендикулярній до поля $\vec{B}$, частинка завершує орбіту довжиною $2\pi r_L$ за час $2\pi/\omega_c$ тому $v_{\perp} = r_L \omega_c$, або:

$$r_L = \frac{v_{\perp}}{\omega_c}. \quad (21)$$

Оскільки частота циклотронного руху ($\omega_c \propto 1/M$) пропорційна оберненому значенню маси частинки, а перпендикулярна компонента швидкості ($v_{\perp} \propto \frac{1}{\sqrt{M}}$) обернено пропорційна квадратному кореню відношення мас, то гірорадіус r_L схильний бути значно меншим для електронів, ніж для іонів. Під час опрацювання плазми у присутності магнітних полів звичайно зазначається, що поля мають порядок кількох сотень гаусів ($1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Тесла}$), а довжина технологічного пристрою зазвичай складає близько метра. У подібних умовах іони майже не відчувають впливу магнітного поля, у той час як електрони змушені рухатись вздовж поля, швидко обертаючись по малих колах. У таких випадках зручно ігнорувати малий гірорадіус і розглядати лише рух центру орбіти електронів, що відомий як направляючий центр. При цьому відхилення напрямку руху електронного потоку від напрямку руху іонів призводить до генерації сильних

електричних полів, що здатні впливати на рух іонів, змушуючи останніх слідувати за електронами, що рухаються у напрямку магнітного поля.

Цей приклад показує: *комбінування різних методів генерації плазми, транспортування і керування енергією і розподілом іонного струму вздовж поверхні підкладки, що оброблюється, є характерним процесом у розробці нових технологій іонно-плазмової обробки.* Останні десятиріччя показали значну низку таких прикладів. В роботі [73] досліджені тонкі плівки $\text{Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15}\text{Zr}_{0.1}\text{Ti}_{0.9}\text{O}_3$ (BCZT) товщиною 100–500 нм на чотирьох різних підкладках (Si, Pt(111)/LNO(100) та Nb:SrTiO₃). При нанесенні на підкладки з Si спостерігалася висока залишкова напруга розтягу, що призводило до розтріскування плівок товщиною понад 200 нм та погіршення їх характеристик. На відміну від цього, плівки, нанесені на підкладки Nb:SrTiO₃, показали кращі п'єзoeлектричні та сегнетоелектричні властивості. В [74] досліджували два набори покриттів AlCrN, що були нанесені за допомогою промислової магнетронної системи напилення з контролем плазмової іонізації за технологією SCIL (Sputter Coatings Induced by Lateral Glow Discharge). Кожен набір покриттів було застосовано в різних режимах – металевий (М-покриття) і оксидний (С-покриття), із різним домінуючим типом структури – h-AlN і c-Cr(Al)N відповідно. Адгезію покриттів до підкладки WC-Co вивчали за допомогою випробувань на подряпини та динамічної ударостійкості. М-покриття виявились стійкими до подряпин, тоді як С-покриття схильні до відколу/прогинання через подряпини, можливо, за рахунок меншої товщини. Найкращу адгезію показало С-покриття з c-Cr(Al)N, що мало найнижчі твердість і залишкову напругу при стисканні. Критична кількість ударів для М-покриттів була однаковою незалежно від параметрів осадження, у той час як у С-покриттів вона сильно залежала від середньої енергії іонів. С-покриття з вищою середньою енергією іонів показали кращу ударостійкість і стійкість до ударів. М-покриття мали кращу зносостійкість через більше відношення твердості до модуля пружності і більшу товщину, що дозволяє краще захищати підкладку від деформації. Досліджені покриття TiCrAlSiN, створені за допомогою катодно-дугового випаровування та магнетронного розпилення [75], коли наноструктурне покриття було наносено на фрези з швидкорізальної сталі. Було досліджено, як змінюються параметри роботи інструменту з цим покриттям, і показано, що при збільшенні глибини різання робочий час інструменту підвищується: покращуються твердість, високотемпературна міцність, в'язкість до руйнування, стійкість до окислення нанокомпозитів. При створенні гібридних надтонких наночарів використовували комбінування дугового тліючого розряду (Arc Enhanced Glow Discharge – AEGD) та магнетронного HiPIMS при різних швидкостях осадження [76]. Найтвердіше покриття близько 40 ГПа було отримано для TiB₂, хоча при цьому було зазначено велику варіацію параметрів нанесення одного й іншого методів, що впливає на характеристики покриття, хоча є обмеження в швидкості нанесення. Дуплексне покриття – це багатошарова система, яка поєднує два різні методи захисту поверхні для досягнення синергійного ефекту покращення експлуатаційних властивостей матеріалу. Найчастіше дуплексне покриття передбачає попередню обробку (наприклад, плазмове азотування) основного матеріалу з подальшим нанесенням тонкого функціонального шару. Формування дуплексного покриття AlTiN виконували наступними кроками [77]: іонне травлення, плазмове азотування, осадження проміжного шару Ti методом HIPIMS і потім AlTiN – із допомогою вдосконаленої плазмової дуги (Advanced Plasma Arc – APA-Arc). Весь комплекс покриття

складає 60 мкм (азотування), 2-3 мкм (γ' -Fe₄N), 100 нм (Ti) та 6,1 мкм (AlTiN). При нанесенні головного покриття швидкість сягала 6,1 мкм/год. Даний спосіб показує кращу міжфазну адгезію, а твердість шару Ti/AlTiN досягає 3368HV_{0,05}, із коефіцієнтом зносу $5,94 \times 10^{-8}$ мм³/Nm, що є гарним показником. Фази MAX (M(n+1)AX_n) мають унікальні гібридні властивості кераміки та металу завдяки особливій наношаровій структурі [78], що робить їх привабливими для важливих структурних компонентів, що працюють в екстремальних умовах. Успішні досягнення в розробці процесів PVD для створення нанокристалічних покриттів MAX-фаз відкривають перспективи для застосування в умовах високої температури, окислення, корозії, деформації, зносу та опромінення. Методи нанесення PVD-покриттів MAX-фаз, такі як магнетронне напилення в поєднанні з катодно-дуговим напиленням, використовуються для отримання цих покриттів.

Отже, необхідність розвитку комбінованих технологій формування покриттів обумовлена прагненням до подолання обмежень, притаманних окремим, традиційним методам нанесення плівок, а також до досягнення оптимального балансу між фізико-хімічними властивостями покриттів, енергоефективністю процесу та універсальністю технологічного застосування. Жоден із класичних методів осадження – таких як термічне випаровування, магнетронне розпилення чи вакуумно-дугове осадження – окремо не забезпечує повного спектру вимог, які висуваються до сучасних функціональних плівок: висока адгезія, щільність, однорідність, точний контроль товщини, зносостійкість, термостабільність та інше. Комбіновані підходи, які поєднують у собі кілька фізичних і/або хімічних методів (наприклад, магнетронне розпилення з іонною імплантацією, PVD з CVD, або осадження з одночасним іонним бомбардуванням), дозволяють одночасно керувати структуроутворенням, фазовим складом, напруженим станом та морфологією плівки. Поєднання процесів надає змогу створювати градієнтні, багатошарові або нанокомпозитні покриття з підвищеними експлуатаційними характеристиками, яких неможливо досягти за допомогою одного методу. Окрім того, комбіновані технології забезпечують гнучкість у налаштуванні параметрів процесу для різних типів підкладок, у тому числі складної геометрії, та дозволяють здійснювати передосаджувальну обробку поверхні без зміни технологічної камери. Це підвищує продуктивність, знижує втрати матеріалів і мінімізує ризики забруднення. Таким чином, розвиток комбінованих технологій є стратегічно важливим напрямом у галузі покриттів, який забезпечує розширення функціональності плівок і відкриває нові перспективи в електроніці, машинобудуванні, біомедицині та енергетиці. Таким чином, можна стверджувати, що сучасні технології формування покриттів стрімко розвиваються у відповідь на зростаючі вимоги до якості, функціональності та ресурсу матеріалів, що експлуатуються в умовах високих навантажень, агресивного середовища або термічних коливань. Традиційні методи фізичного осадження, зокрема термічне випаровування або стандартне катодне розпилення, демонструють обмеження, пов'язані з нерівномірністю нанесення, низькою іонізацією матеріалу, перегрівом мішені чи недостатньою адгезією покриттів. Ці недоліки знижують ефективність технологічного процесу й обмежують сфери застосування отриманих плівок. У зв'язку з цим виникає потреба в системному підході до вибору та модернізації методів нанесення покриттів, який враховує як фізичну природу розряду, так і практичні вимоги до отриманого шару.

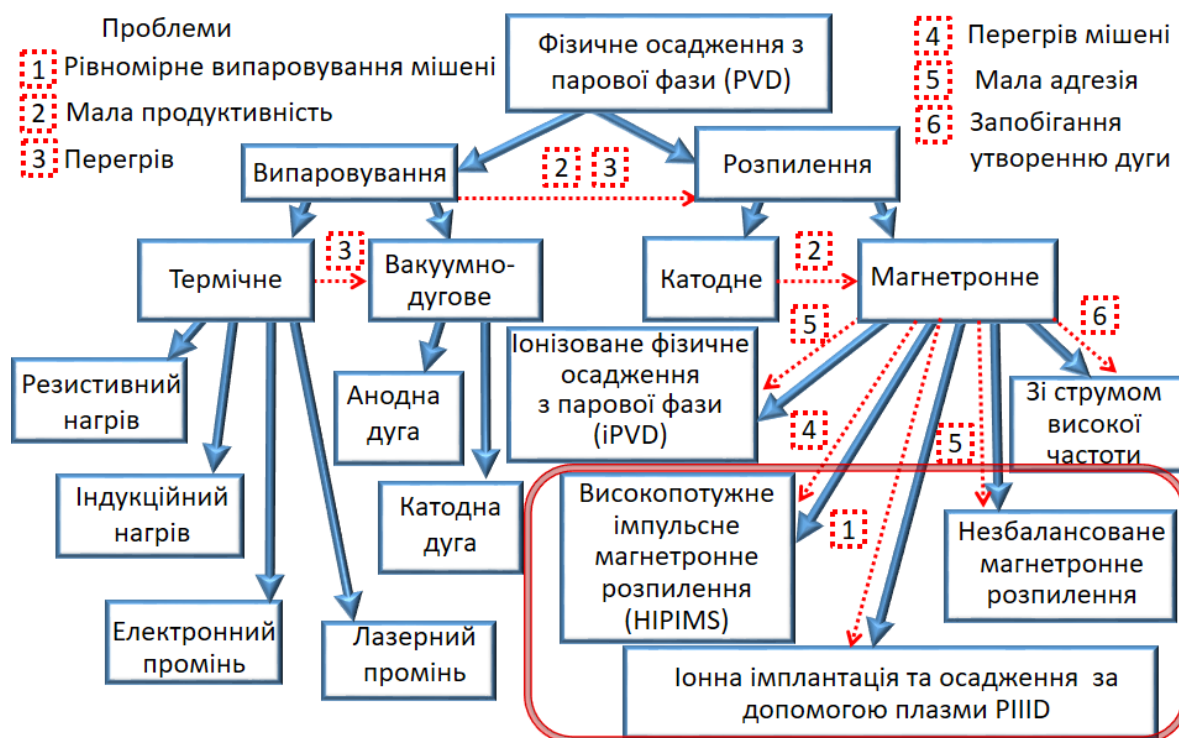


Рис. 5. Аналітична схема класифікації та вдосконалення методів фізичного осадження покриттів

Запропонована схема на рисунку 5 є результатом аналітичного узагальнення сучасних тенденцій у сфері фізичного осадження з парової фази (PVD) і систематизації технологічних підходів на основі критичного аналізу літературних джерел, експериментальних досліджень та практичного досвіду впровадження. Вона узагальнює переваги й обмеження ключових методів нанесення покриттів, а також ілюструє логічну еволюцію технологій у напрямі підвищення енергоефективності, керованості структури плівок та якості зчеплення з підкладкою.

Виявлені на основі аналізу причинно-наслідкові зв'язки між проблемами базових методів (таких як термічне випаровування чи класичне катодне розпилення) та напрямками їх подолання (через застосування магнітних полів, імпульсної енергоподачі чи іонного впливу) дозволяють обґрунтувати необхідність у розвитку комбінованих підходів. У цьому контексті схема слугує не лише як ілюстративний засіб, а як концептуальний інструмент для розробки нових інтегрованих технологій нанесення функціональних покриттів. Запропонована схема є не лише ілюстрацією еволюції технологій, а й логічним підґрунтям для формування нової гібридної стратегії. Вона дозволяє критично оцінити кожен підхід з точки зору ключових експлуатаційних характеристик, виявити причинно-наслідкові зв'язки між технологічними параметрами та якістю покриття, а також визначити перспективні напрями подальших досліджень. Така структуризація є необхідною передумовою для розробки комбінованих методів, що інтегрують переваги кількох технологій з метою подолання їхніх індивідуальних обмежень. Схема систематизує два ключові напрями фізичного осадження – випаровування та розпилення, які, у свою чергу, поділяються на низку підметодів залежно від джерела енергії, виду розряду та способу керування плазмою. У лівій частині схеми відображено підходи, засновані на термічному випаровуванні мішені,

зокрема резистивне, індукційне, електронно-променеве та лазерне нагрівання. Центральна гілка ілюструє методи розпилення, які зазнали значної еволюції: від класичного катодного розпилення до магнетронного розряду та його сучасних модифікацій – HiPIMS, незбалансованого магнетронного розпилення і технологій на основі іонної імплантації та осадження (PIIID). Червоні пунктирні стрілки вказують на конкретні технологічні проблеми (наприклад, перегрів мішені, низьку продуктивність, недостатню адгезію або нестабільність розряду), які стали причиною розробки нових підходів або гібридних рішень. Схема не лише демонструє логічну еволюцію методів PVD, а й підкреслює взаємозв'язок між обмеженнями базових технологій і появою нових ефективніших рішень.

Представлений підхід дозволяє узагальнити існуючі знання, визначити перспективні напрями розвитку у галузі тонкоплівкових покриттів і сформувати теоретичну базу для подальшої розробки комбінованих технологій осадження. У центрі уваги знаходиться проблема усунення типових обмежень таких методів, як перегрів мішені, нерівномірне випаровування, недостатня іонізація парової фази, низька адгезія та можливість виникнення електричної дуги. Кожна з цих проблем позначена на схемі індексами (1–6), які пов'язані з відповідними технологіями за допомогою стрілок і логічних переходів. Методи PVD поділяються на два головні підходи: випаровування та розпилення. Випаровування передбачає нагрівання мішені до температури кипіння, що досягається за допомогою резистивного, індукційного або електронно-променевого нагріву. Попри простоту, ці методи часто супроводжуються високим енергоспоживанням, термічною дестабілізацією матеріалу та обмеженнями у керуванні щільністю іонного потоку до підкладки. Вакуумно-дугове випаровування дає змогу отримати іонізовану пару, проте зазнає труднощів через утворення мікрокрапель та нестабільність дугового розряду. Розпилення як метод, що ґрунтується на іонному бомбардуванні мішені, вимагає оптимізації конфігурації розряду. Стандартне катодне розпилення має обмежену іонізацію та низьку ефективність, особливо при низькому тиску. Введення магнітного поля дало початок магнетронному розпиленню, яке забезпечує утримання електронів у приповерхневому об'ємі мішені, що підвищує іонізацію, знижує робочий тиск і дає змогу працювати з більшими площами мішеней.

Аналіз схеми дозволяє отримати перспективний підхід щодо подальшої модернізації класичного магнетронного розпилення. По-перше, використання джерел високої частоти, що дозволяє працювати з діелектриками та стабілізувати розряд. По-друге, додавання методу незбалансованого магнетронного розпилення (UBM) та електромагнітного фокусування плазми, що дозволяє змінювати топологію магнітного поля так, щоб частина електронів плазми виходила за межі розряду та спрямовувалась до підкладки, що покращує адгезію та щільність плівок, а також дозволяє керувати розподілом іонного потоку вздовж поверхні оброблюваної підкладки. По-третє, застосування високопотужного імпульсного магнетронного розпилення (HiPIMS) для забезпечення надзвичайно високого ступеня іонізації розпиленого матеріалу, що критично важливо для формування надщільних і однорідних покриттів преміум-класу. Це все необхідно поєднати із такими іонно-плазмовими методами, як iPVD та PIII&D, які поєднують плазмове середовище з осадженням і імплантацією. Такі методи забезпечують керування енергією іонів, що потрапляють на підкладку, дозволяючи не лише формувати покриття, а й модифікувати приповерхневу структуру матеріалу для покращення зносостійкості, корозійної стійкості,

твердості, адгезії тощо. Таким чином, схема відображає логіку еволюції методів фізичного осадження та мотивацію переходу до комбінованих, гібридних технологій, які відповідають зростаючим вимогам сучасного матеріалознавства та інженерії поверхні в умовах Індустрії 4.0.

Висновки

Проведене дослідження дозволило здійснити комплексний аналіз сучасних методів формування функціональних покриттів на основі фізичного осадження з парової фази (PVD), з особливою увагою до їхнього розвитку, вдосконалення та комбінування у вигляді гібридних і адаптивних технологій. У рамках цієї роботи було окреслено межі ефективності основних методів, таких як катодне розпилення, магнетронне розпилення, імпульсне магнетронне розпилення високої потужності (HiPIMS), а також дугове іонне напилення (AIP) і вакуумно-дугові технології. Зазначені методи демонструють певні обмеження щодо якості, однорідності, адгезії або термостійкості покриттів, що спонукає до подальшого вдосконалення за рахунок комбінації плазмових джерел, контрольованого іонного бомбардування та мультикомпонентного синтезу. Однією з ключових ідей, що впливає з аналізу існуючих технологічних підходів, є необхідність глибшого розуміння взаємозв'язку між умовами створення плазми, кінетикою росту покриття та структурними особливостями одержаного шару. Цей зв'язок особливо важливий при розробці високофункціональних шарів, де важливими параметрами залишаються рівень внутрішніх напружень, зернистість, ступінь кристалізації, щільність та фаза зв'язування.

Наведені в роботі теоретичні узагальнення дозволили створити аналітичну схему класифікації методів PVD, яка систематизує переваги та недоліки кожного підходу й водночас слугує відправною точкою для проектування гібридних технологій. Зокрема, чітке розмежування між методами, що базуються на випаровуванні (термічному нагріванні), та методами розпилення (балістичному вибиванні атомів з мішені) дало змогу сформулювати критерії доцільності вибору кожного методу для конкретного завдання. Серед основних критеріїв: температурна стійкість мішені, геометрія оброблюваних деталей, вимоги до товщини та адгезії шару, а також особливості обробки внутрішніх поверхонь.

Результати цієї роботи є підґрунтям для подальших практичних розробок у сфері адаптивного нанесення покриттів із заданими функціональними властивостями. Застосування аналітичної схеми класифікації методів PVD, запропонованої авторами, дозволяє не лише систематизувати існуючі знання, а й слугує ефективним інструментом для стратегічного планування нових технологій формування покриттів на основі фізичних принципів осадження з парової фази. Запропоновано схему, яка не лише систематизує сучасні підходи до осадження з парової фази, але й відображає еволюцію технологій як відповідь на характерні технологічні проблеми, такі як нерівномірне випаровування мішені, низька продуктивність, перегрів, недостатня адгезія та ризик утворення дугового розряду. Побудована схема дає змогу візуалізувати зв'язки між окремими підходами: термічним і вакуумно-дуговим випаровуванням, катодним і магнетронним розпиленням та їх сучасними модифікаціями, такими як HIPIMS, незбалансоване магнетронне розпилення та іонна імплантація з осадженням (PIID). Особливо важливо, що схема демонструє причинно-наслідкові зв'язки між недоліками вихідних методів та появою інноваційних рішень, які дозволяють компенсувати ці недоліки, зберігаючи переваги. Таким чином, представлена

схема може слугувати логічною основою для вибору та комбінування методів осадження в залежності від технічного завдання. Вона також є результатом цілісного аналітичного підходу до вдосконалення технологій нанесення покриттів, який може бути використаний для подальших розробок у галузі високоефективних, адаптивних та багатофункціональних PVD-систем.

References

1. Kravanja, K. A. A review of techniques for the application of bioactive coatings on metal-based implants to achieve controlled release of active ingredients / K. A. Kravanja, M. Finšgar // *Materials & Design*. – 2022. – Vol. 217. – Article ID 110653. – p. 1-20.
2. An integrative approach to coating/carbide substrate design of CVD and PVD coated cutting tools during the machining of austenitic stainless steel / O. He, J. M. Paiva, J. Kohlscheen, B.D. Beake, S.C. Veldhuis // *Ceramics international*. – 2020. – Vol. 46, iss.4. – p. 5149-5158.
3. Butt, M. A. Thin-Film coating methods: A successful marriage of high-quality and cost-effectiveness-A brief exploration / M. A. Butt // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12. – p. 1-22.
4. New coatings systems with improved mechanical properties by combining polymer derived ceramic and physical vapor deposition coating methods / J.-F. Wendel, M. L. Leite, P. Furtat, K. Tangermann-Gerk, S. Schafföner, G. Motz // *Advanced Materials Interfaces*. – 2022. – Vol. 9. – Article ID 2201654. – p. 1-9.
5. Multi-parametric analysis of the CVD of CNTs: Effect of reaction temperature, pressure and acetylene flow rate / G.P. Gakis, E.N. Skountzon, I.G. Aviziotis, C. A. Charitidis // *Chemical Engineering Science*. – 2023. – Vol. 267. – Article ID 118374. – p. 1-11.
6. Effects of deposition parameters on the microstructure and mechanical properties of Ti(C,N) produced by moderate temperature chemical vapor deposition (MT-CVD) on cemented carbides / M. Zhu, S. Achache, P. Boulet, A. Verfeur, J.-F. Pierson, F. Sanchette // *Vacuum*. – 2022. – Vol. 195. – Article ID 110650. – p. 1-10.
7. Schalk, N. Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community [Text] / N. Schalk, M. Tkadletz, C. Mitterer // *Surface & Coatings Technology*. – 2022. – Vol. 429. – Article ID 127949. – p. 1-30.
8. Analyzing industrial CVD reactors using a porous media approach / S. Zou, J. Xiao, V. Wu, X. D. Chen // *Chemical engineering journal*. – 2021. – Vol. 415. – 129038. – p. 1-12.
9. Dry-Blasting of α - and κ -Al₂O₃ CVD Hard Coatings: Friction Behaviour and Thermal Stress Relaxation / N. Schalk, C. Mitterer, C. Czettl, B. Satory, M. Penoy, C. Michotte // *Tribology letters*. – 2013. – Vol. 52. – p. 147-154.
10. Klaus, M. Residual stress depth profiling in complex hard coating systems by X-ray diffraction /M. Klaus, C. Genzel, H. Holzschuh // *Thin solid films*. – 2008. – Vol. 517. – p. 1172-1176.
11. Czettl, C. Knowledge based coating design of CVD TiN-TiBN-TiB₂ architecture.[Text] / C. Czettl, J. Thurner, U. Schleinkofer // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2018. – Vol. 71. – p. 330-334.
12. Surface topography of PVD hard coatings / P. Panjan, A. Drnovšek, N. Mahne, M. Čekada, M. Panjan // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11, Iss. 11. – Article ID

1387. – p. 1-31.

13. PVD for decorative applications: A review / M. Vorobyova, F. Biffoli, S. M. Martinuzzi, M. Linser, A. Caneschi, M. Innocenti // *Materials*. – 2023. – Vol. 16. – Article ID 4919. – p. 1-30.

14. Review of Growth Defects in thin films prepared by PVD techniques / P. Panjan, A. Drnovšek, P. Gselman, M. Čekada, M. Panjan // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10, Iss. 5. – Article ID 447. – p. 1-40.

15. Gudmundsson, J. T. Foundations of physical vapor deposition with plasma assistance / J. T. Gudmundsson, A. Anders, A. von Keudell // *Plasma sources science and technology*. – 2022. – Vol. 31. – Article ID 083001. – p. 1-33.

16. Chaudhari, M. N. Thin film deposition methods: A critical review / M. N. Chaudhari, R. B. Ahirrao, S. D. Bagul // *International journal for research in applied science & engineering technology (IJRASET)*. – 2021. – vol. 9. – iss. VI. – p. 5215-5231.

17. Tsizh, B. Techological methods of forming thin semiconductor layers part 3. Cathode sputtering / B. Tsizh, Z. Dziamski // *Scientific messenger LNUVMB. Series: Food technologies*. – 2020. – Vol. 22, Iss. 92. – p. 15-17.

18. A review on the pathways of the improved structural characteristics and photocatalytic performance of titanium dioxide (TiO₂) thin films fabricated by the magnetron-sputtering technique / Y.-H. Wang, K. H. Rahman, C.-C. Wu, K.-C. Chen // *Catalysts*. – 2020. – 10. – Article ID 598. – p. 1-8.

19. Ionized physical vapor deposition (IPVD): A review of technology and applications / U. Helmersson, M. Lattemann, J. Bohlmark, A. P. Ehasarian, J. T. Gudmundsson // *Thin solid films*. – 2006. – Vol. 513, Iss. 1-2. – pp. 1-24.

20. Hammadi, O. A. Electrical characteristics of argon discharge plasma employed in sputtering techniques / O. A. Hammadi, M. K. Khalaf, F. J. Kadhim // *Iraqi journal of materials*. – 2023. – Vol. 2. – Issue 4. – pp. 153-160.

21. High power impulse magnetron sputtering discharge, 2012, *Journal of Vacuum Science & Technology*. / J. T. Gudmundsson, N. Brenning, D. Lundin, U. Helmersson // *Journal of Vacuum Science & Technology. A. Vacuum, Surfaces, and Films*. – 2012. – Vol. 30. – Article ID 030801. – p. 1-12.

22. The influence of operating parameters on pulsed DC magnetron sputtering plasma / S. Karthikeyan, A. E. Hill, J. S. Cowpe, R. D. Pilkington // *Vacuum*. – 2010. – Vol. 85, Iss. 5. – p. 634-638.

23. Lu, T. Surface modification of biomaterials using plasma immersion ion implantation and deposition / T. Lu, Y. Qiao, X. Liu // *Interface focus*. – 2012. – Vol. 2. – p. 325-336.

24. Kodaira, F. V. P. Thin films growth by PIID technique from hexamethyldisilazane/argon mixture / F. V. P. Kodaira, R. P. Mota, P. W. P. Moreira Jr // *Surface and coatings technology*. – 2015. – Vol. 284. – p. 400-403.

25. Lubricating coating prepared by PIID on a forming tool / J. F. Martinatti, L. V. Santos, S. F. Durrant, N. C. Cruz, E. C. Rangel // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2012. – Vol. 370. – Article ID 012022. – p. 1-14.

26. Fu, Y. Similarity theory and scaling laws for low-temperature plasma discharge: a comprehensive review / Y. Fu, H. Wang, X. Wang // *Reviews of Modern Plasma Physics*. – 2023. – Vol. 7, Iss. 10. – p. 1-82.

27. Chen, F. F. Introduction to plasma physics and controlled fusion. / F. F. Chen // Third edition. Springer International Publishing Switzerland. – 2016. – 497 p.

28. The atmospheric-pressure plasma jet: A review and comparison to other

sources / A. Schütze, J. Y. Jeong, S. E. Babayan, J. Park, G. S. Selwyn, R. F. Hicks // IEEE Transactions on plasma science. – 1998. – Vol. 26, Iss. 6. – p. 1685-1694.

29. Atmospheric pressure Townsend discharges as a promising tool for the one-step deposition of antifogging coatings from N₂O/TMCTS mixtures / I. R. Duran, A. Durocher-Jean, J. Profili, L. Stafford, G. Laroche // Plasma processes and polymers. – 2020. – Vol. 20, Iss. 7. – Article ID 1900186. – p. 1-12.

30. The Current-Voltage Characteristics for electrode geometry model of positive DC corona discharge in Air / A. Y. Wardaya, Z. Muhlisin, J. E. Suseno, M. Nur, P. Triadyaksa, A. Khumaeni, S. Hadi, E. A. Sarwoko, J. Windarta // Gazi University Journal of Science. – 2022. – Vol. 35, Iss. 3. – p. 1140-1150.

31. DC gas breakdown and Townsend discharge in CO₂ / V. A. Lisovskiy, S. V. Dudin, P. P. Platonov, V. D. Yegorenkov // Problems of atomic science and technology. – 2020. – Vol. 6, Iss. 26. – p. 154-158.

32. Kogoma, M. Low-temperature atmospheric discharge plasma and its applications for the surface treatment / M. Kogoma, K. Tanaka // Reviews of Modern Plasma Physics. – 2021. – Vol. 5, Iss. 3. – p. 1-65.

33. Loveless, A. M. Linkage of electron emission and breakdown mechanism theories from quantum scales to Paschen's law / A. M. Loveless, A. M. Darr, A. L. Garner // Physycs of Plasmas. – 2021. – Vol. 28. – Article ID 042110. – p. 1-14.

34. Anders, A. Glows, arcs, ohmic discharges: An electrode-centered review on discharge modes and the transitions between them / // Applied Physics Reviews. – 2024. – Vol. 11. – Article ID 031310. – p. 1-36.

35. Gudmundsson, J. T. Physics and technology of magnetron sputtering discharge / J. T. Gudmundsson // Plasma Sources Science and Technology. – 2020. – Vol. 29. – Article ID 113001 – p. 1-53.

36. Lieberman, M. A. Principles of Plasma Discharges for Materials Processing / M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg // John Wiley & Sons, Inc, Second Edition, New Jersey. – 2005. – 794 p.

37. Towards universal plasma-enabled platform for the advanced nanofabrication: plasma physics level approach / O. Baranov, S. Xu, K. Ostrikov, B. B. Wang, U. Cvelbar, K. Bazaka, I. Levchenko // Rev. Mod. Plasma Phys. – 2018. – Vol. 2, Iss. 4. – p. 1-49.

38. Gao, S. Mechanism analysis of the effect of axial magnetic field on low pressure glow discharge / S. Gao, J.-K. Fang // IEEE Transactions on plasma science. – 2022. – Vol. 50, Iss. 4. – p. 782-790.

39. Ghimire, B. Influence of liquid conductance on the temporal evolution of self-organization patterns in atmospheric pressure DC glow discharge / B. Ghimire, V. I. Kolobov, K. G. Xu // Physica Scripta. – 2023. – Vol. 98. – p. 1-8.

40. Bieniek, M. S. Modeling of DC micro-glow discharge in atmospheric pressure helium self-organizing on cathodes / M. S. Bieniek, M. I. Hasan // Physics of Plasma. – 2022. – Vol. 29. – Article ID 034503. – p. 1-9.

41. Townsend to glow discharge transition for a nanosecond pulse plasma in helium: space charge formation and resulting electric field dynamics / M. S. Simeni, Y. Zheng, E. V. Barnat, P. J. Bruggeman // Plasma Source Science and Technology. – 2021. – Vol. 30. – Article ID 055004. – p. 1-12.

42. Inspektor, A. Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: A review. / A. Inspektor, P. A. Salvador // Surface & Coatings Technology. – 2014. – Vol. 257. – p. 138-153.

43. Plasma under control: Advanced solutions and perspectives for plasma flux

management in material treatment and nanosynthesis / O. Baranov, K. Bazaka, H. Kersten, M. Keidar, U. Cvelbar, S. Xu, I. Levchenko // *Applied physics Reviews*. – 2017. – Vol. 4. – Article ID 041302. – p. 1-33.

44. High-rate deposition of thick (Cr,Al)ON coatings by high speed physical vapor deposition / K. Bobzin, T. Brögelmann, C. Kalscheuer, T. Liang // *Surface & Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 322. – p. 152-162.

45. Sandager, M. K. Growth of Thin AlN Films on Si Wafers by Reactive Magnetron Sputtering: Role of Processing Pressure, Magnetron Power and Nitrogen/Argon Gas Flow Ratio / M. K. Sandager, C. Kjeldse, V. Popok // *Crystals*. – 2022. – Vol. 12, Iss. 10. – Article ID 1379. – p. 1-11.

46. An, Q. Copper target erosion during unbalanced magnetron sputtering under different electromagnetic fields / Q. An, J. Li, H. Fang // *Surface and Coatings Technology*. – 2024. – Vol. 477. – Article ID 130360. – p. 1-12.

47. Suppression of substrate temperature in DC magnetron sputtering deposition by magnetic mirror-type magnetron cathode / T. Motomura, K. Takemura, T. Nagase, N. Morita, T. Tabaru // *AIP Advances*. – 2023. – Vol. 13. – Article ID 025153. – p. 1-6.

48. Gudmundsson, J. T. Physics and technology of magnetron sputtering discharge / J.T. Gudmundsson // *Plasma sources science and technology*. – 2020. – 29. – Article ID 113001. – p. 53.

49. Rossnagel, S. M. Magnetron sputtering / S. M. Rossnagel // *Journal of Vacuum Science and Technology A*. – 2020. – 38. – Article ID 060805. – p. 1-22.

50. Low-pressure planar magnetron discharge for surface deposition and nanofabrication / O. Baranov, M. Romanov, M. Wolter, S. Kumar, X. Zhong, K. Ostrikov // *Physics of plasma*. – 2010. – 17. – Article ID 053509. – p. 1-9.

51. Experimental Investigation on Mechanical Properties of TiAlN Thin Films Deposited by RF Magnetron Sputtering / L. Natrayan, S. Balaji, G. Bharathiraja, S. Kaliappan, D. Veeman, W. D. Mammo // *Journal of Nanomaterials*. – 2021. – Article ID 5943486. – p. 1-7.

52. Nano dual-phase CuNiTiNbCr high entropy alloy films produced by high-power pulsed magnetron sputtering / Y. Li, C. Wang, D. Ma, X. Zeng, M. Liu, X. Jiang, Y.X. Leng // *Surface and Coatings Technology*. – 2021. – Vol. 420. – Article ID 127325. – p. 1-10.

53. High power impulse magnetron sputtering (HiPIMS) for the fabrication of antimicrobial and transparent TiO₂ thin films / B.-S. Lou, W.-T. Chen, W. Diyatmika, J.-H. Lu, C.-T. Chang, P.-W. Chen, J.-W. Lee // *Current Opinion in Chemical Engineering*. – 2022. – Vol. 36. – Article ID 100782. – p. 1-8.

54. Effect of roughness of substrate and sputtering power on the properties of TiN coatings deposited by magnetron sputtering for ATF / W.i Xiao, H. Deng, S. Zou, Y. Ren, D. Tang, M. Lei, C. Xiao, X. Zhou, Y. Chen // *Journal of Nuclear Materials*. – 2018. – vol. 509. – p. 542-549.

55. Structural regularities of the formation of nitride and boride coatings based on transition metals / A. Goncharov, A. Yunda, I. Kolinko, O. V. Maksakova // *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*. – 2023. – vol. 27. – iss 1. – p. 31-52.

56. Electron dynamics in radio frequency magnetron sputtering argon discharges with a dielectric target / B. Zheng, Y. Fu, K. Wang, T. Schuelke, Q. H. Fan // *Plasma sources science and technology*. – 2021. – 30. – Article ID 035019. – p. 1-14.

57. Magnetic control of breakdown: Toward energy-efficient hollow-cathode

magnetron discharge / O. Baranov, M. Romanov, S. Kumar, X. X. Zong, K. Ostrikov // *Journal of Applied Physics*. – 2011. – Vol. 109. – Article ID 063004. – p. 1-8.

58. Energy consumption and material fluxes in hard coating deposition processes / M. Gassner, M. R. de Figueiredo, N. Schalk, R. Franz, C.n Weiß, H. Rudigier, H. Holzschuh, W. Bürgin, M. Pohler, C.h Czettl, C. Mitterer // *Surface & Coatings Technology*. – 2016. – 299. – p. 49–55.

59. Magnetic field influence on ionization zones in high-power impulse Magnetron Sputtering / P. Ramana, M. Cheng, J. Weberski, W. Xu, T. Houlahan, J. Rivera, R. Su, I. Shchelkanov, D. Ruzic // *Vacuum*. – 2018. – 156. – p. 9-19.

60. Thermionic emission of electrons from metal surfaces in the warm dense matter regime / G. M. Petrov, A. Davidson, D. Gordon, B. Hafizi, J. Peñano // *Physics of Plasmas*. – 2021. – Vol. 28. – Article ID 083503. – p. 1-8.

61. Advanced Concepts and Architectures for Plasma-Enabled Material Processing / O. O. Baranov, I. Levchenko, S. Xu, K. Bazaka // *Synthesis Lectures on Emerging Engineering Technologies*, A Publication in the Morgan & Claypool Publishers series. – 2020. – 90 p.

62. Beilis, I. I. The Phenomenon of a Cathode Spot in an Electrical Arc: The Current Understanding of the Mechanism of Cathode Heating and Plasma Generation / I. I. Beilis // *Plasma*. – 2024. – 7. – p. 329–354.

63. Deng, Y. Physical vapor deposition technology for coated cutting tools: A review / Y. Deng, W. Chen, B. Li, C. Wang, T. Kuang, Y. Li // *Ceramics International*. – 2020. – 46. – p. 18373–18390.

64. Yang, W. Particle modeling of vacuum arc discharges / W. Yang, Q. Sun, Q. Zhou // *Journal of Applied Physics*. – 2020. – 128. – Article ID 060905. – p. 1-19.

65. A Comprehensive Review of Cathodic Arc Evaporation Physical Vapour Deposition (CAE-PVD) Coatings for Enhanced Tribological Performance / M. Muhammed, M. Javidani, T. E. Sadrabadi, M. Heidari, T. Levasseur, M. Jahazi // *Coatings*. – 2024. – Vol. 14, Iss. 3 (246). – p. 1-42.

66. DC vacuum arc deposition system with an anode generating magnetic field for preparation of TiN films. / J. Kito, Y. Saiki, K. Homma, S. Watanabe, T. Bando, T. Harigai, H. Takikawa, H. Gima, H. Sugita // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2023. – 62. – SI1012. – p. 1-12.

67. Effect of cathode shape on the lifetime of arc discharge negative Penning ion source / Y. Chen, L. Zhao, J. Long, X. He, P. Dong, T. Wang, J. Li, J. Shi, Z. Yang // *Nuclear Inst. And Methods in Physics Research, A*. – 2022. – Vol. 1033. – Article ID 166679. – p. 1-8.

68. Kravchenko, Y. O. Development of hydrophilic NbCuSi(N) & TiAlNb(N) coatings as a new strategy for medical implants modification / Y. O. Kravchenko, I. E. Garkusha, A. V. Taran, E. Coy, I. Iatsunskyi, K. Diedkova, A. Roshchupkin, O. Tymoshenko, M. Pogorielov, I. Misiruk // *Ceramics International*. – 2023. – Vol. 49. – p. 4099-4108.

69. Direct current arc plasma thrusters for space applications: basic physics, design and perspectives / O. Baranov, I. Levchenko, S. Xu, X. G. Wang, H. P. Zhou, K. Bazaka // *Reviews of Modern Plasma Physics*. – 2019. – Vol. 3, Iss. 7. – p. 1-63.

70. Pinchuk, N. Comparative analysis of structure formation and properties of pvd coatings TiN, Ti/TiN and TiN-MON / N. Pinchuk // *The scientific paradigm in the context of technological development and social change: Scientific monograph. Part 1*. Riga, Latvia: "Baltija Publishing". – 2023. – 532 p.

71. Film thickness effect on mechanical properties and milling performance of

nano-structured multilayer PVD coated tools / G. Skordaris, K.-D. Bouzakis, T. Kot-sanis, P. Charalampous, E. Bouzakis, O. Lemmer, S. Bolz // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – Vol. 307. – p. 452-460.

72. Chen, F. F. Principles of plasma processing / F. F. Chen, J. P. Chang. – 2002. – Plenum/Kluwer Publishers, University of California, Los Angeles. – 249 p.

73. Dahl-Hansen, R. P. On the Evolution of Stress and Microstructure in Radio Frequency-Sputtered Lead-Free (Ba,Ca)(Zr,Ti)O₃ Thin Films / R. P. Dahl-Hansen, M. S. S. Stange, T. O. Sunde, J. H. Ræder, P. M. Rørvik // *Actuators*. – 2024. – Vol. 13, Iss. 115. – p. 1-13.

74. Daniel, J. Dynamic Impact Resistance and Scratch Adhesion of AlCrN Coatings Sputtered Using Cathodic Arc Glow Discharge / J. Daniel, R. Žemlička, M. Alishahi, P. Karvánková, P. Souček, D. Karpinski, T. Fořt, H. Bolvardi, A. Lümekemann, P. Vašina // *Coatings*. – 2023. – Vol. 13, Iss. 515. – p. 1-14.

75. Bobzin, K. High-performance coatings for cutting tools / K. Bobzin // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2017. – Vol. 18. – p. 1-9.

76. Characterization of advanced coating architectures deposited by an arc-HiPIMS hybrid process / J. Vetter, K. Kubota, M. Isaka, J. Mueller, T. Krienke, H. Rudigier // *Surface & Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 350. – p. 154-160.

77. Fabrication and characterization of in-situ duplex plasma-treated nanocrystalline Ti/AlTiN coatings / C. Tan, T. Kuang, K. Zhou, H. Zhu, Y. Deng, X. Li, P. Cai, Z. Liu // *Ceramics International*. – 2016. – Vol. 42, Iss. 9. – p. 10783-10800.

78. Synthesis, structure, and protective properties of PVD MAX phase coatings. a review. Part II. Structure, properties, application prospects / E. N. Reshetnyak, A. S. Kuprin, T. A. Prikhna, M. A. Bortnitskaya, V. A. Belous // *Problems of Atomic Science and Technology*. – 2024. – Vol. 2, Iss. 150. – p. 76-95.

Надійшла до редакції 13.05.2025, розглянута на редколегії 13.05.2025.

Combined PVD Coating Technologies: From Classification to Innovative Solutions

The article presents a systematic analysis of modern physical vapor deposition (PVD) methods, aimed at enhancing coating technologies for functional surfaces in engineering applications. The key limitations of classical techniques—such as thermal evaporation, cathodic sputtering, and magnetron sputtering—are summarized, focusing on the challenges they face under complex production conditions. The main issues discussed include non-uniform target evaporation, low productivity, target overheating, insufficient coating adhesion, and the risk of arc discharge formation in plasma environments. To overcome these drawbacks, contemporary modifications of traditional PVD processes are explored, including High Power Impulse Magnetron Sputtering (HIPIMS), unbalanced magnetron sputtering, Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition (PIII&D), and methods utilizing radio-frequency (RF) power supply. Based on critical analysis, an analytical classification scheme of PVD methods is proposed, illustrating both the structural distinctions between evaporation- and sputtering-based approaches and the logical progression of their development in response to specific technological challenges. This scheme reveals internal connections between conventional and innovative methods and serves as a foundation for the further development of hybrid deposition processes capable of ensuring high coating quality, density, adhesion, and wear resistance. It also highlights the crucial

role of magnetic fields in enhancing sputtering processes—particularly in magnetron and unbalanced magnetron modes—where magnetic confinement of electrons enables a high degree of plasma ionization and more precise energy control of the deposited particles. The integration of pulsed power regimes, such as HIPIMS, allows the formation of dense, high-strength coatings with improved adhesion without requiring high substrate temperatures. Thus, the proposed analytical scheme not only structures current deposition technologies but also opens up possibilities for their strategic advancement through deeper analysis of the physical mechanisms underlying each method. The study also emphasizes the need to integrate various deposition techniques to achieve synergistic effects, particularly through the combination of ionization strategies, plasma control, and managed thermal input. The findings can serve as a methodological basis for designing new hybrid PVD deposition systems aligned with the principles of Industry 4.0 and adaptive manufacturing.

Keywords: physical vapor deposition (PVD), plasma, surface treatment, combined coating formation methods.

Відомості про авторів

Степаненко Денис Романович – старший викладач кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут» м. Харків, Україна, D.Stepanenko@khai.edu. ORCID: 0000-0002-6765-096X

Баранова Єлизавета Олегівна – студент і науковий співробітник кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут» м. Харків, Україна, Y.O.Baranova@khai.edu. ORCID: 0009-0002-6365-4979

Баранов Олег Олегович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут» м. Харків, Україна, O.Baranov@khai.edu. ORCID: 0000-0001-5356-1125

About the Authors

Stepanenko Denys, Senior Lecturer of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, D.Stepanenko@khai.edu. ORCID: 0000-0002-6765-096X.

Baranova Yelyzaveta, MSc student and researcher of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, Y.O.Baranova@khai.edu. ORCID: 0009-0002-6365-4979.

Baranov Oleg, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, O.Baranov@khai.edu. ORCID: 0000-0001-5356-1125