

## ФРАКТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗМІЦНЕНИХ ДЕТАЛЕЙ ГІДРОМОЛОТА

Глушкова Д. Б.<sup>1</sup>, Волчук В. М.<sup>2</sup>, Саєнко В. О.<sup>1</sup>, Єфіменко А. О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

<sup>2</sup>Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

**Анотація.** Інтенсивне абразивне зношування деталей гідромолота в процесі експлуатації призводить до зменшення їх залишкового ресурсу. Оскільки наявні методи об'ємного та поверхневого зміцнення деталей не дають суттєвого ефекту, актуальним стало залучення методу іонно-плазмового хромування. Високоякісні покриття хрому отримані за температури підкладки не нижче за 80–100 °С. На підставі досліджень встановлено вплив іонно-плазмового хромування на зносостійкість та механічні властивості деталей гідромолота, а також проаналізовано структурні зміни в матеріалі. Технологія іонно-плазмового хромування забезпечує роботу зміцнених деталей без сколів та без викрошування та підвищує їх зносостійкість у 1,75 раза. На ділянках ушкодження деталей відзначаються зони структурних перетворень, властиві для явищ вторинного загартування. Для аналізу неоднорідної поверхні деталей гідромолота (бойка, піки) застосовано теорію фракталів, зокрема мультифрактальний аналіз із застосуванням рівняння Реньї. Досліджувалась сорбітна структура бойка та піки за умови збільшення в 100 разів. Отримано моделі, що описують зв'язок між механічними властивостями та мультифрактальними характеристиками структури: однорідності  $D_{600}$ , упорядкованості (прихованої періодичності)  $\Delta = D_1 - D_{600}$ , регулярності  $K = D_{-600} - D_{600}$ . Адекватність моделей підтверджується статистикою Durbin-Watson на рівні 2,62 та 3,12. Установлено чутливість досліджуваних мультифрактальних статистичних характеристик цементиту до властивостей міцності  $\sigma_b$  (0,80) і  $\sigma_{0,2}$  (0,96), а також фериту до пластичних властивостей  $\delta$  (0,97) і  $\psi$  (0,97). Здобуті результати дають змогу використовувати цей підхід як експрес-методику неруйнівного контролю в прогнозуванні механічних властивостей відповідальних деталей гідромолота після іонно-плазмового хромування.

**Ключові слова:** механічні властивості, гідромолот, мультифрактал, зміцнення, модель, іонно-плазмове хромування.

### Вступ

Інтенсивний розвиток промисловості ініціює використання високоякісного обладнання. Особлива вимога висувається до деталей відповідального призначення, зокрема до деталей гідромолота [1]. Однією з основних вимог щодо надійності та довговічності деталей гідромолота є зносостійкість. Це пов'язано з тим, що робочим інструментом гідромолота є зубила, плити для трамбування, клини тощо. Недостатня зносостійкість обмежує зростання продуктивності гідромолотів і термінів їх експлуатації, збільшує витрати на ремонт і запасні частини.

Останнім часом для вирішення завдання підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів використовуються нові методи поверхневого зміцнення [2, 3], зокрема лазерне оброблення поверхні [4, 5], наплавлення поверхні [6, 7], детонаційне напилення [8], наномодифікування поверхні [9] та інші прогресивні методи. Необхідно зазначити, що

не всі з перелічених методик здатні забезпечити необхідну зносостійкість робочих поверхонь машин і деталей [10, 11].

Публікації останніх років, наприклад [1], свідчать, що застосування іонно-плазмового нанесення покриття є одним із перспективних підходів щодо забезпечення підвищення зносостійкості робочих поверхонь машин і деталей, що експлуатуються в умовах абразивного зношування. Іонно-плазмове оброблення змінює структуру робочої поверхні машин і деталей, яка визначає їх властивості. Здебільшого подібна структура є неоднорідною, що ускладнює її кількісну оцінку із застосуванням традиційних методів металографії. Складність ідентифікації таких структур зумовлена вибором метрики вимірів [12]. Для оцінки структур різного ступеня складності застосовують теорію фракталів, запроваджену Б. Мандельбротом [13], яка ґрунтується на нецілочисельній (фрактальній) розмірності. Як показано в багатьох публікаціях,

наприклад [14, 15], фрактальна розмірність є індикатором структурних змін і властивостей матеріалу.

