

УДК 620.175.2:669.15

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.104.0.36

ЗАСТОСУВАННЯ ФРАКТАЛЬНОГО ФОРМАЛІЗМУ ДЛЯ ЕКСПРЕС-АНАЛІЗУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Глушкова Д. Б.¹, Волчук В. М.², Яременко О. Ю.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

Анотація. Розглянута методика порівняльного аналізу ефективності зміцнювальних технологій збільшення терміну експлуатації деталей гідромолота способом детонаційного напилення. Для експрес-аналізу механічних властивостей бойка і піки гідромолота після детонаційного напилення для прогнозування механічних властивостей застосовано фрактальний формалізм. Фрактальна розмірність мікроструктури розраховувалася в процесі її збільшення на 100.

Ключові слова: детонаційне покриття, поверхня, фрактал, міцність, гідромолот, математична модель.

Вступ

Вибір методів оброблення є вирішальним для формування комплексу властивостей вихідної деталі, зокрема методів поверхневого оброблення [1–3].

Аналіз публікацій

Детонаційні покриття як різновид газотермічних, що мають найбільш високі характеристики, застосовуються в різноманітних галузях промисловості. Завдяки найбільш високим характеристикам (міцність зчеплення з підкладкою до 250–280 МПа) детонаційне напилення [4,5] може бути найкращим способом для зміцнення та відновлення найбільш навантажених деталей і вузлів. Детонаційне напилення підвищує механічні властивості деталей, поверхня яких зношується в процесі експлуатації.

Мета та постановка завдання

Метою роботи є створення методики порівняльного аналізу ефективності зміцнювальних технологій збільшення терміну експлуатації деталей гідро молота та математичної моделі для оперативного прогнозу механічних властивостей деталей на основі аналізу їхньої фрактальної структури.

Матеріали та методики

Аналіз механічних властивостей деталей після детонаційного напилення за допомогою неруйнівних методів контролю, що базуються на визначенні структури, ускладнений через складну конфігурацію форми її складових. Неоднорідна та складна щодо геометричності структура притаманна для багатьох

поверхонь після різноманітних способів напилення [6–8].

У роботі запропоновано застосувати теорію фракталів для аналізу механічних властивостей деталей гідромолота [9–11].

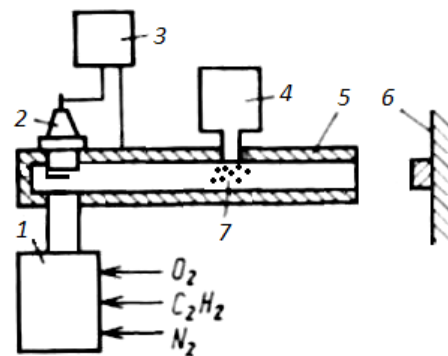


Рис. 1. Схема детонаційного пристрою складається з таких елементів: 1 – блок, з якого подається газова суміш; 2 – запалювач; 3 – блок підпалу; 4 – блок пристрою, що дозує; службовець для утворення необхідних газових сумішей та запалювача; 5 – ствол (труба, діаметром 20–50 мм, довжиною 1–2,5 м); 6 – поверхня деталі; 7 – частинки, що напилюються

Детонаційні прилади складаються з блока 4 подачі порошку напилювання, що містить порошок живильник і пристрій, що дозує, блока 1, службовця для утворення необхідних газових сумішей, які потрапляють до ствола детонаційної установки із заданою швидкістю, блока підпалу 3 та запалювача 2, призначених для ініціювання вибуху робочої суміші; ствола 5, тобто труби, діаметром 20–50 мм, довжиною 1–2,5 м,

призначеного для спрямованого поширення вибухової хвилі вбік відкритого кінця ствола.

Принцип дії установки: з блока 1 газова суміш подається до ствола 5. Одночасно з порошкового живильника через пристрій, що дозує (блок), заданими порціями газом азотом або повітрям в газову суміш безпосередньо перед її запалюванням вдувають порошок дрібнодисперсний, потім запалювачем 2 підпалюють газову суміш. У процесі займання та переміщення вздовж каналу горючої суміші відбувається її вибух з виділенням значної кількості теплоти й утворенням детонаційної хвилі, яка прискорює та переносить крізь стовбур на поверхню деталі 6 частинки 7, що напилюються, зі швидкістю, що визначається геометрією стовбура та складом газу.

Робочі очищені поверхні деталей гідромолота без попереднього оброблення зміцнювали способом детонаційного напилення сплаву ВК25 (80 %) та сполучного матеріалу ПТ-НА-01 (Ni 91 %, Al 9%). Порошок ВК 25, що використовується, є карбідом вольфраму-кобальту (WC-Co), що містить до 25 % кобальту, і застосовується для робіт в умовах фретинг-корозії, абразивного зношення за звичайних і підвищених (до 650° С) температур. Використовували порошок зернистості 20–100 мкм; який розплавлявся в киснево-ацетиленовому полум'ї та газовим потоком потрапляє на поверхню деталі. Товщина напиленого шару – 0,1 мм. Співвідношення вмісту кисню до вмісту ацетилену становило 12; глибина завантаження порошку – 300 мм, дистанція напилення становить 150 мм, навішування порошку – 200 г, довжина ствола – 1,6 м, діаметр ствола – 16 мм.

Результати та їхнє обговорення

Шорсткість поверхонь деталей перед напиленням становила Ra 0,35–2,5. Після процесу напилення шорсткість робочих поверхонь деталей збільшилася до значень Ra 4,8–5,4 на корпусі та втулці і до 2,8–3,7 на бойку та пікі.

Початкові ознаки руйнування зміцненого шару виявлено на піку після 400 циклів навантаження. Ризики-задири в зонах «М» і «F» на бойці (рис. 2) з'явилися після 1300 циклів, на втулці після 1050 циклів навантаження і на корпусі після 1700 циклів. Випробування здійснено обсягом у 1800 циклів. Вимірювання випробуваних деталей демонструють, що наведений діаметр каналів у зоні зрізу збільшився до 125,2 мм. Бойок зносився на 0,25 мм, піка в зонах «М» і «F» отримала зношення 1,2 мм. Вигляд пошкодження деталей, зміцнених детонаційним напиленням, наведено на рис. 2 та 3.

Місце розташування та пошкодження поверхонь деталей однотипні з тими, що були на раніше досліджених комплектах пристрою. На корпусі та втулці спостерігаються такі ознаки деградації поверхневих обсягів матеріалу деталей, як зношування, наклеп, пластичне деформування з утворенням борозен радіальної спрямованості, окислення поверхні. У зоні «А» на корпусі спостерігається зношування та наклеп, на втулці – зсувні лінії.

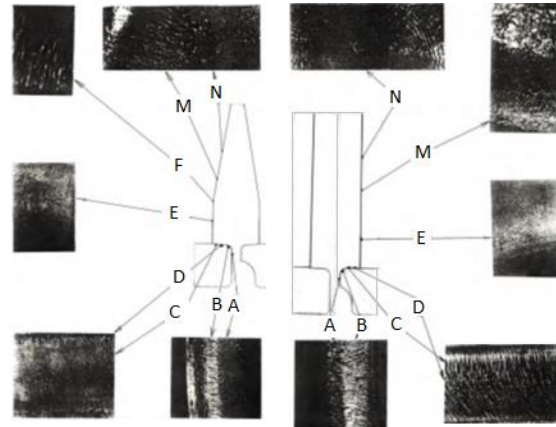


Рис. 2. Пошкодження піки та втулки, зміцнених детонаційним напиленням, $\times 3$

Рис. 3. Пошкодження корпусу та бойка, зміцнених детонаційним напиленням, $\times 3$

У зоні «В» на корпусі спостерігається слабо виражений складкоподібний рельєф, на втулці рельєф борозд згладжений до основи так, що з'явилися хвилеподібні зони змінання. Лушення поверхневих шарів металу в зоні «С» відрізняється на втулці, на корпусі – гладка поверхня. У зоні «D» є ознаки опрацювання поверхонь.

Зношення бойка та піки є типовим. За наявності центральної плями та борозен у периферійній частині зони «N», складкоподібного рельєфу борозен у зоні «M», зношення та пластичного деформування з утворенням шорсткої поверхні, що лушиться в зоні «F», і зношення з наклепом у зоні «E» спостерігається менша «грубість» рельєфу та велика згладженість для бойка та піки. На бойку ступінь пошкодження є меншим.

Корпус і бойок визначаються наявністю на поверхні більш темних кольорів.

У процесі випробування всіх досліджених деталей пристрою утворилися тріщини. На втулці їхня глибина становить до 0,05 мм, вони є одиничними та спостерігаються лише в зоні «З» (рис. 4). На корпусі тріщини наявні в зонах «А», «В» і «З», їхня глибина

становить 0,25 мм, 0,4 мм і 0,1 мм (рис. 5). У зоні "D" тріщини відсутні.

На бойку та піку в зоні «N» тріщин немає. У зонах «M» бойка та піки наявні тріщини завглибшки 0,3–0,4 мм. Тріщини глибиною 0,1 мм наявні в зоні F піки, а глибиною 0,15 мм у зоні бойка. Тріщини також наявні як в зонах структурних змін, так і поза ними.

У робочих зонах всіх досліджених деталей пристрою в процесі випробування відбулося повне зношування детонаційного покриття (див. рис. 4 і 5), лише в зоні «M» корпусу та втулки наявні залишки покриття товщиною до 20 мкм. Такі самі ділянки є на бойку в зоні «F».

У зонах пошкоджень усіх деталей відбулися структурні зміни основного металу. На корпусі та втулці структурні перетворення спостерігаються в зонах «A» і «B» на глибині 0,2 мм на корпусі і 0,15 мм на втулці.

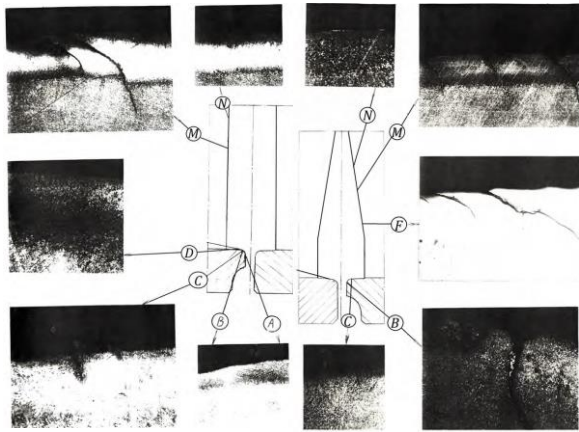


Рис. 4. Структурні зміни матеріалу корпусу та бойка, зміцнених детонаційним напиленням, $\times 100$

Рис. 5. Структурні зміни матеріалу піку та втулки, зміцнених детонаційним напиленням, $\times 100$

Твердість матеріалу в цих зонах на корпусі становить HV 414–540 та HV 414–645 на втулці. У зонах «C» корпусу та втулки глибина структурних перетворень не перевищує 0,05 мм (HV 460–480). На бойку та піку структурні зміни металу спостерігаються в зоні «M» на глибині 0,25–0,3 мм та в зоні «F» на глибині 0,1–0,15 мм (для обох) за твердості HV 340–475 (на піку HV – 560–675). У зонах «E» бойка та піку та в зоні «N» бойка структурні зміни відсутні. На піку в цій зоні глибина структурних змін становить 0,15 мм (HV 340–560).

Фрактальна розмірність D структури бойка та піки гідромолота після

детонаційного напилення в разі збільшення на 100 вираховувалася за формулою Хаусдорфа [12]:

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

де $N(\delta)$ – кількість клітин з лінійним розміром d , якими покривають досліджуваний об'єкт.

Результати фрактального аналізу структури піки та корпусу наведено на рис. 6 та рис. 7.

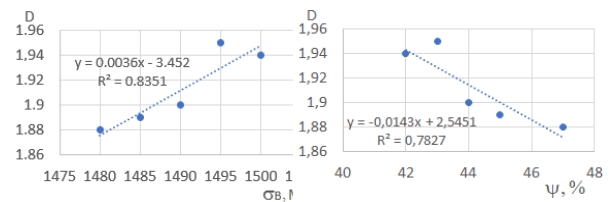


Рис. 6. Співвідношення між фрактальною розмірністю поверхні корпусу D та межею міцності σ_b для осьових зразків

Рис. 7. Співвідношення між фрактальною розмірністю поверхні піки D та відносним звуженням для тангенціальних зразків

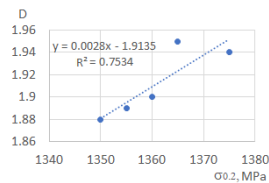


Рис. 8. Співвідношення між фрактальною розмірністю поверхні корпусу D та межею текучості $\sigma_{0.2}$ для осьових зразків

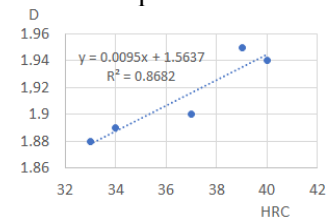


Рис. 9. Співвідношення між фрактальною розмірністю поверхні піки D та її твердістю HRC в тангенціальному напрямі

Висновки

1. Створена й апробована методика порівняльного аналізу ефективності зміцнювальних технологій збільшення терміну експлуатації деталей гідромолота, яка базується на випробуванні деталей після різних способів зміцнення та забезпечує дію в процесі навантаження тисків і газодинамічних характеристик, що імітують відповідні параметри експлуатаційних навантажень.

2. У процесі випробування деталей, зміцнених дослідженими методами, як порівняти з початковим варіантом, суттєве підвищення зносостійкості у контрольованому перерізі бійка і піки в разі зміцнення досягається

способом детонаційно-газового наплавлення, водночас тріщиностійкість матеріалу збільшується в 1,3–2,4 раза, порівнюючи з початковим станом.

3. Отримані математичні моделі можна використовувати для оперативного прогнозу механічних властивостей деталей гідромолота, зміцнених детонаційним напиленням на основі аналізу їхньої фрактальної структури в межах похибки до 6 %.

Література

- Subbotina, V., Bilozero, V., Subbotin, O., Kniaziev, S., Volkov, O., Lazorko, O. New features of surface modification of magnesium alloys by microarc oxidation (MAO). *Functional Materials*. (2023). 30(4). 590–596. <https://doi.org/10.15407/fm30.04.590>
- Subbotina, V. V., Belozero, V. V. The effect of electrolysis conditions during microarc oxidation on the phase-structural state, hardness and corrosion resistance of magnesium alloys. *Physics and chemistry of solid state*. (2020). 21(3). 545. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.3.545-551>
- Nersisyan, H. H., Lee, J. H., Wok, C. W. Selfpropagating high – temperature synthesis of nano-sized titanium carbide powder. *Journal of Material Science*. (2002). 11(17). 2859–2864.
- Davis Joseph, R. *Handbook of Thermal Spray Technology*. USA: ASM Thermal Spray Society, 2004.
- Lacalle, De, López L. N., Gutiérrez, A., Lamikiz, A., Fernandes, M. H., Sánchez, J. A. Turning of Thick Thermal Spray Coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*. (2001). 10(2). 249–254.
- Hlushkova, D. B., Bagrov, V. A., Saenko, V. A., Volchuk, V. M., Kalinin, A. V., Kalinina, N. E. 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*. (2023). 144(2). 105–109. <https://doi.org/10.46813/2023-144-105>
- Hlushkova, D. B., Bagrov, V. A., Volchuk, V. M., Murzakhmetova, U. A. Influence of structure and phase composition on wear resistance of sparingly alloyed alloys, *Functional Materials*. (2023). 30(1). 74–78. <https://doi.org/10.15407/fm30.01.74>
- Vahrusheva, V. S., Hlushkova, D. B., Volchuk, V. M., Nosova, T. V., Mamhur, S. I., Tsokur, N. I., Bagrov, V. A., Demchenko, S. V., Ryzhkov, Yu. V., Scrypnikov, V. O. Increasing the corrosion resistance of heat-resistant alloys for parts of power equipment, *Problems of Atomic Science and Technology*. (2022). 4(140). 137–140. <https://doi.org/10.46813/2022-140-137>
- Hlushkova, D. B., Volchuk, V. M., Polyansky, P. M., Saenko, V. A., Efimenko, A. A. Fractal modeling the mechanical properties of the

metal surface after ion-plasma chrome plating, *Functional Materials*. (2023). 30(2). 275–281.

<https://doi.org/10.15407/fm30.02.275>

- Hlushkova, D. B., Volchuk, V. M. Fractal study of the effect of ion plasma coatings on wear resistance. *Functional Materials*. (2023). 30(3). 453–457. <https://doi.org/10.15407/fm30.03.453>
- Hausdorff F. Dimension und äußeres Maß. *Mathematische Annalen*. (1919). 7. 157–179.

References

- Subbotina, V., Bilozero, V., Subbotin, O., Kniaziev, S., Volkov, O., Lazorko, O. New features of surface modification of magnesium alloys by microarc oxidation (MAO). *Functional Materials*. (2023). 30(4). 590–596. <https://doi.org/10.15407/fm30.04.590>
- Subbotina, V. V., Belozero, V. V. The effect of electrolysis conditions during microarc oxidation on the phase-structural state, hardness and corrosion resistance of magnesium alloys., *Physics and chemistry of solid state*. (2020). 21(3). 545. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.3.545-551>
- Nersisyan, H. H., Lee, J. H., Wok, C. W. Selfpropagating high – temperature synthesis of nano-sized titanium carbide powder. *Journal of Material Science*. (2002). 11(17). 2859–2864.
- Davis Joseph, R. *Handbook of Thermal Spray Technology*. USA: ASM Thermal Spray Society, 2004.
- Lacalle, De, López L. N., Gutiérrez, A., Lamikiz, A., Fernandes, M. H., Sánchez, J. A. Turning of Thick Thermal Spray Coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*. (2001). 10(2). 249–254.
- Hlushkova, D. B., Bagrov, V. A., Saenko, V. A., Volchuk, V. M., Kalinin, A. V., Kalinina, N. E. 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*. (2023). 144(2). 105–109. <https://doi.org/10.46813/2023-144-105>
- Hlushkova, D. B., Bagrov, V. A., Volchuk, V. M., Murzakhmetova, U. A. Influence of structure and phase composition on wear resistance of sparingly alloyed alloys, *Functional Materials*. (2023). 30(1). 74–78. <https://doi.org/10.15407/fm30.01.74>
- Vahrusheva, V. S., Hlushkova, D. B., Volchuk, V. M., Nosova, T. V., Mamhur, S. I., Tsokur, N. I., Bagrov, V. A., Demchenko, S. V., Ryzhkov, Yu. V., Scrypnikov, V. O. Increasing the corrosion resistance of heat-resistant alloys for parts of power equipment, *Problems of Atomic Science and Technology*. (2022). 4(140). 137–140. <https://doi.org/10.46813/2022-140-137>
- Hlushkova, D. B., Volchuk, V. M., Polyansky, P. M., Saenko, V. A., Efimenko, A. A. Fractal modeling the mechanical properties of the metal surface after ion-plasma chrome plating,

- Functional Materials. (2023). 30(2). 275–281. <https://doi.org/10.15407/fm30.02.275>
10. Hlushkova, D. B., Volchuk, V. M. Fractal study of the effect of ion plasma coatings on wear resistance. Functional Materials. (2023). 30(3). 453–457 <https://doi.org/10.15407/fm30.03.453>
11. Hausdorff F. Dimension und äußeres Maß. Mathematische Annalen. (1919). 7. 157–179.

Глушкова Діана Борисівна¹, професор, д.т.н., кафедра технології металів та матеріалознавства, ORCID: 0000-0001-8412-6584, diana.borisovna@gmail.com,

Волчук Володимир Миколайович², професор, д.т.н., кафедра прикладного матеріалознавства, volchuk.volodymyr@pdaba.edu.ua

Яременко Олександр Юрійович¹, студент, ¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослав Мудрого, 25, 61002, Харків, Україна

²Придніпровська державна академія будівництва і архітектури, вул. Чернишевського, 24, 49600, Дніпро, Україна

Application of Fractal Formalism for Express Analysis of Mechanical Properties of Parts

Abstract. Problem The choice of processing methods plays a decisive role in the formation of the set of properties of the original part, especially the methods of surface processing. **Problem.** Detonation coatings, as a type of gas-thermal coatings, due to the highest characteristics, are increasingly used in various industries. Due to the highest characteristics (bonding strength with the substrate up to 250–280 MPa), detonation spraying can be better for strengthening and restoring the most responsible and loaded parts and assemblies. **Goal.** Detonation spraying increases the mechanical properties of various parts of a responsible purpose, whose surface wears out during operation. It is proposed to apply the theory of fractals to estimate the mechanical properties of hydraulic hammer parts. **Methodology.** Evaluation of the mechanical properties of parts after detonation spraying using non-destructive control methods based on structure analysis is complicated due to the complex configuration of the shape of its components. A heterogeneous and geometrically complex structure is characteristic of many surfaces after various types of

spraying/dosing device (block), fuel oil or air is blown in specified portions – finely dispersed powder into the gas mixture immediately before its ignition, then the gas mixture is ignited. **Results.** As a result of ignition and movement along the channel of the combustible mixture, it explodes with the release of a significant amount of heat and the formation of a detonation wave, which accelerates and transfers through the barrel to the surface of the part the particles that are sprayed, with a speed determined by the geometry of the barrel and the composition of the gas. **Originality.** The fractal dimension D of the structure of the hammer and the peaks of the hydrohammer after detonation spraying at a magnification of 100 was calculated according to the Hausdorff formula where $N(\delta)$ is the number of cells with linear size, that cover the object under. A method of comparative evaluation of the effectiveness of strengthening technologies for increasing the durability of hydraulic hammer parts has been created and tested, which is based on testing parts after various strengthening options and provides action during the loading process of pressures and gas-dynamic characteristics that simulate the relevant parameters of operational loads. **Practical value.** Tests of parts strengthened by the researched methods showed that, compared to the initial version, a significant increase in wear resistance is achieved: Mathematical models are obtained, which makes it possible to carry out an operational forecast of the mechanical properties of hydraulic hammer parts strengthened by detonation spraying based on the analysis of their fractal structure within an error of up to 6 %.

Keywords: detonation coating, surface, fractal, strength, hydraulic hammer, mathematical model.

Hlushkova Diana¹, professor, Doct. of Science, Technologies of metals and materials science Department, ORCID: 0000-0001-8412-6584, diana.borisovna@gmail.com,

Volchuk Volodymyr², professor, Doct. Of Science, department of applied materials science, volchuk.volodymyr@pdaba.edu.ua

Yaremenko Oleksandr, student ¹Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine

²Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24, Chernishevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine.