

ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ФРАКТАЛЬНОГО ФОРМАЛІЗМУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІОННО-ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ НА ОЦІНЮВАННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ОБ'ЄМНОГО ГІДРОПРИВОДА

Глушкова Д. Б.¹, Багров В. А.¹, Волчук В. М.²

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

Анотація. *Вступ.* Проведено дослідження з отримання та нанесення покриття Ti-Cr-N на поверхню сталі 38X2MЮА. **Мета та постановка завдання.** Дослідження доцільності застосування фрактального підходу для оцінювання впливу плазменних покриттів на підвищення зносостійкості деталей об'ємного гідропривода. **Матеріали та методики досліджень.** Матеріалом для іонного бомбардування був обраний Cr, оскільки він дає змогу знизити температуру підкладки перед нанесенням покриття та уникнути небезпеки розміцнення поверхні. Після термічного оброблення сталі 38X2MЮА її твердість коливається в межах 40...45 HRC. Товщина покриття, яке наноситься, змінювалася в межах від 3 до 6 мікрон, що відповідає хорошій адгезії, менша товщина істотно не впливає на властивості виробу, а в разі товщини понад 6 мікрон спостерігається відшаровування через погану адгезію з підкладкою. **Виклад основного матеріалу.** Проведено п'ять серій експериментів зі значеннями твердості HRC 42, 43, 44, 45, 46. Для оцінювання впливу структури покриття Ti-Cr-N робочої поверхні деталей об'ємного гідропривода на показники його зношування застосовували фрактальний аналіз. Відносна похибка обчислень показників зношування для фрактальних моделей коливалася в межах 0.04...8.96. Без використання показників фрактальної розмірності поверхні коефіцієнт кореляції моделі $Y(X_2)$ становив лише 0,73. Експериментально встановлено, що найменше значення зношування 2,11 отримано за умови товщини покриття та твердості 45 HRC прогнозується в разі 6 мкм і шорсткості 0,15. Для підтвердження цієї гіпотези був проведений експеримент з визначення зносостійкості, якщо твердість 45, шорсткість 0,16 і товщина покриття дорівнює 6. **Висновки.** Результати досліджень показників зношування зразків із покриттям Ti-Cr-N за умови значень твердості матеріалу підкладки 42...46 HRC, шорсткості поверхні та товщини покриття показали доцільність застосування фрактального підходу до оцінювання структури.

Ключові слова: іонно-плазмові покриття, фрактал, твердість, модель.

Вступ

На структуру та властивості багатьох матеріалів впливають методики їх отримання, режими оброблення, фазовий і хімічний склад тощо [1–4].

Нанесення покриття нітриду титану на деталі об'ємного гідропривода вплинуло на триботехнічні характеристики: підвищилася зносостійкість, зменшився коефіцієнт тертя. Але ефективність роботи цих відповідальних деталей залежить від довговічності, яка в цьому разі передбачає зменшення або зведення до нуля небезпеки зміцнення поверхні, та від такого важливого показника, як корозійна стійкість [5–8]. На основі аналізу робіт, присвячених використанню плазмових покриттів [9–12], обрано покриття системи Ti-Cr-N з попереднім іонним бомбардуванням поверхні хромом. Як матеріал для іонного бомбардування був обраний Cr, оскільки

він дає змогу знизити температуру підкладки перед нанесенням покриття та уникнути небезпеки розміцнення поверхні. Іонне бомбардування збільшує щільність центрів зародка утворення, зменшує кількість вакансій і пір, вводить теплову енергію безпосередньо в поверхневу зону, стимулюючи дифузійні процеси. Для кожної температури та типу покриття існують оптимальні режими іонного бомбардування, що дає змогу отримати найбільш досконалу структуру. Іонне бомбардування приводить до зменшення розмірів зерен, що сприяє формуванню нанокристалічних плівок. Регулюючи енергію та щільність потоку іонів, що бомбардують, можна керувати розмірами зерен. Відомо, що найкращі поєднання міцності та пластичних властивостей має місце за умови розмірів зерен менше ніж 10 нм [13].

Мета та постановка завдання

Дослідження доцільності застосування фрактального підходу для оцінювання впливу плазменних покриттів на підвищення зносостійкості деталей об'ємного гідропривода. Обраний фрактальний аналіз успішно себе зарекомендував для моделювання структури та властивостей багатьох матеріалів [14–18].

Матеріали та методики досліджень

Для нанесення покриття $Ti-Cr-N$ на поверхню сталі 38Х2МЮА було переобладнано камеру установки (рис. 1).

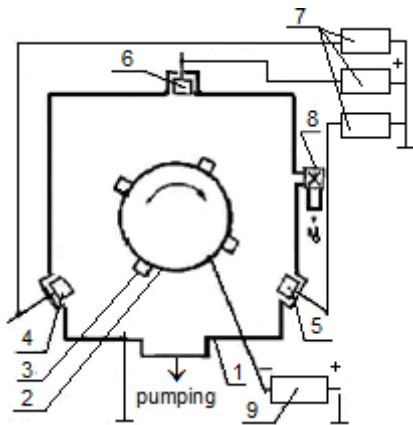


Рис. 1. Схема вакуумної камери для осадження покриттів з подвійних систем нітрідів: 1 – вакуумна камера; 2 – циліндрична обичайка; 3 – деталі; 4, 5, 6 – катоди; 7 – зварювальні випрямлячі; 8 – натискач; 9 – джерело негативної напруги

У центрі вакуумної камери вмонтована циліндрична обичайка (2) з деталями, на які наноситься покриття (3). На бічних фланцях вакуумної камери розміщені джерела (3) пла-

зми на основі вакуумних дуг, які містять металеві катоди 4, 5, 6. Одним із джерел плазми (катод 4) випаровували Ti , а двома, що залишилися – Cr . Радіус обичайки коригує відстань від деталей до випарників. Ця відстань може змінюватись у межах розміру камери установки. У процесі обертання поверхня деталей, що напилюється, проходить по чергово під діючими катодами 4, 5, 6. Покриття, що осаджується, залежить від відстані від деталі до випарника, швидкості обертання обичайки, кількості випарників, матеріалу катодів. Визначення цих параметрів у кожному конкретному випадку є важливим, оскільки за умови одночасної роботи трьох катодів існують ділянки, де не відбувається конденсація прямого потоку речовини, де відбувається конденсація речовини, що випаровується тільки одним випарником, і ділянки, де перекриваються потоки від двох випарників. Кутова величина цих ділянок залежить від співвідношення між радіусом обичайки (r) та радіусом камери установки «Булат» (R).

Для наших умов експлуатації було обрано співвідношення $r/R = 0,6$. Швидкість обертання обичайки з напиленими деталями становила 10 об/хв під час роботи трьох випарників. На пристрій отримано позитивне рішення на заявку № 2010 03834 від 02.04.2010. Як матеріали катода використовували титан ВТ-1, хром та азот (99,97 %).

На рис. 2 наведена структура досліджуваного матеріалу.

Оптимальні режими процесу нанесення покриття $Ti-Cr-N$ на робочі поверхні деталей об'ємного гідропривода наведено в табл. 1.

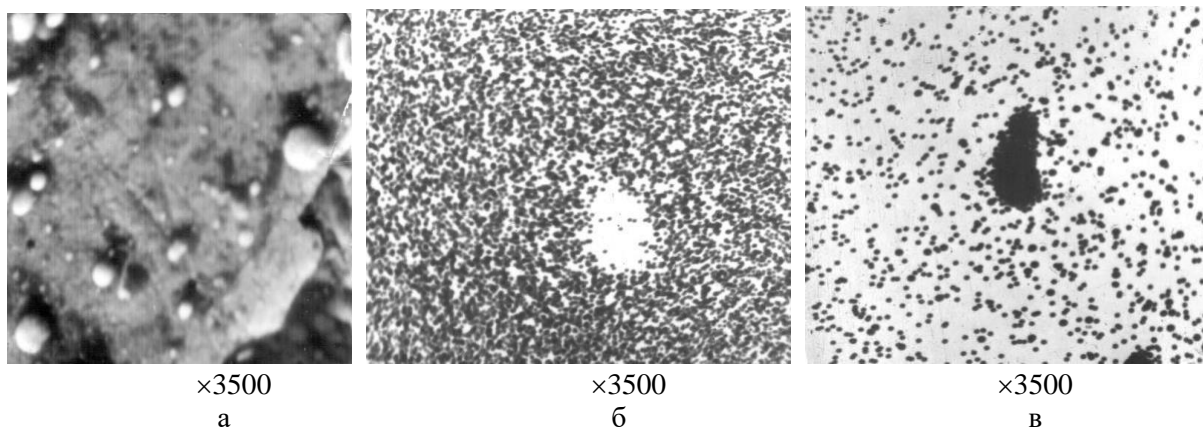


Рис. 2. Покриття $Ti-Cr-N$: а – загальний вигляд покриття; б – характер розподілу Cr у покритті в характерних променях Cr ; в – характер розподілу Ti в покритті в характерних променях Ti

Таблиця 1 – Оптимальні режими процесу нанесення покриття *Ti-Cr-N* на робочі поверхні деталей об'ємного гідропривода

Матеріал емісійного катода	Струм дуги, I_1 , А	Струм дуги, I_2 , А	Напруга, U , В	Струм, I , А	Тиск, P , тор	Час, t , хв
1-й етап: очищення, розігрів та активація іонами хрому						
Хром	80	–	900	2	$1 \cdot 10^{-4}$	7
2-й етап: напилення шару покриття в атмосфері азоту або азотовмісного газу						
два катода: 1-й – хром; 2-й – титан	80	70	150	3	$5 \cdot 10^{-3}$	25

Для оцінювання впливу структури покриття *Ti-Cr-N* на показники його зношування застосовували фрактальний аналіз.

Виклад основного матеріалу

Відомо, що велике значення має не тільки склад нанесеного покриття, але й такі параметри, як твердість матеріалу підкладки, шорсткість поверхні, на яку наноситься покриття, товщина покриття. Одним із показників обрана твердість, оскільки вона легко піддається перевірці в будь-якій точці виробу без шкоди для цілісності як до, так і після експлуатації. Практика експлуатації виробів, виготовлених із сталі з нанесенням на робочі поверхні плазмових покриттів, показала, що шорсткість виробу, на який наноситься покриття, має бути не менша ніж 0,48 Ra. В іншому разі спостерігається відшаровування нанесеного покриття через погану адгезію його з підкладкою.

Після термічного оброблення сталі 38Х2МЮА її твердість коливається в межах 40...45 HRC. Товщина нанесеного покриття змінювалася в межах від 3 до 6 мікрон, що відповідає хорошій адгезії, менша товщина не має істотного впливу на властивості виробу, а в разі товщини понад 6 мікрон спостерігається відшаровування через погану адгезію з підкладкою. Після термічного оброблення сталі 38Х2МЮА її твердість коливається в межах 40...45 HRC. Товщина покриття, що наноситься, змінювалася в межах від 3 до 6 мікрон, що відповідає хорошій адгезії, менша товщина не має істотного впливу на властивості виробу, а в разі товщини понад 6 мікрон спостерігається відшаровування через погану адгезію з підкладкою. Відповідно до методів математичного планування експерименту, як варіювальний фактор приймемо товщину покриття та шорсткість, і позначимо їх X_1 і X_2 . Як функцію відгуку приймемо зношування та позначимо Y . З огляду на викладені вище міркування

приймаємо, що межами існування (зміни) факторів є $X_{1\min} = 3$; $X_{1\max} = 6$; $X_{2\min} = 0,10$; $X_{2\max} = 0,48$. Інтервали коливання факторів відповідно $\Delta X_1 = 6 - 3 = 3$; $\Delta X_2 = 0,48 - 0,1 = 0,38$.

Спочатку було проведено факторний експеримент першого порядку, мета якого – отримати математичну модель залежності Y від X_1 та X_2 у вигляді лінійного полінома. Для цього було реалізовано (для кожного значення твердості) повний факторний експеримент типу 2^n . Його результати подано в табл. 2–6.

Фрактальна розмірність розраховувалася за методикою Хаусдорфа [14]. Фотознімки структури оброблялися в 256-кольоровому форматі з відтінками сірого кольору. Для обчислення значень фрактальної розмірності $D(1)$ фотознімок структури покривався клітинками N , розмір l яких змінювався від 2 до 9 пікселів.

$$D = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(l)}{\ln l}. \quad (1)$$

Приклад фрактального 3D-аналізу для структури на рис. 2, а наведено нижче (рис. 3).

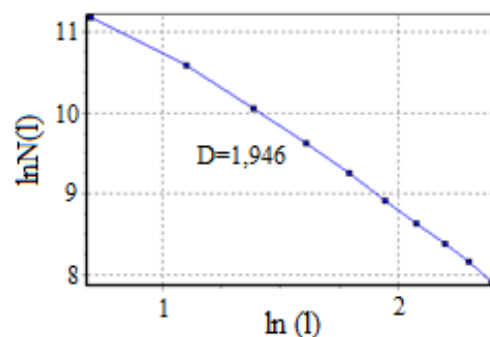


Рис. 3. Білогарифмічна залежність клітинок, що покривають об'єкт, від її розміру

Результати досліджень визначення параметрів експериментів наведено в табл. 2–6.

Таблиця 2 – Значення величини товщини покриття, шорсткості та зношування за умови твердості підкладки 42 HRC

№ досліджу	X ₁	X ₂	Y ₁	D
1	3,00	0,10	6,50	1,85
2	3,00	0,48	7,30	1,82
3	6,00	0,10	3,30	1,90
4	6,00	0,48	4,50	1,91
5	4,50	0,29	5,20	1,87
6	4,50	0,10	4,80	1,88
7	4,50	0,48	5,40	1,88
8	3,00	0,29	6,80	1,86

Таблиця 3 – Значення величини товщини покриття, шорсткості та зношування за умови твердості підкладки 43 HRC

№ досліджу	X ₁	X ₂	Y ₂	D
1	3,00	0,10	6,30	1,81
2	3,00	0,48	7,00	1,77
3	6,00	0,10	4,00	1,87
4	6,00	0,48	4,40	1,87
5	4,50	0,29	5,20	1,87
6	4,50	0,10	4,80	1,85
7	4,50	0,48	5,40	1,88
8	3,00	0,29	6,80	1,86
9	6,00	0,29	4,20	1,88

Таблиця 4 – Значення величини товщини покриття, шорсткості та зношування за умови твердості підкладки 44 HRC

№ досліджу	X ₁	X ₂	Y ₃	D
1	3	0,10	5,60	1,83
2	3	0,48	6,20	1,76
3	6	0,10	3,60	1,91
4	6	0,48	4,00	1,89
5	4,5	0,29	5,00	1,84
6	4,5	0,10	4,40	1,88
7	4,5	0,48	5,20	1,85
8	3	0,29	6,00	1,80
9	6	0,29	3,80	1,90

Таблиця 5 – Значення величини товщини покриття, шорсткості та зношування за умови твердості підкладки 45 HRC

№ досліджу	X ₁	X ₂	Y ₄	D
1	3	0,10	3,50	1,80
2	3	0,48	3,80	1,77
3	6	0,15	2,11	1,94
4	6	0,48	2,40	1,89
5	4,5	0,29	2,51	1,87
6	4,5	0,10	2,45	1,86
7	4,5	0,48	2,76	1,84
8	3	0,29	3,50	1,79
9	6	0,29	2,17	1,92

Таблиця 6 – Значення величини товщини покриття, шорсткості та зношування за умови твердості підкладки 46 HRC

№ досліджу	X ₁	X ₂	Y ₅	D
1	3	0,10	4,40	1,83
2	3	0,48	4,80	1,78
3	6	0,10	3,00	1,90
4	6	0,48	3,40	1,88
5	4,5	0,29	4,00	1,90
6	4,5	0,10	3,80	1,85
7	4,5	0,48	4,10	1,84
8	3	0,29	4,60	1,82
9	6	0,29	3,40	1,87

За результатами оброблення значень експериментів у табл. 1–6 отримані лінійні моделі прогнозу показників зношування (2)–(6).

Якщо 42 HRC:

$$Y_1 = 10.71 - 0.98 \cdot x_1 + 2.27 \cdot x_2 - 0.88 \cdot D$$

$$R^2 = 0.96 \quad (2)$$

Якщо 43 HRC:

$$Y_2 = 11.65 - 0.80 \cdot x_1 + 1.48 \cdot x_2 - 1.69 \cdot D$$

$$R^2 = 0.95 \quad (3)$$

Якщо 44 HRC:

$$Y_3 = 13.04 - 0.60 \cdot x_1 + 1.25 \cdot x_2 - 3.14 \cdot D$$

$$R^2 = 0.98 \quad (4)$$

Якщо 45 HRC:

$$Y_4 = 17.64 - 0.12 \cdot x_1 + 0.16 \cdot x_2 - 7.73 \cdot D$$

$$R^2 = 0.89 \quad (5)$$

Якщо 46 HRC:

$$Y_5 = 5.95 - 0.44 \cdot x_1 + 0.95 \cdot x_2 - 0.16 \cdot D$$

$$R^2 = 0.98 \quad (6)$$

Відносна похибка обчислень показників зношування коливалася в межах 0.04...8.96.

Виконавши прямий підрахунок, знайдемо найменше значення зношування в кожному випадку. У табл. 7 подані показники за найменшим значенням зношування Y.

Таблиця 7 – Найменші значення показників зношування в інтервалі 42...46 HRC

Твердість, HRC	Аргументи			Функція
	X ₁	X ₂	D	Y
42	6	0,10	1,90	3,30
43	6	0,10	1,87	4,00
44	6	0,10	1,91	3,60
45	6	0,15	1,94	2,11
46	6	0,10	1,90	3,00

Як видно з табл. 7, найменше значення зношування 2,11 прогнозується за умови значення твердості 45, товщини покриття 6 і шорсткості 0,15.

Поверхня відгуку (рис. 4) та модель оцінювання найменших значень зношування в задній точці $X_1=6$ (7) наведені нижче.

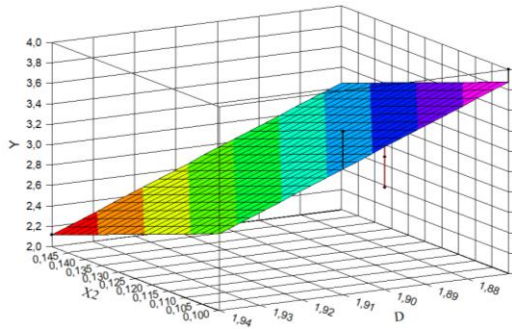


Рис. 4. Оцінювання впливу шорсткості та фрактальної розмірності поверхні на показники зношування

$$Y = 35.28 - 12.80 \cdot X_2 - 16.11 \cdot D$$

$$R^2 = 0.84 \quad (7)$$

Без використання показників фрактальної розмірності поверхні коефіцієнт кореляції моделі $Y(X_2)$ становив лише 0,73 (8):

$$Y = 27.30 - 6.20 \cdot D$$

$$R^2 = 0.63 \quad (8)$$

Для підтвердження цієї гіпотези був проведений експеримент із визначення зносостійкості за умови твердості 45, шорсткості 0,16 та товщини покриття 6.

Висновки

1. Проведено дослідження доцільності застосування фрактального підходу для оцінювання впливу плазменних покриттів з метою підвищення зносостійкості деталей об'ємного гідропривода.

2. За допомогою методики планування експериментів встановлено, що найменше значення зношування деталі, виготовленої зі сталі 38Х2МЮА після термічного оброблення, отримано за умови твердості основного матеріалу 45 HRC, його шорсткості 0,15 і товщини покриття 6 мкм.

3. Проведено фрактальний аналіз покриття $Ti-Cr-N$, що визначається наявністю крапель Ti та Cr , серед яких частина розташована на поверхні, а частина закріплена в об'ємі покриття. Фрактальна розмірність розраховувалася за допомогою клітинного методу Хаусдорфа.

Для оцінювання зносостійкості деталей об'ємного гідропривода отримана фракталь-

на модель з коефіцієнтом кореляції 0,84, а для моделі з використанням тільки показників шорсткості основного матеріалу коефіцієнт кореляції нижчий і становить 0,73 (9) за умови фіксованих значень товщини покриття 6 мкм, що свідчить про доцільність застосування фракталів.

Література

1. Kalyanov V.N. Structure and characteristics of wear-resistant sparingly alloyed deposited metal. *Welding production*. 1997. № 4. P. 13–17.
2. Ovcharov V.P. Improving the wear resistance of parts of a cylinder-piston group of CT compressors by treatment in a steam atmosphere. *Bulletin of mechanical engineering*. Kyiv, 1980. № 4. P. 31–32.
3. Kalinina N.E., Glushkova D.B., Voronkov A.I., Kalinin V.T. Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys. *Functional Materials*. 2019. Vol. 26. Issue 3. P. 514–518. URL: <https://doi.org/10.15407/fm26.03.514>
4. Study of nanomodification of nickel alloy GS3 with titanium carbide / D.B. Hlushkova et al. *Problems of Atomic Science and Technology* 2023. № 2 (144). P. 126–129. URL: <https://doi.org/10.46813/2023-144-126>
5. Parkhomenko V.D., Tsybulev P.N., Krasnokutsky Yu.I. Technology of plasma chemical production. Kyiv: Vishka school, 2001. 255 p.
6. Structure and properties of powder gas-plasma coatings based on nickel / D.B. Hlushkova et al. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2022. № 4 (140). P. 125–130. URL: <https://doi.org/10.46813/2022-140-125>
7. Paul C., Ganesh P., Mishra S. Investigating laser rapid manufacturing for Inconel-625 components. *Optics and Laser Technology*. 2007. № 39(4). P. 800–805.
8. Influence of structure and phase composition on wear resistance of sparingly alloyed alloys. *Functional Materials* / D.B. Hlushkova et al. 2023. № 1 (30). P. 74–78. URL: <https://doi.org/10.15407/fm30.01.74>
9. Increasing the corrosion resistance of heat-resistant alloys for parts of power equipment / V.S. Vahrusheva et al. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2022. № 4(140). P. 137–140. URL: <https://doi.org/10.46813/2022-140-137>
10. Study of wear of the building-up zone of martensite-austenitic and secondary hardening steels of the Cr-Mn-Ti system / D.B. Hlushkova et al. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2023. № 2 (144). P. 105–109. URL: <https://doi.org/10.46813/2023-144-105>
11. Influence of the Phase Composition of the Layers Deposited on the Rods of Hydraulic Cylinders on

- Their Local Corrosion / A.A. Holyakevych et al. *Materials Science*. 2015. № 5 (50). P. 740–747.
12. Ion-Plasma Spraying and Electron-Beam Treatment of Composite Cr-Al-Co-ZrO₂-Y₂O₃ Coating on the Surface of Ni-Cr Alloy / A. Zhilkashinova et al. *Coatings*. 2021. № 11. P. 321. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings11030321>
13. Fracture mechanics and strength of materials: Ref. allowance: In 4 vol. / Under the general editorship of Panasyuk V.V. Vol. 1: Fundamentals of Fracture Mechanics. Kyiv: Nauk. Dumka, 1998. 448 p.
14. Kolotienko S.D., Kolotiev A.P. Analysis of the process of contact destruction of surfacing materials during setting. *The Third Republican Scientific and Technical Conference Modern methods of surfacing and surfacing materials*. Kharkiv, 1981. P. 106–108.
15. Fractal modeling the mechanical properties of the metal surface after ion-plasma chrome plating D.B. Hlushkova et al. *Functional Materials*. 2023. № 2 (30). P. 275–281. URL: <https://doi.org/10.15407/fm30.02.275>
16. Volchuk V., Kroviakov S., Kryzhanovskiy V. Revista Română de Materiale. *Romanian Journal of Materials*. 2022. № 52 (2). P. 185.
17. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. New York: W.H. Freeman and Company, 1982.
18. V.M. Petrov et al. *AIP Conference Proceedings*. 2023. № 2700 (1). 020033. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0124918>
- References**
1. Kalyanov, V.N. (1997). Structure and characteristics of wear-resistant sparingly alloyed deposited metal. *Welding production*, no. 4, p. 13–17.
2. Ovcharov, V.P. (1980). Improving the wear resistance of parts of a cylinder-piston group of CT compressors by treatment in a steam atmosphere. *Bulletin of mechanical engineering*, Kyiv, no. 4, p. 31–32.
3. Kalinina, N.E., Glushkova, D.B., Voronkov, A.I., Kalinin V.T. (2019). Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys. *Functional Materials*, vol. 26, issue 3, p. 514–518. URL: <https://doi.org/10.15407/fm26.03.514>
4. Hlushkova, D.B., Kalinin, A.V., Kalinina, N.E., Volchuk, V.M., Saenko, V.A., Efimenko A.A. (2023). Study of nanomodification of nickel alloy GS 3 with titanium carbide. *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 2 (144), p. 126–129. URL: <https://doi.org/10.46813/2023-144-126>
5. Parkhomenko, V.D., Tsybulev, P.N., Krasnokutsky, Yu.I. (2001). Technology of plasma chemical production. Kyiv, 255 p.
6. Hlushkova, D.B., Bagrov, V.A., Demchenko, S.V., Volchuk, V.M., Kalinin, O.V., Kalinina, N.E. (2022). Structure and properties of powder gas-plasma coatings based on nickel. *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 4 (140), p. 125–130. URL: <https://doi.org/10.46813/2022-140-125>
7. Paul, C., Ganesh, P., Mishra, S. (2007). Investigating laser rapid manufacturing for Inconel-625 components. *Optics and Laser Technology*, no. 39 (4), p. 800–805.
8. Hlushkova, D.B., Bagrov, V.A., Volchuk, V.M., Murzakhmetova, U.A. (2023). Influence of structure and phase composition on wear resistance of sparingly alloyed alloys. *Functional Materials*, no. 1 (30), p. 74–78. URL: <https://doi.org/10.15407/fm30.01.74>
9. Vahrusheva, V.S., Hlushkova, D.B., Volchuk, V.M., Nosova, T.V., Mamhur, S.I., Tsoukur, N.I., Bagrov V.A., Demchenko S.V., Ryzhkov Yu.V., Scrypnikov V.O. (2022). Increasing the corrosion resistance of heat-resistant alloys for parts of power equipment. *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 4 (140), p. 137–140. URL: <https://doi.org/10.46813/2022-140-137>
10. Hlushkova, D.B., Bagrov, V.A., Saenko, V.A., Volchuk, V.M., Kalinin, A.V., Kalinina, N.E. (2023). Study of wear of the building-up zone of martensite-austenitic and secondary hardening steels of the Cr-Mn-Ti system. *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 2 (144), p. 105–109. URL: <https://doi.org/10.46813/2023-144-105>
11. Holyakevych, A.A., Orlov, L.M., Pokhmurs'ka, H.V., Student, M.M., Chervins'ka, N.R., Khyly'ko, O.V. (2015). Influence of the Phase Composition of the Layers Deposited on the Rods of Hydraulic Cylinders on Their Local Corrosion. *Materials Science*, no. 5 (50), p. 740–747.
12. Zhilkashinova, A., Abilev, M., Pavlov, A., Prokhorenkova N., Skakov, M., Gradoboev, A., Zhilkashinova, A. (2021). Ion-Plasma Spraying and Electron-Beam Treatment of Composite Cr-Al-Co-ZrO₂-Y₂O₃ Coating on the Surface of Ni-Cr Alloy. *Coatings*, 11, 321. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings11030321>
13. Fracture mechanics and strength of materials: Ref. allowance: In 4 vol. (1998) / Under the general editorship of Panasyuk V.V. Vol. 1: *Fundamentals of Fracture Mechanics*. Kyiv, 448 p.
14. Kolotienko, S.D., Kolotiev, A.P. (1981). Analysis of the process of contact destruction of surfacing materials during setting. *The Third Republican Scientific and Technical Conference Modern methods of surfacing and surfacing materials*. Kharkiv, p. 106–108.
15. Hlushkova, D.B., Volchuk, V.M., Polyansky, P.M., Saenko, V.A., Efimenko, A.A. (2023). Fractal modeling the mechanical properties of the metal surface after ion-plasma chrome plating. *Functional Materials*, no. 2 (30), p. 275–281. URL: <https://doi.org/10.15407/fm30.02.275>
16. Volchuk, V., Kroviakov, S., Kryzhanovskiy, V. (2022). Revista Română de Materiale. *Romanian Journal of Materials*, 52(2), 185.
17. Mandelbrot, B.B. (1982). *The Fractal Geometry of Nature*, New York, “W.H. Freeman and Company”.

18. Petrov, V.M., Fedosov, A.V., Yakovlev, S.P. et al. (2023). *AIP Conference Proceedings*, 2700 (1), 020033. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0124918>

Глушкова Діана Борисівна¹, д.т.н., проф., завідувач кафедри технології металів та матеріалознавства, тел. 057-707-37-29, e-mail: diana@khadi.kharkov.ua, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна,

Багров Валерій Анатолійович¹, к.т.н., доцент кафедри технології металів та матеріалознавства, тел. 057-707-37-29, e-mail: havetabanca@ukr.net. Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Волчук Володимир Миколайович², д.т.н., проф., завідувач кафедри матеріалознавства і обробки матеріалів, тел. +38 (056)-745-23-72, e-mail: volchuky@gmail.com, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24 а, Дніпро, 49600, Україна.

Application of modern fractal formalism methods for researching the influence of ion-plasma coatings on assessing the wear resistance of volume hydraulic drive components

Abstract. Problem. The studies on preparation and application of Ti–Cr–N coating on the surface of the 38X2MЮA steel have been conducted. **Goal.** The purpose of the work is to investigate the feasibility of using a fractal approach to evaluate the effect of plasma coatings to increase the wear resistance of parts of a volumetric hydraulic drive. **Methodology.** Cr was chosen as the material for ion bombardment, since it makes it possible to reduce the temperature of the substrate before applying the coating and avoid the risk of surface softening. After heat treatment of the 38X2MЮA steel, its hardness ranges from 40 to 45 HRC. The thickness of the applied coating varied from 3 to 6 microns, which corresponds to good adhesion, a smaller thickness does not significantly affect the properties of the product, and in the case of a thickness of more than 6 microns, peeling is observed due to poor adhesion to

the substrate. **Results.** Five series of experiments with HRC hardness values of 42, 43, 44, 45, 46 were performed. Fractal analysis was used to assess the effect of the Ti–Cr–N coating structure of the working surface of volumetric hydraulic drive parts on its wear indicators. The relative error in calculating wear indicators for fractal models ranged from 0.04 to 8.96. The correlation coefficient of $Y(X_2)$ model without using indicators of the surface fractal dimension was only 0.73. Experiments proved that the lowest wear value of $2.11 \text{ g} \cdot 10^{-3}$ was obtained at a coating thickness of $6 \text{ }\mu\text{m}$ and hardness of 45 HRC. At the same time, a roughness coefficient was 0.16. To confirm this hypothesis, an experiment to determine wear resistance at a hardness of 45, roughness of 0.16, and coating thickness of 6 was conducted. **Conclusions.** Results of the studies of wear indicators of Ti–Cr–N coated samples at the substrate material hardness values from 42 to 46 HRC, surface roughness and coating thickness showed feasibility of the fractal structure estimation approach.

Key words: ion-plasma coatings, surface, fractal, hardening, model.

Hlushkova Diana¹, Doct. Sc. (Tech.), Head of the Department of Technology of Metals and Materials Science, Phone: 057-707-37-29, e-mail: diana@khadi.kharkov.ua, Kharkov National Automobile and Highway University, Str. Yaroslava Mudrogo, 25, Kharkov, 61002, Ukraine,

Bagrov Valeriy¹, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor of the Department of Technology of Metals and Materials Science, Phone: 057-707-37-29, E-mail: havetabanca@ukr.net.

Kharkov National Automobile and Highway University, Str. Yaroslava Mudrogo, 25, Kharkov, 61002, Ukraine

Volchuk Volodymyr², Doct. Sc. (Tech.), Head of the Department of Materials Science and Materials Processing, Phone: +38 (056)-745-23-72, e-mail: volchuky@gmail.com, State Higher Educational Institution Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24 a Chernishevsky St., 49600, Dnipro, Ukraine.