#### Мета та постановка завдання

З огляду на вищесказане метою цієї роботи є застосування фрактального формалізму для оцінювання неоднорідної структури відповідальних деталей гідромолота після іонно-плазмового оброблення з подальшим установленням зв'язку між спектром розмірностей структури та спектром механічних властивостей. Для вирішення поставленої мети в роботі виконані такі завдання:

1. Дослідити вплив іонно-плазмового оброблення на характер пошкоджень покриттів гідромолота за умови зношування його нижніх деталей (втулки, піки, бойка).

2. Застосувати мультифрактальний аналіз неоднорідної сорбітної структури для оцінювання механічних властивостей відповідальних деталей гідромолота (бойка та піки) після іонно-плазмового оброблення.

#### Матеріали й методики досліджень

Відповідальні деталі, зміцнені іонно-плазмовим хромуванням, майже до руйнування покриття в процесі експлуатації мають хорошу зносостійкість [16]. Тому вибір режимів іонно-плазмового хромування поверхні, що дають змогу підвищити зносостійкість відповідальних деталей гідромолота, є актуальним [17].

У роботі виконано зміцнювальне оброблення (іонно-плазмове хромування) за вдосконаленою технологією, що передбачає перегрів деталей у процесі нанесення покриття та викрошування його під час випробування.

Високоякісні покриття з чистих металів отримані за температур підкладки не менше ніж 80–100 °С. Вихідними технологічними матеріалами для вакуумного іонно-плазмового напилення є катоди з напилюваних металів, у нашому випадку хром (ВХ-1). Вакуумне іонно-плазмове напилення проводили на установці «Булат» (рис. 1), що складається з камери, системи вакуумного відкачування, випарників, поворотного пристрою, водяної системи та підставки.

Дослідження поверхні деталей гідромолота, зміцненого іонно-плазмовим хромуванням, проводили із застосуванням мультифрактального аналізу [18], що зумовлено неоднорідністю структури.

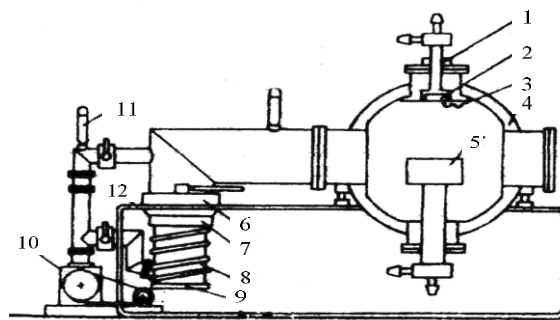


Рис. 1. Загальна схема установки «Булат»: 1 – фокусувальна котушка; 2 – катод; 3 – підпалювальний електрод; 4 – камера-анод; 5 – підкладка; 6 – азотна пастка; 7 – водяна пастка; 8 – високовакуумний агрегат; 9 – нагрівач; 10 – формовакуумний насос; 11 – монотрична лампа; 12 – система водяного охолодження установки

Мультифрактальний аналіз ґрунтується на оцінці статистичних характеристик елементів структури металу, що обчислюються за спектром розмірностей Реньї  $D(q)$  [19]. Розмірності  $D(q)$  є набором статистичних розмірностей [20] однорідних підмножин (елементів структури) вихідної множини (структури), які мають найбільший внесок у статистичну суму  $\sum_{i=1}^N p_i^q$  за умови заданих значень показника ступеня  $q$ . Ця статистична сума визначає розподіл імовірностей по всіх точках досліджуваної поверхні:

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \frac{\ln \sum_{i=1}^N p_i^q}{\ln \varepsilon}, \quad (1)$$

де  $p_i$  – імовірність знаходження досліджуваної точки (пікселя для ЕОМ), що належить об'єкту, який розглядається, в  $i$ -му осередку квадратної сітки розміром  $\varepsilon$ . Показник ступеня  $q$  може приймати будь-які значення в діапазоні від  $-\infty$  до  $+\infty$ . У роботі показник ступеня  $q$  змінювався в діапазоні від  $q_{\min} = -600$  до  $q_{\max} = 600$ .

Позначивши розмірності спектра Реньї  $D_0, D_1, D_2, D_\infty, D_{-\infty}$ , що характеризують відповідно:  $D_0$  – однорідний фрактал (розмірність Хаусдорфа) за умови  $q=0$ ;  $D_1$  – інформаційну розмірність, якщо  $q=1$  (інформаційну ентропію), характеризує швидкість зростання кількості інформації та показує, як зростає інформація, необхідна для визначення місця розташування точки, що розміщена на об'єкті дослідження, у разі прямування

розміру клітинки  $\delta$ , якими покривають об'єкт, до нуля;  $D_2$  – кореляційну розмірність, що за умови  $q=2$  характеризує ймовірність знаходження в одному й тому самому осередку сітки двох точок, що розташовані на об'єкті спостереження;  $D_{+\infty}$  – розмірність, що характеризує найбільш розріджений простір в об'єкті спостереження (коли  $q=+\infty$ );  $D_{-\infty}$  – розмірність, що характеризує найбільш концентрований простір (якщо  $q=+\infty$ ), який спостерігається в цьому об'єкті.

Фрактальна розмірність (розмірність Хаусдорфа) обчислювалася за формулою спектра розмірностей (1), якщо  $q = 0$  і дорівнює:

$$D = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}, \quad (2)$$

де  $N(\varepsilon)$  – кількість клітин розміром  $\varepsilon$ , якими покривають досліджувану структуру.

Для визначення степеня неоднорідності структури обчислювався спектр сингулярності  $f(\alpha)$  (3). Цей спектр описується заповненням квадратних осередків  $\varepsilon$  з однаковими ймовірностями, коли  $p_i(\varepsilon) \approx \varepsilon^\alpha$ .

$$\begin{cases} \alpha = \frac{d\tau(q)}{dq}, \\ f(\alpha) = q\alpha - \tau(q) \end{cases} \quad (3)$$

Спектр  $f(\alpha)$  обчислювали способом перетворень Лежандра функції  $\tau(q)$  для кожного досліджуваного фотознімку мікроструктури поверхні деталей гідромолота.

### Виклад матеріалу дослідження

Для вирішення поставленого завдання було реалізовано такі етапи:

1. Аналіз пошкоджених робочих поверхонь випробуваних деталей гідромолота за характером і місцем розташування зон з метою реалізації технологічного процесу їх зміцнення із застосуванням іонно-плазмового хромування.

2. Реєстрація зміни структури та властивостей зміцнених поверхневих ділянок досліджуваних у процесі експлуатації деталей із застосуванням фрактального формалізму.

Під час реалізації першого етапу досліджувався характер пошкодження деталей після зношування, зміцнених іонно-плазмовим хромуванням за вдосконаленою технологією (рис. 2).

Початкові ознаки руйнування покриття у вигляді рисок-задірів виявлені на піці в зонах  $M$  і  $F$  після 300 циклів навантаження, на бойку в тих самих зонах після 450 циклів.

У порожнині каналу втулки риски виникли після 600 циклів, корпусу – 700 циклів навантаження. У каналах корпусу та втулки (зона) та їх зрізі після 800 циклів утворилися тріщини, орієнтовані вздовж осі деталей. У зв'язку зі зносом покриття на найбільш навантажених ділянках деталей пристрою випробування було припинено після 1730 циклів навантаження. Вимірювання зношених деталей показують, що наведений діаметр каналів корпусу та втулки в зоні зрізу збільшився до 125,5 мм. Бойок зносився в зоні  $N$  на 0,2 мм, у зоні  $M$  – на 0,5 мм. Піка, відповідно, на 0,3 мм та 0,85 мм. Місця розташування зон найбільшого зношування та характер пошкоджень деталей аналогічні, що спостерігається на досліджених вище деталях.

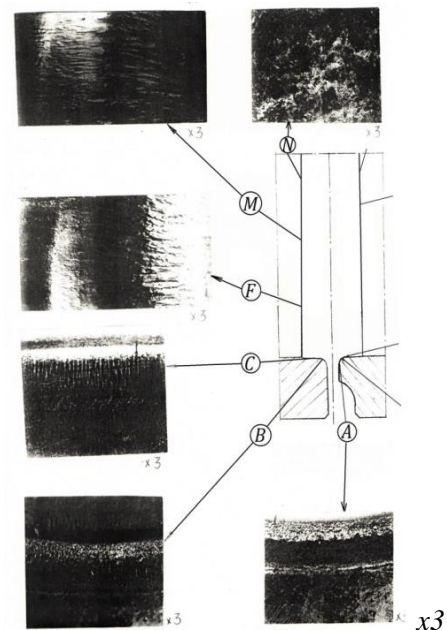


Рис. 2. Результати зношування піки та втулки, зміцнених за допомогою іонно-плазмового хромування за вдосконаленою технологією

У зоні  $A$  каналу бойка (корпусу) та втулки спостерігається зношування, наклеп і пластичне деформування металу (рис. 3). Ці явища інтенсивніші на втулці. У зоні  $B$  видно зношування, пластичне деформування поверхнього шару та утворення борозен-задірів. На втулці вершини борозен зглажені, зношені (місцями вщент); на ко-

рпусі – грубі борозни, без ознак зношування. У зоні *C* спостерігається рівномірне зношування, наклеп і лушення поверхневого шару. Лушення на корпусі значне, на втулці – на початковій стадії. На корпусі є незначні ділянки зміцненого шару, що зберігся. На корпусі та втулці зношування покриття проходить без ознак викрошування або відшаровування.

Характер пошкодження бойка та піки аналогічний тому, що спостерігається на раніше досліджених деталях, зміцнених іонно-плазмовим хромуванням за вихідною технологією. У центральній частині бойка (зона *N*) помітна заглажена пляма з покриттям, що збереглося. На бойку покриття зношене меншою мірою, ніж на піці. Зона *M* характеризується наявністю рельєфу борозен-задирів, розвинених переважно на піці. На бойку внаслідок зношування рельєф борозен значно зглажений. Зазначається, що за ступенем розвиненості борозен бойок та піка відрізняються менше, ніж бойок та піка раніше досліджених варіантів зміцнення.

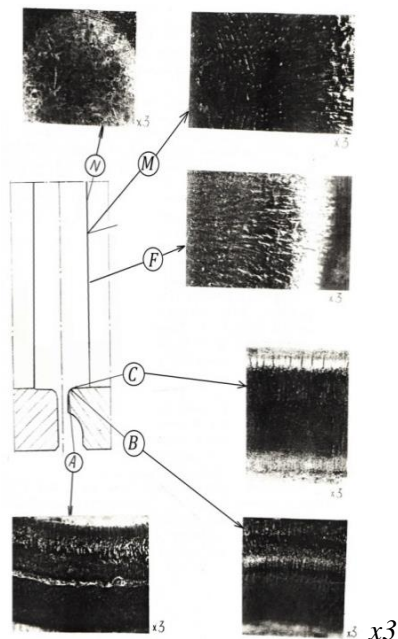


Рис. 3. Результати зношування корпусу та бойка, зміцнених за допомогою іонно-плазмового хромування за вдосконаленою технологією

Зона *F* характеризується зношуванням покриття, наклепом та заглаженістю поверхні. Пошкодження в цій зоні рівномірно по окружності деталей і практично однаково на бойку та піці. Сліди приробітку та наклепу покриття спостерігаються в зоні *E*. По кон-

туру деталей відзначається наволокування металу на кромку циліндричної поверхні.

На випробуваних деталях дослідженого варіанта спостерігаються тріщини (рис. 4 і рис. 5).

На корпусі та втулці тріщини спостерігаються у зонах *A* та *B*. Глибина їх на корпусі досягає 0,55 мм, на втулці – 0,4 мм. У зоні *C* тріщини відсутні. На бойку тріщини фіксуються в зоні *N* завглибшки до 0,3 мм та в зоні *M* – до 0,6 мм. На піці тріщини спостерігаються лише в зоні *M*, завглибшки до 0,6 мм.

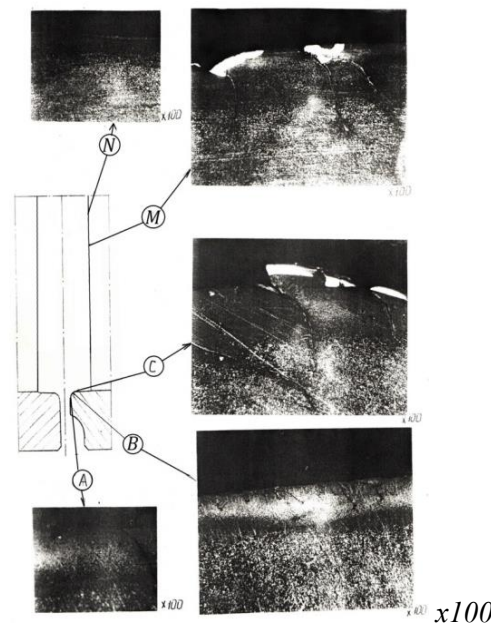


Рис. 4. Структурні зміни матеріалу корпусу та бойка, зміцнених іонно-плазмовим хромуванням (за вдосконаленою технологією)

Вигляд тріщин у зламах аналогічний тому, що раніше спостерігався в інших варіантах зміцнення (окреслений контур, окислення і зглаженість поверхні).

На корпусі та втулці залишки покриття спостерігаються в зонах *A* та *C*.

Товщина покриття на втулці в зонах *A* та *C* становить 10 мкм, на корпусі (каналі) в зоні *C* – до 10 мкм. На бойку та піці покриття збереглося лише в зонах *N* і *E*. Товщина шару на бойку – 10 мкм, на піці – до 5 мкм.

У металі досліджуваних деталей у зонах ушкодження спостерігаються структурні зміни. На втулці структурні перетворення завглибшки 0,25–0,30 мм спостерігаються в зонах *A* та *B*, на верхній – завглибшки 0,15–0,20 мкм у зонах *A*, *B* і *C* відповідно.

Твердість матеріалу HV у зонах структурних перетворень змінювалася в межах 510–645 одиниць.

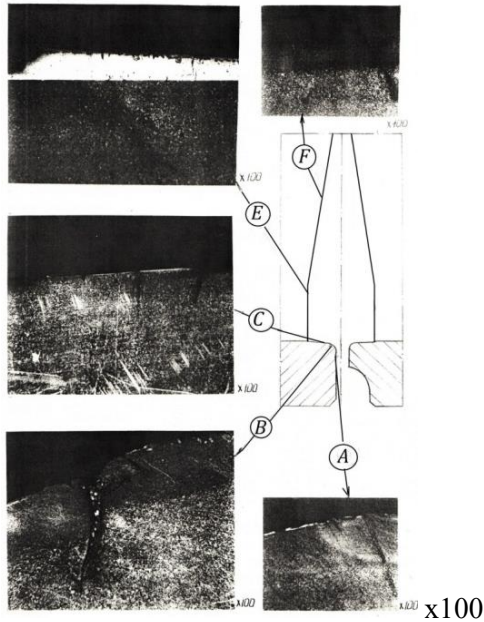


Рис. 5. Структурні зміни матеріалу піки та втулки, зміцнених іонно-плазмовим хромуванням (за вдосконаленою технологією)

У матеріалі піки структурні зміни на глибину 0,25–0,30 мм спостерігаються в зонах *N* і *M*. На бойку в цих зонах глибина структурних змін – 0,15–0,20 мм. Твердість матеріалу у зонах структурних змін – HV 510–585.

Твердість матеріалу досліджених деталей становить:

втулка – HRC 40-42; піка – HRC 40-42;  
корпус – HRC 40-42; бойок – HRC 40-42.

Мікроструктура матеріалу деталей сорбітного типу, тонкодисперсної будови.

Для реалізації другого етапу досліджень застосовувався фрактальний підхід.

На підставі результатів аналізу спектра статистичних розмірностей  $D(q)$  та спектра сингулярностей  $f(\alpha)$ , обчислені такі статистичні характеристики структури [21]:

– *однорідність*, яка описує локальну дефектність аналізованої структури, пористість чи шорсткість її окремих елементів. Їй відповідає величина  $D$  (якщо  $q = 600$ ), збільшення значень якої свідчить про зростання однорідності структури. Якщо структура повністю однорідна, спектр  $f(\alpha)$  вироджується в точку. Неоднорідність структури означає нерівномірний розподіл точок по ділянках, на які розбивається структура, тобто її геометрично однакові елементи заповнені точками з різною ймовірністю;

– *упорядкованість структури або прихована періодичність*  $\Delta = D_1 - D_{600}$  та *регулярність*  $K = D_{-600} - D_{600}$ . Розмірність  $D_1$  носить назву інформаційної розмірності та обчислюється зі спектра розмірностей за умови показника  $q$ , рівному 1. Ці характеристики описують міру порушення симетрії структури або ступінь нерівноважності системи. Що вищі чисельні значення показників  $\Delta$  і  $K$ , то більше в структурі періодичних складників (повторюваних структурних елементів одного структурного складника) і то краще вона впорядкована.

На рис. 6 і рис. 7 наведено розрахунки спектрів функцій  $D(q)$  і  $f(\alpha)$  для структур поверхні бойка, що наведені на рис. 4, та піки (див. рис. 5). Характеристики однорідності, упорядкованості та регулярності обчислені на основі аналізу спектра  $D(q)$  (рис. 6). Спектр  $f(\alpha)$  (рис. 7) визначає ступінь розмірної однорідності структури.

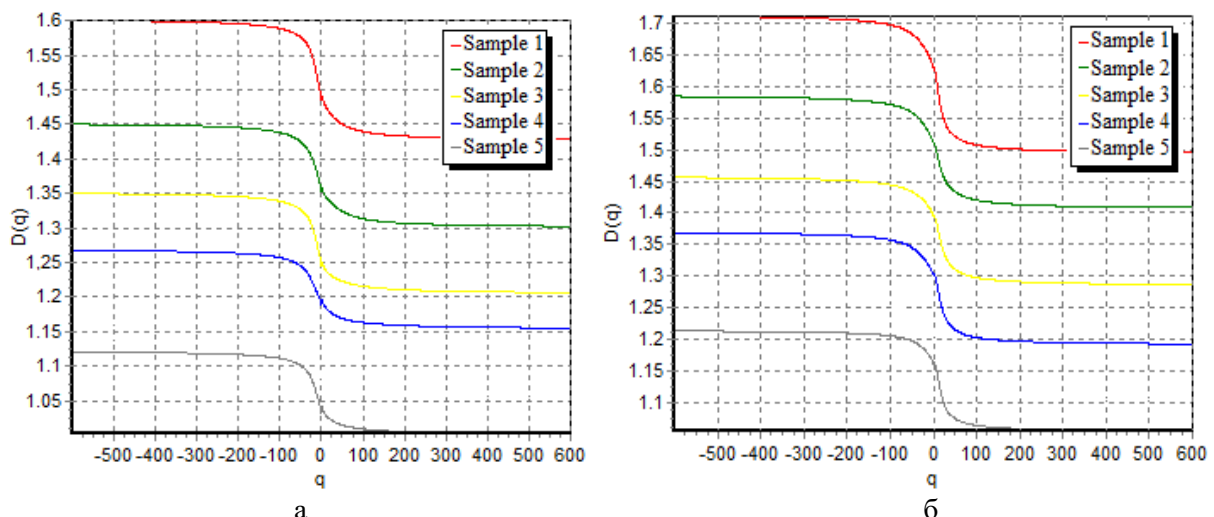
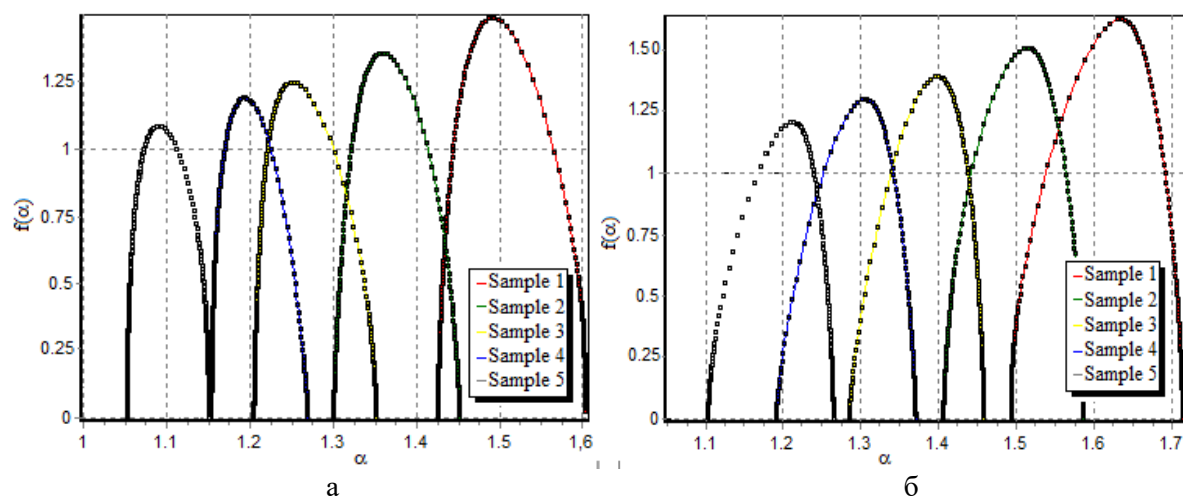


Рис. 6. Спектр статистичних розмірностей Реньї  $D(q)$  для бойка (а) та піки (б)

Рис. 7. Спектр сингулярностей  $f(\alpha)$  для бойка (а) та піки (б)

Розмірність  $D_{600}$  описує найбільш концентрований простір (темні ділянки структури) з переважанням цементиту. Це зумовлено тим, що сорбіт є евтектоїдною сумішшю цементиту та фериту. Пластини цементиту в сорбітній структурі, що розглядається, мають темний колір, а пластини фериту – світлий. Тому розмірність  $D_{600}$  відповідає світлим ділянкам структури (пластинам фериту).

Результати експерименту з визначення механічних властивостей деталей гідромолота (межа міцності  $\sigma_B$ , межа плинності  $\sigma_{0,2}$ , відносне видовження  $\delta$  та звуження  $\psi$ ) і спектра мультифрактальних характеристик його сорбітної структури за формулами (1) та (2) наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення характеристик однорідності, упорядкованості та регулярності сорбітної структури бойка та піки (осьовий напрямок вирізки зразків)

Деталь	Номер зразка	Механічні властивості				Мультифрактальні характеристики			
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$D_{600}$	$\Delta$	$K$	$D_0$
бойок	1	1390	1310	9,0	25	1,49	0,06	0,15	1,50
	2	1410	1320	8,0	23	1,35	0,05	0,15	1,36
	3	1400	1330	8,5	24	1,25	0,04	0,14	1,27
	4	1420	1345	7,5	23	1,20	0,05	0,12	1,21
	5	1430	1360	7,0	22	1,04	0,03	0,11	1,05
піка	1	1450	1360	8,0	15	1,50	0,08	0,21	1,64
	2	1440	1380	8,5	11	1,41	0,09	0,17	1,54
	3	1460	1370	7,0	8	1,29	0,12	0,18	1,42
	4	1470	1380	6,4	5	1,20	0,09	0,17	1,30
	5	1480	1390	6,0	3	1,05	0,06	0,16	1,17

На рис. 8 показані гістограми впливу мультифрактальних характеристик мікроструктури бойка та піки на механічні властивості металу.

Гістограми побудовані на підставі аналізу коефіцієнтів кореляції між мультифрактальними характеристиками й механічними властивостями металу.

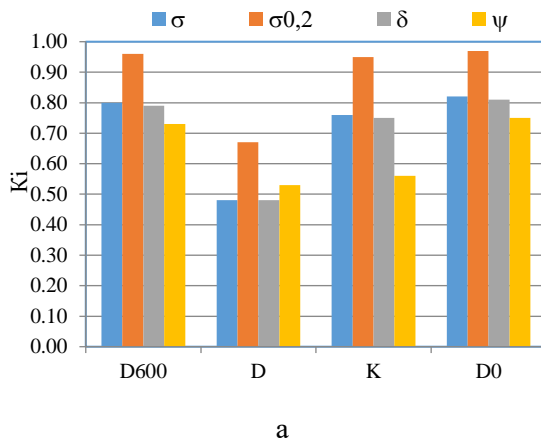
Аналіз мультифрактальних статистичних характеристик однорідності, упорядкованості та регулярності елементів структури показав, що висока до них чутливість спостерігається для межі плинності (рис. 8, а). Експериментально встановлено, що для бойка коефіцієн-

ти чутливості мультифрактальних характеристик структури  $K_i$  змінюються від 0,67 до 0,97.

Статистичні характеристики мікроструктури піки найбільш чутливі до відносного звуження (рис. 8, б). Коефіцієнти чутливості  $\psi$  до розмірності найсвітліших ділянок структури (пластин фериту) становлять 0,98, а для  $\delta$  показник  $K_i$  становить 0,85. Для  $\delta$  та  $\psi$  зафіксовано також відносно високі показники до їх фрактальної розмірності – по 0,97 відповідно. Такі результати пояснюються тим, що ферит має високі пластичні властивості порівняно з цементитом, що розгляда-

ється. Тому така чутливість пластичних властивостей  $\delta$  і  $\psi$  до мультифрактальних статистичних характеристик фериту закономірна. У цьому випадку для піки (рис. 8, б) чутливість між показником регулярності  $K = D_{-600} - D_{600}$  і межею плинності становить 0,92, оскільки цементит більш визначає властивості міцності порівняно з феритом.

Результати мультифрактального аналізу свідчать, що статистичні характеристики структури можуть бути індикатором зміни механічних властивостей.



На підставі аналізу результатів показників чутливості механічних властивостей до мультифрактальних статистичних характеристик структури (рис. 8) отримані фрактальні моделі для бойка (4) та піки (5).

$$\sigma_{0,2} = 1488,16 + 115,50 \cdot D_{600} + 32,57 \cdot \Delta - 460,62 \cdot K - 188,62 \cdot D_0, \quad R^2 = 0,88. \quad (4)$$

$$\psi = -29,17 - 33,03 \cdot D_{600} - 24,82 \cdot \Delta + 28,17 \cdot K + 54,72 \cdot D_0, \quad R^2 = 0,89. \quad (5)$$

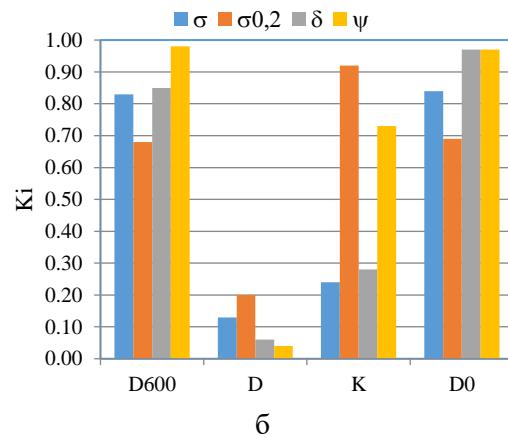


Рис. 8. Вплив показників однорідності  $D_{600}$ , упорядкованості  $\Delta$ , регулярності  $K$  та фрактальної розмірності  $D_0$  на властивості міцності та пластичності бойка (а) та піки (б)

Адекватність моделі (4) за статистикою *Durbin-Watson* становила 2,62, а для моделі (5) – 3,12. Це тестова статистика, що виявляє наявність автокореляції з першим рангом з урахуванням помилки передбачення регресійного аналізу (див. [22]).

Фрактальні моделі (4) і (5) описують комплексний вплив однорідності, упорядкованості, регулярності та фрактальної розмірності на механічні властивості  $\sigma_{0,2}$  та  $\psi$ .

Необхідно зазначити, що встановлено додаткові зв'язки між структурою та механічними властивостями відповідальних деталей гідромолота в процесі експлуатації після іонно-плазмового оброблення. Такий підхід дає змогу використання фрактальних моделей як неруйнівного методу оцінювання механічних властивостей відповідальних деталей гідромолота.

### Висновки

1. Досліджено вплив іонно-плазмового оброблення на характер пошкоджень покриттів гідромолота в процесі зношування його нижніх деталей (втулки, піки, бойка). Пошкодження деталей характеризується зношуванням покриття, наклепом металу, утворен-

ням борозен-задрівів і тріщин. У найбільш навантажених частинах деталей (у зонах *B* і *C* на корпусі бойка і втулці та *M* і *F* на бойку та піці) зміцнювальне покриття практично повністю зносилося. Удосконалена технологія іонно-плазмового хромовання забезпечує роботу зміцнених деталей без сколів і ви крошування покриття. Особливістю результатів випробувань цього варіанта зміцнення є менше зношування нижніх деталей (втулки, піки) порівняно з верхніми.

2. Застосовано мультифрактальний аналіз неоднорідної сорбітної структури для оцінювання механічних властивостей відповідальних деталей гідромолота (бойка та піки) після іонно-плазмового оброблення. Адекватність отриманих моделей (4) та (5) підтверджується статистикою *Durbin-Watson*. Установлено чутливість мультифрактальних характеристик цементиту до властивостей міцності  $\sigma$  (0,80) і  $\sigma_{0,2}$  (0,96), а також фериту до пластичних властивостей  $\delta$  та  $\psi$  (0,97), яка підтверджується гістограмами на рис. 8.

### Література

1. Сідашенко О.І., Лузан А.С. Дослідження зносостійкості відновлювальних покриттів системи

- Ni-Cr-B-Si, модифікованих механоактивованими СВС-матеріалами. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* Кропивницький: ЦНТУ, 2017. Вип. 47. Ч. 1. С. 221–229.
2. 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.
  3. 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.
  4. Paul C., Ganesh P., Mishra S. Investigating laser rapid manufacturing for Inconel-625 components. *Optics and Laser Technology*. 2007. № 39 (4). P. 800–805.
  5. Corrosion Resistance of Reinforced Layers of 15X11MФ Steel Steam Turbine Blades / D.B. Hlushkova et al. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2021. № 2 (132). P. 136–141.
  6. Effect of incomplete replacement of Cr for Cu in the deposited alloy of Fe–Cr–B–Ti alloying system with a medium boron content (0.5% wt.) on its corrosion resistance / B.O. Trembach et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2022. № 4 (44). P. 493–513.
  7. Thermal and ion treatment effect on nanoscale thin films scratch resistance / V. