
МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (G9, G8, G11)

УДК 583.95

**ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ НА ФОРМУВАННЯ НАНОСТРУКТУРОВАНОГО
СТАНУ ІОННО-ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ СИСТЕМИ HfN–ZrN
НА ТВЕРДОСПЛАВНИХ РІЖУЧИХ ІНСТРУМЕНТАХ**

Канд. техн. наук Ю. В. Широкий, асист. О. Д. Семененко

**INFLUENCE OF SURFACE ENERGY ON THE FORMATION OF THE
NANOSTRUCTURED STATE OF ION-PLAZMA COATINGS OF THE HfN–ZrN SYSTEM
ON CARBIDE CUTTING TOOLS**

PhD (Tech.) Y. V. Shyrokyi, assistant O. D. Semenenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.216.2026.362423>



***Анотація.** У статті досліджено вплив поверхневої енергії на формування структури та властивостей плазмових покриттів під час утворення наноструктур на твердосплавних ріжучих інструментах зі сплавів H13A і GC1025. Наведено результати порівняльного аналізу експериментальних і теоретичних досліджень можливості формування наноструктур у покритті складу 0,18 HfN + 0,82 ZrN, нанесеному на твердосплавні пластини за дії потоку іонів гафнію, цирконію та азоту. Теоретичне дослідження базовано на врахуванні впливу поверхневої енергії на кінетику формування покриття і процеси росту зерен. Експериментальні дослідження проведено із застосуванням методів растрової електронної мікроскопії, зокрема за допомогою мікроскопа РЕМ-106, що дало змогу визначити характерні особливості мікроструктури та розміри зерен сформованого покриття.*

У результаті порівняння розміру зерна, отриманого експериментально та на основі теоретичної моделі, встановлено наявність наноструктур у сформованому покритті. Отримані результати підтверджують важливу роль поверхневої енергії і температурних факторів у процесах формування наноструктурних плазмових покриттів. Це відкриває перспективи підвищення ефективності та довговічності твердосплавних ріжучих інструментів у промисловому застосуванні.

***Ключові слова:** розмір зерна, поверхнева енергія, наноструктурні покриття, твердосплавні інструментальні матеріали, ріжучий інструмент, зносостійкість, плазмові покриття.*

***Abstract.** The paper investigates the influence of surface energy on the formation of the structure and properties of plasma coatings during the formation of nanostructures on cemented carbide cutting tools made of H13A and GC1025 alloys. The relevance of the research is determined by the need to improve the wear resistance, hardness, and durability of cutting tools widely used in modern mechanical engineering. One of the effective ways to improve the performance characteristics of tool materials is the formation of nanostructured coatings, whose properties are*

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Широкий Ю. В., Семененко О. Д., 2026.

largely determined by the features of the microstructure and grain size. The paper presents the results of a comparative analysis of experimental and theoretical studies of the possibility of forming nanostructures in a coating with the composition $0.18 \text{ HfN} + 0.82 \text{ ZrN}$ deposited on cemented carbide plates under the action of a flow of hafnium, zirconium, and nitrogen ions. The theoretical study is based on considering the influence of surface energy on the kinetics of coating formation and grain growth processes. Experimental studies were carried out using scanning electron microscopy methods, in particular with the use of the SEM-106 microscope, which made it possible to determine the characteristic features of the microstructure and grain size of the formed coating.

As a result of comparing the grain size obtained experimentally and based on the theoretical model, the presence of nanostructures in the formed coating was established. It was shown that the sizes of structural elements correspond to the nanometer range, indicating the formation of a nanostructured state of the coating. Satisfactory agreement between the results of theoretical modeling and experimental data was revealed when taking into account the increase in the plate temperature during ion surface cleaning and in the process of coating deposition. The obtained results confirm the important role of surface energy and temperature factors in the processes of formation of nanostructured plasma coatings. It is shown that controlling the parameters of ion-plasma deposition makes it possible to influence the microstructure of the coating and to form nanostructured layers with improved physical and mechanical properties. This opens prospects for increasing the efficiency and durability of cemented carbide cutting tools in industrial applications.

Keywords: *grain size, surface energy, nanostructured coatings, cemented carbide tool materials, cutting tool, wear resistance, plasma coatings.*

Вступ. Підвищення працездатності ріжучих інструментів є одним з основних викликів у металообробній промисловості, де постійне удосконалення технологій обробки матеріалів відіграє критичну роль. Серед ефективних стратегій розв'язання цієї проблеми виділяють розроблення зносостійких покриттів на ріжучих пластинах, виготовлених із твердих сплавів. Такі покриття не тільки продовжують термін служби інструментів, але і дають змогу оптимізувати процеси виробництва, зменшуючи витрати на заміну та обслуговування. Наприклад, у сучасних заводах, де обробляють високотехнологічні деталі для авіації чи автомобілебудування, застосування таких покриттів стає стандартом, забезпечуючи вищу продуктивність і точність.

Широке впровадження інноваційних конструкційних матеріалів із покращеними експлуатаційними характеристиками, такими як стійкість до високих температур, механічна міцність із нагріванням та опір корозії, часто обмежено їхньою низькою оброблюваністю. Це створює серйозні

перешкоди для промисловості, адже матеріали, як-от титанові сплави чи жароміцні сталі, потребують спеціальних підходів щодо механічної обробки. Тому одним із найважливіших науково-практичних завдань є підвищення ефективності металообробного інструменту, що дасть змогу розширити застосування цих матеріалів у масовому виробництві. Серед найперспективніших методів удосконалення властивостей ріжучих інструментів виділяють нанесення зносостійких покриттів на робочі поверхні за плазмовою технологією. Цей процес базований на використанні нітридів, карбідів і карбонітридів тугоплавких металів, таких як титан, хром чи вольфрам, і дає змогу створювати покриття різного складу на інструментах із швидкорізальних сталей і твердих сплавів. Перевага цієї технології полягає в її гнучкості: вона допомагає адаптувати покриття до конкретних умов експлуатації, наприклад для роботи в агресивних середовищах або високих швидкостей. Механізм зносу ріжучого інструменту варіюється залежно

від режимів роботи, включаючи такі фактори, як температура, тиск і тип оброблюваного матеріалу. Зокрема, твердосплавні інструменти з покриттям, які функціонують на швидкостях різання 50–100 м/хв, переважно зношуються через адгезійні процеси, коли частинки матеріалу «прилипають» до поверхні інструменту, утворюючи наростання. За швидкостей 100–150 м/хв ефективність покриттів значно падає через схильність до корозійного розтріскування та глибокої корозії з утворенням поверхневих осередків окиснення, що ослаблює структуру. Однак працездатність інструменту з покриттям різко зростає за швидкостей понад 150 м/хв, коли покриття посилює опір твердосплавної матриці дифузійному розчиненню в оброблюваному матеріалі, а знос відбувається через пластичну деформацію ріжучого клина з подальшим розтріскуванням. У таких умовах покриття діє як бар'єр, запобігаючи швидкому руйнуванню, і допомагає інструменту витримувати інтенсивні навантаження, що є особливо актуальним для високошвидкісної обробки в машинобудуванні та аерокосмічній промисловості.

Як продемонстровано в дослідженнях [1–9], об'єм матеріалу, що знятий за період стійкості, а також сама стійкість ріжучого інструменту безпосередньо залежать від розміру зерна в структурі. Це підкреслює, що саме наноструктурні покриття на ріжучому інструменті забезпечують максимальну ефективність, допомагаючи зменшити кількість ріжучих пластин із твердого сплаву для обробки певної партії деталей. Такий підхід не тільки економить ресурси, але й знижує екологічний вплив через зменшення відходів виробництва. Усе це робить питання формування наноструктур на ріжучому інструменті одним із найважливіших для сучасного машинобудування, де інновації в матеріалознавстві безпосередньо впливають на конкурентоспроможність підприємств.

Застосування багатокомпонентних покриттів, утворених із впливом іонів різних матеріалів (як металів, так і неметалів), призводить до формування наноструктур на різних глибинах із різними розмірами зерен. При цьому можуть чергуватися наноструктурні зерна з субмікроструктурними та навіть мікрозернами, створюючи неоднорідну структуру, яка нагадує шаруватий композит. Така варіативність може спричинити руйнування покриття саме по межах мікрота субмікроструктурних зерен, що знижує загальну довговічність через концентрацію напружень. Тому необхідно вивчати різні типи складних покриттів з урахуванням розмірів зерен, які в них формуються, аби оптимізувати їх для конкретних завдань. Розмір зерна можна регулювати зміною енергії іонів під час процесу конденсації, що відкриває шлях для створення багатшарових наноструктурних покриттів і, як наслідок, підвищення загальної працездатності ріжучого інструменту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасному матеріалознавстві значну увагу приділяють вивченню впливу поверхневої енергії на формування структури та властивостей плазмових покриттів, особливо зі створенням наноструктур на твердосплавних ріжучих інструментах. Поверхнева енергія відіграє головну роль у процесах адгезії, змочуваності та фазових перетвореннях під час плазмового нанесення, що дає змогу оптимізувати механічні, трибологічні та експлуатаційні характеристики інструментів. Це особливо актуально для твердосплавних матеріалів, де наноструктури покращують зносостійкість, твердість і термічну стабільність, зменшуючи термічні та механічні навантаження під час різання. Останні дослідження демонструють, що контроль поверхневої енергії через плазмову обробку, лазерне мікротекстурування чи гібридні методи допомагає досягти значного підвищення міцності адгезивних з'єднань і подовження терміну служби інструментів.

У роботі [1] досліджено формування наноструктурованих шарів на титанових сплавах і сталях за допомогою іонного імплантування та вакуумно-дугового осадження нітридів і карбідів, де поверхнева енергія впливає на фазові перетворення, утворюючи метастабільні фази та наноккомпозити з підвищеною твердістю і корозійною стійкістю. У дослідженні [2] розглянуто вплив плазми на структурний стан поверхневих шарів карбідів вольфраму, показуючи, як поверхнева енергія визначає глибину дифузії та формування ультратонкозернистих структур.

У дослідженні [4] вивчено вплив лазерного мікротекстурування та низькотемпературної плазми на поверхню вільної енергії (ПВЕ) WC-Co карбідів (марки B2), де плазма з інертних газів (Ar, He) підвищує ПВЕ з 41.7 мДж/м² до 58.8–66.9 мДж/м², покращуючи змочуваність і міцність адгезивних з'єднань на 50 % (міцність на зсув до 32 МПа) порівняно з механічним шліфуванням. Лазерне текстурування збільшує шорсткість (Ra 3.25 мкм) і ПВЕ до 63.3 мДж/м², сприяючи механічному зачепленню та утворенню градієнтних наноструктур. У роботі [5] проаналізовано градієнтні багатошарові покриття TiBN, нанесені PACVD на наноструктуровані WC-Co, де поверхнева енергія впливає на адгезію і термічну стабільність, зменшуючи коефіцієнт тертя з 0.32 до 0.22 і глибину зносу до 1.2 мкм, подовжуючи термін служби інструментів у два рази. У дослідженні [6] показано, що наноструктуровані багатошарові покриття (наприклад Ti-Zr-N/10x(TiN/ZrN)) підвищують твердість до 3000–3500 HV і термін служби в 1.4–3.1 раза завдяки дисперсії енергії тріщин. У роботі [7] розроблено методологічний підхід щодо багатошарових покриттів (наприклад TiN-TiCN-TiZrN), де поверхнева енергія оптимізує механічні властивості шарів, підвищуючи зносостійкість у два рази порівняно з TiN.

У роботі [13] досліджено ієрархічні адаптивні PVD покриття, де поверхнева енергія впливає на термічний перерозподіл,

утворюючи трибошарові плівки та наноструктури, підвищуючи зносостійкість. У дослідженні [14] розглянуто критичні сировини для інструментів, де поверхнева енергія в CVD і PVD оптимізує градієнтні шари TiCN, покращуючи адгезію та властивості. У роботі [15] вивчено покращене плазмове ецування та нітридування для цементованих карбідів, де поверхнева енергія сприяє формуванню щільних шарів.

Загалом аналіз показує, що поверхнева енергія є визначальним фактором для формування наноструктур плазмових покриттів, даючи змогу досягти підвищення твердості, зменшення тертя і подовження терміну служби інструментів.

Визначення мети та задач дослідження. Мета дослідження полягає в теоретичному та експериментальному аналізі впливу параметрів іонної обробки на формування наноструктури твердих сплавів, зокрема визначенні закономірностей зміни розміру зерна залежно від енергетичних характеристик іонних потоків, а також у розробленні підходів щодо прогнозування структурних параметрів матеріалу з метою підвищення його зносостійкості та експлуатаційної ефективності. Наукові дослідження продемонстрували значний вплив розміру зерна у твердих сплавах на їхню експлуатаційну ефективність. Це призвело до розроблення матеріалів із різними градаціями зернистості: від сплавів зі стандартним розміром зерна до мелкозернистих і надмелкозернистих варіантів.

Значна кількість публікацій [1–7] присвячена вивченню наноструктур, переважно з акцентом на експериментальні дані або їх узагальнення. Водночас існує нагальна потреба в методах прогнозування розміру зерна залежно від технологічних умов обробки. Цю проблему можна розв'язати через теоретичний аналіз процесів формування наноструктур під впливом іонних потоків із різними енергіями, зарядами і типами іонів. Такий підхід не лише дасть змогу прогнозувати розмір зерна за заданими параметрами

іонних потоків, але й оцінити точність теоретичних моделей, порівнюючи з експериментальними результатами, отриманими за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ-106.

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан досліджень про вплив розміру зерна на властивості твердих сплавів і наноструктур, спираючись на літературні джерела.

2. Удосконалити базову модель взаємодії іонних потоків із конструкційними матеріалами, включивши до енергетичного балансу компоненту, пов'язану з утворенням нанозерен, з урахуванням взаємодій між сусідніми зернами.

3. Провести експериментальні дослідження на модернізованій установці БУЛАТ-6, варіюючи енергії іонів у діапазоні від 100 до 10^4 eV і щільності іонних потоків від 10^2 до $5 \cdot 10^4$ A/m², для отримання наноструктур на поверхні ріжучих інструментів.

4. Виміряти розмір зерна в отриманих наноструктурах за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ-106, що забезпечує точність у діапазоні від 1 до 5000 нм.

5. Порівняти теоретичні прогнози розміру зерна з експериментальними даними для оцінювання адекватності моделі та визначення оптимальних технологічних параметрів для підвищення зносостійкості інструментів.

Основна частина. Поверхнева енергія є однією з основних характеристик процесів, що протікають на межі розділів фаз за участю активних поверхонь. Поверхневий натяг визначає вільну енергію або роботу, яку необхідно витратити, щоб утворити одиницю площі поверхні чи поділу фаз. Наявність поверхневого натягу обумовлена тим, що атоми на поверхні рідини або твердого тіла мають більшу потенційну енергію, ніж атоми чи іони всередині них, тому поверхневу енергію зазвичай розглядають як надлишок енергії, що припадає на одиницю площі.

Уся поверхнева енергія на межі розділу фаз призводить до значної зміни кінетики формування покриттів. Формування покриттів непогано описано теорією їхніх дислокацій, то можна вибрати два керуючі параметри – щільність дислокацій і поверхневу енергію [20]. У цьому випадку процес формування покриття може бути розглянутий відносно теорії катастроф. Катастрофами називають стрибкоподібні зміни у вигляді раптової відповіді системи на плавну зміну зовнішніх умов [8]. Теорія катастроф може бути використана в технічних завданнях для математичного моделювання процесів, у яких можна спостерігати катастрофи. Збільшення плівки покриття (фазовий перехід I роду) також є катастрофою.

Для математичного моделювання можливий розгляд трьох об'єктів: мета функціонування; одна чи дві координати процесу функціонування; один або кілька керуючих параметрів, змінюючи які, ми керуємо ходом процесу.

У дослідженні розглянуто мету функціонування, як формування покриття, а координатою цього процесу є швидкість дисипації вільної енергії F , обумовленої утворенням плівки з $N \gg 1$ кластерів або острівців. Як керуючі параметри візьмемо щільність дислокацій ρ і поверхневу енергію σ . Для однієї координати \dot{F} і двох керуючих параметрів теорії катастроф є лише одна стандартна, канонічна залежність для запису залежності функції мети:

$$\dot{F}(N) = 0,25N^4 - 0,5\rho N^2 - \sigma N, \quad (1)$$

де $F(N)$ – потенційна функція, яка є енергією утворення N кластерів.

Катастрофу, що має таку потенційну функцію, називають катастрофою типу «складання» [12]. Складання має перед критичною областю один стійкий стан рівноваги (одну ямку потенційної функції), а в закритій області – два стійких і один

нестійкий стан рівноваги (тобто дві ямки, розділені пагорбом).

Рівняння (1) визначає статичну модель формування покриття. Для нас важлива залежність швидкості дисипації вільної енергії від поверхневого натягу σ . Із рівняння (1) випливає, що чим більше поверхневе натягання, тим менша швидкість дисипації вільної енергії. Це означає, що більшість підведеної енергії витрачено на утворення покриття. При цьому зазвичай формуються комірчасті наноструктури, що мають підвищену твердість.

Утворення кластерів у покритті з плазмовим осадженням металів підпорядковано закономірностям утворення зародків нової фази для кристалізації розплавів.

У дослідженні запропонована модель утворення кластерів для формування покриттів. Для прикладу розглянемо покриття із кількістю дефектів m . Нехай відстань між дефектами однакова і дорівнює R . Опишемо навколо кожного дефекту 0 сферу радіусом R . Нехай щільність кількості частинок у цій сфері дорівнює n_0 , тоді ймовірність $W_0(r)$ того, що найближча частинка знаходиться на відстані r від частинки 0 , можна отримати з класичної статистичної фізики:

$$W_0(r) = 4\pi n_0 r^3 \exp[-4\pi n_0 r^3 / 3]. \quad (2)$$

Імовірність знаходження N_0 частинок у зоні дефекту 0 радіусом r дорівнює

$$W_{N_0}(r) = \prod_{k=1}^{N_0} (4\pi n_0) r^{3N_0} \exp[-4\pi n_0 r^3 / 3]. \quad (3)$$

Імовірність рівняння (3) визначимо з іншого боку, як відношення кількості

частинок N_0 у зоні дефекту до загальної кількості частинок у виділеній сфері:

$$Q_0 = 4 / 3\pi n_0 R^3,$$

$$p_0 = \frac{W_{N_0}(r)}{Q_0} = (4\pi n_0)^{N_0} r^{3N_0} \exp[-4\pi n_0 r^3 / 3]. \quad (4)$$

Для системи з m дефектів маємо

$$\begin{aligned} p_0 &= (4\pi n_0)^{N_0} r^{3N_0} \exp[-4\pi N_0 n_0 r^3 / 3] = \frac{N_0}{Q_0}, \\ p_1 &= (4\pi n_1)^{N_1} r^{3N_1} \exp[-4\pi N_1 n_1 r^3 / 3] = \frac{N_1}{Q_1}, \\ &\dots\dots\dots \\ p_m &= (4\pi n_m)^{N_m} r^{3N_m} \exp[-4\pi N_m n_m r^3 / 3] = \frac{N_m}{Q_m}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для всього покриття з кількістю дефектів $0, 1, 2, \dots, m$ маємо

$$P = \prod_{i=0}^m p_i = \prod_{i=0}^m (4\pi n_i)^{N_i} r^{3N_i} \exp[-4\pi N_i n_i r^3 / 3] = \frac{\prod_{i=0}^m N_i}{\prod_{i=0}^m Q_i}. \quad (6)$$

Системи рівнянь (5) і (6) являють собою систему трансцендентних рівнянь, розв'язати яку можна лише наближеними або чисельними методами. У зв'язку з цим

можна чисельно оцінити, ґрунтуючись на реальній ситуації та перше рівняння системи (5):

$$\ln N_0 - \ln Q_0 = N_0 \ln(4\pi n_0) + 2N_0 \ln r - \frac{4\pi}{3} N_0 n_0 r^3. \quad (7)$$

Відповідна оцінка дає перший член лівої частини рівняння (7) і перші два члени правої частини – нехтувано малі. У результаті отримаємо

$$N_0 = \frac{3 \ln Q_0}{4\pi n_0 r^3}. \quad (8)$$

Ураховуючи, що $4\pi r^3 / 3 = V$ або $\ln n_0 > \ln R$, маємо

$$V_0 = \frac{\ln n_0}{n_0 N_0}. \quad (9)$$

Беручи як функцію відгуку обсяг кластера, отримаємо

$$V_0 = c \frac{kT}{G^0} \cdot N_0. \quad (10)$$

Порівнюючи вирази (9) та (10), отримаємо

$$N_0 = \left(\frac{1}{c} \cdot \frac{\ln n_0}{n_0} \cdot \frac{G^0}{kT} \right)^{1/2}, \quad (11)$$

де n_0 – щільність кількості частинок у кластері;

- c – константа;
- k – постійна Больцмана;
- T – температура;
- $G_0 = \sigma \cdot S$ – енергія Гіббса, де σ – поверхнева енергія;
- S – площа покриття.

У разі кристалізації переохолодженого розплаву критичний радіус зародка до r можна виразити через переохолодження ΔT [11]:

$$r_k = 2M \sigma T_0 / \rho q \Delta T, \quad (12)$$

- де M – молекулярна вага;
- ρ – щільність зерна;
- q – теплота;
- T_0 – рівноважна температура двох фаз нескінченно великого радіуса;
- σ – міжфазний поверхневий натяг кристала-зародка.

Гомогенне зародження кристалів різних металів починається з переохолодженням $\Delta T = 0,2 \cdot T_{пл}$, де $T_{пл}$ – температура плавлення. Приймаючи рівність $T_0 = T_{пл}$, отримаємо

$$r_k = 10M\sigma / \rho q. \quad (13)$$

Поверхневу енергію нанокристала можна визначити як

$$\sigma(r) = \sigma_\infty \left(1 - \frac{d}{r+d}\right), \quad (14)$$

де d – критичний радіус, що характеризує розмірні ефекти.

Із формули (14) випливає, що умова гомогенного утворення зародка кристала має задовольняти умову

$$r = r_k \geq d / 3. \quad (15)$$

Тут множник $1/3$ виникає з обліком поверхневого натягу кристал – розплав.

Для щільності потоку атомів або іонів $\rho(r, t)$, що формують покриття,

$$p(r, t) = \text{const} \cdot J_0\left(\frac{2r}{R}\right) \cdot \frac{1}{\beta(t)}, \quad (16)$$

де J_0 – функція Бесселя нульового порядку;
 r – поточна координата;
 R – геометричний розмір підкладки;
 $\beta(t)$ – швидкість руху поділу фаз.

За виразом (16), щільність потоку атомів зменшується зі збільшенням швидкості наростання покриття $\beta(t)$, і це призводить до погіршення якості покриття. Така ситуація характерна в тому випадку, коли теплофізичні параметри підложки і матеріалу, що наносять, сильно розрізняються. Щоб виправити таку ситуацію, необхідно використовувати композиційні (багатокомпонентні) катоди для нанесення покриттів. Мікротвердість покриття, що наносять, залежить від його товщини:

$$\mu = \mu_0 \cdot \left(1 - \frac{d}{h}\right), \quad (17)$$

де μ – мікротвердість осаджуваного покриття;

μ_0 – масивного зразка;

h – товщина осаджуваного покриття.

Параметр d пов'язаний із поверхневим натягом такою формулою:

$$d = \frac{2\sigma v}{RT}, \quad (18)$$

де σ – поверхневий натяг масивного зразка;

v – об'єм одного моля;

R – постійна газова;

T – температура.

Дослідження [10-15] показують збільшення зносостійкості нанокристалічних матеріалів порівняно з об'ємними. Навпаки, тертя зменшується для різних покриттів. Розглянемо якісно мікромеханізм тертя металів із покриттями. Він складається, в основному, із двох механізмів: руйнування контактів – що стосуються тіл, і міжмолекулярна взаємодія тіл.

Силу тертя ковзання в разі молекулярного механізму можна подати як [6]

$$F_{mp} = \int_L \sigma dl \approx \sigma L, \quad (19)$$

де σ – поверхневий натяг твердого тіла;

L – довжина пройденого з ковзанням шляху.

Робота A , Дж, що витрачена на руйнування контактів (частинок), пропорційна знову утвореній поверхні контактів (частинок):

$$A = \gamma \Delta S = K_R D^2, \quad (20)$$

де γ – тимчасовий опір стиску, Н·м/м²;

ΔS – площа знову утвореної поверхні, м²;

K_R – коефіцієнт пропорційності, Н·м/м²;

D – характерний розмір частинки (ділянки), м.

Рівняння (20) відповідає гіпотезі Ріттингера [22]. Якщо з руйнуванням частинки кубічної форми енергія витрачена переважно на деформацію об'єму, то в цьому випадку виконується робота прямо пропорційна зміні його початкового об'єму (формула Кіка):

$$A = K\Delta V = K_K D^3, \quad (21)$$

де K і K_K – коефіцієнти пропорційності, Н·м/м³;

ΔV – деформований об'єм, м³.

Ребіндер П. А. об'єднав обидві гіпотези, і в цьому випадку повна робота руйнування дорівнює

$$A = K_R D^2 + K_K D^3, \quad (22)$$

За гіпотезою Бонда, повна робота руйнування пропорційна середньому геометричному між об'ємом і площею поверхні частинки:

$$A = K_B \sqrt{D^2 D^3} = K_B D^{2.5}. \quad (23)$$

Формули (20) – (23) розрізняються коефіцієнтами пропорційності та показниками ступеня діаметра частки. Однак визначити експериментально ці коефіцієнти досить важко. Роботу з руйнування контакту в парі тертя можна уявити як енергію диспергування:

$$A = G \cdot S = F_{mp} \cdot L, \quad (24)$$

де σ – поверхнева енергія твердого тіла;

S – його питома поверхня.

Загальна робота сил тертя являтиме собою роботу з подолання сил міжмолекулярної взаємодії та роботу з руйнування контактів:

$$A = \sigma \cdot L^2 + \sigma \cdot S = \sigma(L^2 + S). \quad (25)$$

З рівняння (25) випливає, що робота сил тертя визначена зазвичай поверхневою енергією твердого тіла. Із великою точністю величина поверхневої енергії чистого металу пов'язана з його температурою плавлення співвідношенням – $\sigma = 0,7 \cdot 10^{-3} T_{пл}$. Тоді формулу (25) можна переписати так:

$$A = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_{пл} \cdot (L^2 + S). \quad (26)$$

Рівняння (26) показує зв'язок роботи сил тертя з температурою плавлення чистих металів. Відомо, що процеси пластичної деформації, плавлення та руйнування відбуваються за різними механізмами. Однак усі ці механізми є наслідком порушення кристалічної ґратки матеріалу, і, отже, енергетично їх можна розглядати аналогічно, тобто за принципом приведення до єдиного кількісного критерію різних видів енергії.

Відомо, що механізми пластичної деформації, плавлення та руйнування матеріалів відрізняються один від одного. Проте всі вони є результатом порушення структури кристалічної ґратки, тому енергетично їх можна аналізувати за єдиним підходом, зводячи різні форми енергії до спільного кількісного показника.

За теорією відриву, яка ґрунтована на взаємозв'язку міцності матеріалу з характеристиками його плавлення, цей механізм пояснюють втратою стабільності кристалічної ґратки, коли її параметри досягають значень, еквівалентних температурі плавлення.

Критерій міцності на відрив виражений формулою

$$\sigma_0 = \frac{GE}{3G - E} \int_T^{T_s} \alpha_T dT, \quad (27)$$

де σ_0 – опір відриву;

G – модуль зсуву;

E – модуль пружності;

α_T – коефіцієнт лінійного теплового розширення;

T_s – температура плавлення.

У роботі [1] проаналізовано концепції граничних і варіативних значень енергії активації для різних процесів у металах із впливом механічних напружень і температур.

Універсальний енергетичний показник q , який відображає максимальну енергію активації процесів,

$$q = -\left(\int_0^{T_s} C_p dT - T_s \int_0^{T_s} \frac{C_p}{T} dT\right). \quad (28)$$

Більш доцільним є застосування термодинамічних розрахунків, заснованих на принципах нерівноважної квантової термодинаміки, як це описано в роботі [13]. Величину реакції підсистеми на зовнішній вплив обчислюють за формулою

$$\Phi = \frac{kT}{C} \cdot \frac{A}{G^0} \cdot \bar{N}, \quad (29)$$

- де A – робота (енергія) зовнішнього поля;
- T – температура;
- k – стала Больцмана;
- G^0 – потенціал Гіббса об'ємного зразка;
- N – середня кількість елементарних носіїв збудження;
- C – константа.

У випадку металів потенціал Гіббса збігається з хімічним потенціалом ($G^0 = \mu$).

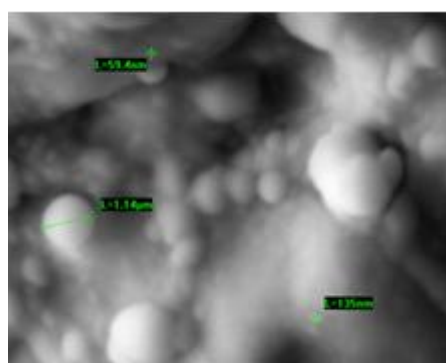
Якщо як функцію відгуку вибрати коефіцієнт тертя, то отримаємо вираз

$$k_{mp} = C \cdot T \cdot \frac{A}{\mu} \cdot \bar{N}. \quad (30)$$

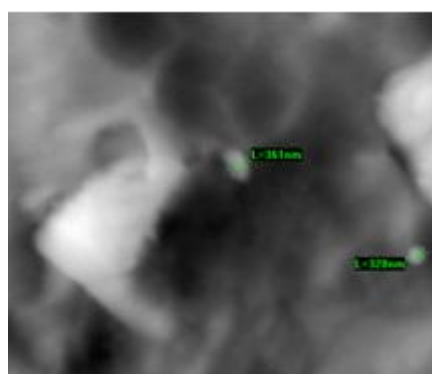
Оскільки робота сил тертя дорівнює добутку поверхневої енергії σ на довжину пройденого шляху L , то встановлений зв'язок між коефіцієнтом тертя і поверхневою енергією. При цьому коефіцієнт тертя демонструє обернену залежність від хімічного потенціалу (енергії Фермі).

У статті аналізували покриття складу 0,2 HfN + 0,8 ZrN, на теоретичному рівні вивчали вплив іонів гафнію, цирконію та азоту на твердосплавні пластини марок H13A і GC1025 за енергій у діапазоні від 100 до 500 еВ.

На рис. 1 для енергій іонів 110 і 500 еВ показано зразки мікрофотографій із зазначеними розмірами зерен, зафіксованими за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ-106 у покритті 0,18 HfN + 0,82 ZrN на твердому сплаві H13A. Ці ілюстрації ґрунтовані на подібних мікрознімках пластин, які під час напилення були розміщені на відстанях 7,5 см над віссю потоку, безпосередньо вздовж осі потоку та 7,5 см нижче осі потоку.



а



б

Рис. 1. Мікрофотографії покриття 0,18 HfN + 0,8 ZrN на твердому сплаві H13A після дії потоку іонів з енергією: а – 110 еВ; б – 500 еВ

Статистичний аналіз мікрофотографій, отриманих під час експериментів, дав змогу побудувати графічні залежності середнього розміру зерна від енергії іонів, що впливають на процес формування покриттів. Ці залежності для випадків нанесення покриття на твердий сплав H13A і GC1025 подано на рис. 2. Аналіз показує, що для покриття на базі GC1025 формування наноструктур можливе лише в одному специфічному режимі (за енергії $E = 110$ еВ), коли пластини розміщені на 7,5 см вище осі іонного потоку. У всіх інших

режимах переважно утворюються субмікронні структури, що обмежує потенціал для досягнення нанорівня.

Щодо покриття на H13A, то ситуація більш сприятлива: практично за будь-якого розташування пластин за енергії іонів 110 еВ, а також у двох режимах за енергії 250 еВ вдається реалізувати наноструктури. Водночас у решті режимів і за вищих енергій іонів переважають субмікроструктури, що свідчить про чутливість процесу до параметрів розміщення та енергії.

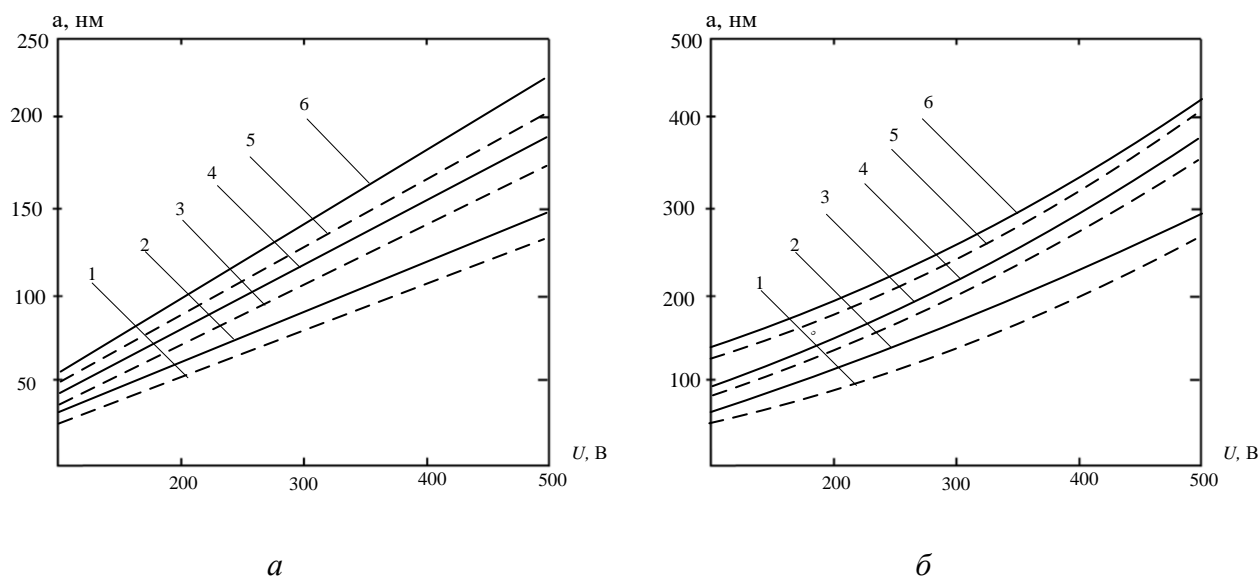


Рис. 2. Залежність розміру зерна від потенціалу підкладки для покриття $0,2 \text{ HfN} + 0,8 \text{ ZrN}$: а – твердий сплав H13A: 1 – розмір зерна в зоні дії іона азоту; 2, 4, 6 – пластини для напилення розташовані вище осі потоку; 3 – розмір зерна в зоні дії іона цирконію (Zr); 5 – іона гафнію; б – твердий сплав GC1025 (б): 1 – розмір зерна в зоні дії іона азоту; 2 – пластина для напилення розташована вище осі потоку на 7,5 см; 3 – нижче на 7,5 см; 4 – розмір зерна в зоні дії іона цирконію (Zr); 5 – іона гафнію; 6 – пластина для напилення розташована по осі потоку

Для забезпечення точного зіставлення теоретичних розрахунків з експериментальними даними було змодельовано розміри зерен за методикою, описаною в роботі [1], з обов'язковим урахуванням енергетичних витрат на формування нанокластерів [17], а також теплового впливу на пластини під час

етапів іонного очищення та безпосереднього нанесення покриття. Отримані розрахункові криві для покриття на H13A і GC1025 охоплюють сценарії впливу іонів азоту, цирконію та гафнію. Ці дані візуалізовано на рис. 2, де порівняння з емпіричними результатами демонструє

прийнятний рівень узгодженості, підтверджуючи валідність моделі.

Експериментальні спостереження підкреслюють пряму кореляцію між збільшенням енергії іонного потоку (у діапазоні від 110 до 500 eV) і ростом розміру зерен у твердих сплавах H13A і GC1025. Крім того, тип іона відіграє важливу роль: найменші зерна формуються за дії іонів азоту, дещо більші – цирконію, а найбільші – гафнію. Це вказує на те, що хімічна природа іона впливає на кінетику кристалізації і стабільність структур.

Зростання заряду іона також сприяє збільшенню розміру зерен, що, у свою чергу, модифікує фізико-механічні характеристики поверхневого наноструктурованого шару, зокрема його зносостійкість і адгезію. Така залежність підкреслює необхідність точного контролю зарядних параметрів для оптимізації властивостей покриттів.

Порівняльний аналіз експериментальних і теоретичних даних виявив, що емпіричні значення розміру зерен дещо перевищують розрахункові. Імовірно, це зумовлено недостатнім урахуванням термічного ефекту нагріву зразків і покриття під час іонного очищення та осадження. Після впровадження корекції на нагрівання модель демонструє кращу відповідність, даючи змогу безпосередньо порівнювати скореговані теоретичні розміри зерен з експериментальними (рис. 2). Цей аспект відкриває шлях для подальшого вдосконалення моделей, урахуваючи динамічні теплові процеси, що може підвищити точність прогнозування в промислових застосуваннях.

Аналіз отриманих даних демонструє, що емпіричні показники розмірів зерен у

наноструктурованих покриттях чітко вписуються в діапазон, передбачений теоретичними розрахунками. Така відповідність підкреслює критичну важливість включення до моделі факторів термічного впливу, зокрема нагрівання основи та самого покриття під час етапів іонного очищення поверхні та безпосереднього плазмового осадження. Без урахування цих теплових ефектів прогнози могли б суттєво відхилитися від реальності, що ускладнило б практичне застосування моделі в технологічних процесах.

Висновки. Експериментально зафіксовано збільшення розміру зерна в зоні обробки іонами з вищою енергією та зарядом, що пов'язано з інтенсивнішим впливом на мікроструктуру матеріалу. Підтверджено відповідність теоретичної моделі експериментальним даним за умови врахування зростання розміру зерна внаслідок підвищення температури під час іонного очищення та напилення покриття. Це підкреслює важливу роль термічних факторів для формування та контролю морфології наноструктур. Показано, що використання потоків іонів із різними енергіями, видами та зарядами дає змогу досягати необхідного діапазону розмірів зерна та забезпечувати задані фізико-механічні властивості наноструктурних шарів.

Реалізація цих завдань дасть змогу не тільки теоретично обґрунтувати процеси формування наноструктур, але й практично вдосконалити технології плазмових покриттів, сприяючи створенню більш ефективних ріжучих інструментів для промислового застосування.

Список використаних джерел

1. Kostyk, K. O. & Shyrokyi, Yu. V. (2022). Intensification of chemical and heat treatment processes to improve the operational properties of machine parts. *Findings of modern engineering research and developments*, 554. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-207-4-6>

2. Butt, M. A. (2022). Thin-film coating methods: A successful marriage of high-quality and cost-effectiveness—A brief exploration. *Coatings*, 12, 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12081115>
3. Широкий, Ю. В., Сисоєв, Ю. О., Семененко, О. Д., Торосян, О. В. (2025). Підвищення ефективності деталей машин та різального інструменту комбінованими методами обробки. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*, 106, 84–107. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2025.106.06>
4. Schalk, N., Tkadletz, M. & Mitterer, C. (2022). Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community. *Surface & Coatings Technology*, 429, 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127949>
5. Schalk, N., Mitterer, C., Czettel, C., Satory, B., Penoy, M., & Michotte, C. (2013). Dry-blasting of α - and κ -Al₂O₃ CVD hard coatings: Friction behaviour and thermal stress relaxation. *Tribology Letters*, 52, 147–154. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-013-0201-3>
6. Широкий, Ю. В., Сисоєв, Ю. О., Фесенко, К. В., Постельник, Т. О. (2024). Дослідження температурних полів на сталях з урахуванням кінцевої швидкості розповсюдження тепла при моделюванні умов отримання наноструктур у плазмовому середовищі. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*, 101, 98–111. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2024.101.07>
7. Широкий, Ю. В., Сисоєв, Ю. О., Торосян, О. В., Жидєєв, П. Р. (2024). Визначення температурних умов отримання субмікро- та наноструктур при дії іонів на магнієві сплави у плазмовому середовищі. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*, 102, 75–91. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2024.102.06>
8. Бреус, А. О. (2018). Удосконалення комбінованої плазмово-іонної технології для отримання наноструктур на поверхні ріжучого інструменту [Дис. канд. техн. наук]. *Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»*. URL: <https://nbuv.gov.ua/>
9. Panjan, P., Drnovšek, A., Gselman, P., Čekada, M., & Panjan M. (2020). Review of growth defects in thin films prepared by PVD techniques. *Coatings*, 10(5), 1–40. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings10050447>
10. Gerchman, D., Ferrari, P. H. A., Baranov, O., Levchenko, I., Takimi, A. S., & Bazaka, K. (2024). One-step rapid formation of wrinkled fractal antibiofouling coatings from environmentally friendly, waste-derived terpenes. *Journal of Colloid and Interface Science*, 668, 319–334. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.04.049>
11. Shyrokyi, Y., Sysoiev, I., & Fesenko, Y. (2024). Modeling the conditions for obtaining nanostructures during ion-plasma processing taking into account the quantum-mechanical properties of electrode material. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 3(195), 68–76. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2024.3.06>
12. Gudmundsson, J. T., Anders, A., & von Keudell, A. (2022). Foundations of physical vapor deposition with plasma assistance. *Plasma Sources Science and Technology*, 31, 1–33. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac7f53>
13. Sysoiev, I., Shyrokyi, Y., & Fesenko, K. (2024). Pulsed vacuum-arc plasma source with laser arc excitation. *Problems of Atomic Science and Technology*, 1(149), 110–115. DOI: <https://doi.org/10.46813/2024-149-110>
14. Guimarães, B., Marques, F., & Fernandes, C. et al. (2025). Enhancing the cutting performance of laser surface textured WC–Co cutting tools—a study on AISI 316L stainless steel turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 135, 123–140. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16135-0>

15. Широкий, Ю. В. (2023). Визначення впливу внутрішніх енергій кристалічної решітки на отримання наноструктур у поверхневих шарах алюмінієвих сплавів. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*, 99, 32–43. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2023.99.03>
16. Kostyuk, G., Melkozirova, O., Kostyuk, E., & Shirokiy, I. (2020). Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows. *Різання та інструменти в технологічних системах*, 92, 107–121. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.12>
17. Baranov, O. (2023). Formation of 2D copper oxide nanostructures on substrates exposed to glow discharge plasma. *Advanced Manufacturing Processes: 5th Grabchenko's International Conference*, 247–255. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_22
18. Kostyk, K., Kostyk, V., Akimov, O., Kamchatna-Stepanova, K., & Shyrokyi, Y. (2022). Ensuring the high strength characteristics of the surface layers of steel products. *Advanced Manufacturing Processes III: InterPartner 2021*, 292–301. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_29
19. Sysoiev, I., Shyrokyi, Y., & Fesenko, K. (2025). System for measurement the product surface temperature for vacuum-arc coatings. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2(156), 171–176. DOI: <https://doi.org/10.46813/2025-156-171>
20. Широкий, Ю. В., Сисоєв, Ю. О., Торосян, О. В., Торосян-Жидєєва, Г. Д. (2023). Вибір технологічних параметрів лазера для отримання зміцнюючих покриттів з наноструктурами на інструментальній сталі У12А. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*, 97, 111–125. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2023.97.07>
21. Wardaya, A. Y., Muhlisin, Z., Suseno, J. E., Nur M., Triadyaksa, P., Khumaeni, A., Hadi, S., Sarwoko, E. A., & Windarta J. (2022). The current-voltage characteristics for electrode geometry model of positive DC corona discharge in air. *Gazi University Journal of Science*, 35(3), 1140–1150. DOI: <https://doi.org/10.35378/gujs.885345>

References

1. Kostyk, K. O., & Shyrokyi, Yu. V. (2022). Intensification of chemical and heat treatment processes to improve the operational properties of machine parts. *Findings of modern engineering research and developments*, 554. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-207-4-6> [in English].
2. Butt, M. A. (2022). Thin-film coating methods: A successful marriage of high-quality and cost-effectiveness—A brief exploration. *Coatings*, 12, 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12081115> [in English].
3. Shyrokyi, Yu. V., Sysoiev, Yu. O., Semenenko, O. D., & Torosian, O. V. (2025). Pidvyshchennia efektyvnosti detalei mashyn ta rizalnoho instrumentu kombinovanymy metodamy obrobky [Improving the efficiency of machine parts and cutting tools by combined processing methods]. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, 106, 84–107. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2025.106.06> [in Ukrainian].
4. Schalk, N., Tkadletz, M., & Mitterer, C. (2022). Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community. *Surface & Coatings Technology*, 429, 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127949> [in English].
5. Schalk, N., Mitterer, C., Czettel, C., Satory, B., Penoy, M., & Michotte, C. (2013). Dry-blasting of α - and κ -Al₂O₃ CVD hard coatings: Friction behaviour and thermal stress relaxation. *Tribology Letters*, 52, 147–154. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-013-0201-3> [in English].
6. Shyrokyi, Yu. V., Sysoiev, Yu. O., Fesenko, K. V., & Postelnyk, T. O. (2024). Doslidzhennia temperaturnykh poliv na staliakh z urakhuvanniam kintsevoi shvydkosti rozpovsiudzhennia tepla pry modeliuvanni umov otrymannia nanostruktur u plazmovomu seredovyshchi [Study of temperature

fields in steels taking into account the finite speed of heat propagation in modeling the conditions for obtaining nanostructures in a plasma environment]. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, 101, 98–111. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2024.101.07> [in Ukrainian].

7. Shyrokyi, Yu. V., Sysoiev, Yu. O., Torosian, O. V., & Zhydieiev, P. R. (2024). Vyznachennia temperaturnykh umov otrymannia submikro- ta nanostruktur pry dii ioniv na mahniievi splavy u plazmovomu seredovyshtchi [Determination of temperature conditions for obtaining submicro- and nanostructures under the action of ions on magnesium alloys in a plasma environment]. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, 102, 75–91. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2024.102.06> [in Ukrainian].

8. Breus, A. O. (2018). Udoskonalennia kombinovanoi plazmovo-ionnoi tekhnologii dlia otrymannia nanostruktur na poverkhni rizhuchoho instrumentu [Improvement of combined plasma-ion technology for obtaining nanostructures on the surface of cutting tools] (Candidate's thesis). *National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"*. Retrieved from: <https://nbuv.gov.ua/> [in Ukrainian].

9. Panjan, P., Drnovšek, A., Gselman, P., Čekada, M., & Panjan, M. (2020). *Review of growth defects in thin films prepared by PVD techniques*. *Coatings*, 10(5), 1–40. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings10050447> [in English].

10. Gerchman, D., Ferrari, P. H. A., Baranov, O., Levchenko, I., Takimi, A. S., & Bazaka, K. (2024). One-step rapid formation of wrinkled fractal antibiofouling coatings from environmentally friendly, waste-derived terpenes. *Journal of Colloid and Interface Science*, 668, 319–334. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.04.049> [in English].

11. Shyrokyi, Y., Sysoiev, I., & Fesenko, Y. (2024). Modeling the conditions for obtaining nanostructures during ion-plasma processing taking into account the quantum-mechanical properties of electrode material. *Aerospace Engineering and Technology*, 3(195), 68–76. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2024.3.06> [in English].

12. Gudmundsson, J. T., Anders, A., & von Keudell, A. (2022). Foundations of physical vapor deposition with plasma assistance. *Plasma Sources Science and Technology*, 31, 1–33. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac7f53> [in English].

13. Sysoiev, I., Shyrokyi, Y., & Fesenko, K. (2024). Pulsed vacuum-arc plasma source with laser arc excitation. *Problems of Atomic Science and Technology*, 1(149), 110–115. DOI: <https://doi.org/10.46813/2024-149-110> [in English].

14. Guimarães, B., Marques, F., Fernandes, C., et al. (2025). Enhancing the cutting performance of laser surface textured WC–Co cutting tools—a study on AISI 316L stainless steel turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 135, 123–140. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16135-0> [in English].

15. Shyrokyi, Yu. V. (2023). Vyznachennia vplyvu vnutrishnikh enerhii krystalichnoi reshitky na otrymannia nanostruktur u poverkhnevnykh sharakh aliuminiievnykh splaviv [Determination of the influence of internal energies of the crystal lattice on obtaining nanostructures in the surface layers of aluminum alloys]. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, 99, 32–43. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2023.99.03> [in Ukrainian].

16. Kostyuk, G., Melkoziorova, O., Kostyuk, E., & Shirokiy, I. (2020). Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows. *Cutting and Tools in Technological Systems*, 92, 107–121. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2020.92.12> [in English].

17. Baranov, O. (2023). Formation of 2D copper oxide nanostructures on substrates exposed to glow discharge plasma. In *Advanced Manufacturing Processes: 5th Grabchenko's International Conference* (pp. 247–255). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_22 [in English].

18. Kostyk, K., Kostyk, V., Akimov, O., Kamchatna-Stepanova, K., & Shyrokyi, Y. (2022). Ensuring the high strength characteristics of the surface layers of steel products. *In Advanced Manufacturing Processes III: InterPartner 2021* (pp. 292–301). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_29 [in English].
19. Sysoiev, I., Shyrokyi, Y., & Fesenko, K. (2025). System for measurement the product surface temperature for vacuum-arc coatings. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2(156), 171–176. DOI: <https://doi.org/10.46813/2025-156-171> [in English].
20. Shyrokyi, Yu. V., Sysoiev, Yu. O., Torosian, O. V., & Torosian-Zhydieieva, H. D. (2023). Vybir tekhnolohichnykh parametriv lazera dlia otrymannia zmitsniuiuchykh pokryttiv z nanostrukturamy na instrumentalnii stali U12A [Selection of laser technological parameters for obtaining strengthening coatings with nanostructures on U12A tool steel]. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, 97, 111–125. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2023.97.07> [in Ukrainian].
21. Wardaya, A. Y., Muhlisin, Z., Suseno, J. E., Nur, M., Triadyaksa, P., Khumaeni, A., Hadi, S., Sarwoko, E. A., & Windarta, J. (2022). The current-voltage characteristics for electrode geometry model of positive DC corona discharge in air. *Gazi University Journal of Science*, 35(3), 1140–1150. DOI: <https://doi.org/10.35378/gujs.885345> [in English].
-

Широкий Юрій Вячеславович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут». ORCID: iD: 0000-0002-4713-0334. E-mail: i.shyrokyi@khai.edu.

Семененко Ольга Діонісівна, асистент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут». ORCID iD: 0009-0001-8425-562X. E-mail: o.semenenko@khai.edu.

Shyrokyi Yuriy Vyacheslavovich, PhD (Tech). Associate Professor, department of theoretical mechanics, mechanical engineering and robotic systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute».

ORCID: iD: 0000-0002-4713-0334. E-mail: i.shyrokyi@khai.edu.

Semenenko Olha Dionisivna, Assistant, department of theoretical mechanics, mechanical engineering and robotic systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute». ORCID iD: 0009-0001-8425-562X.

E-mail: o.semenenko@khai.edu.

Дата надходження статті 19.02.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 12.05.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 29.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY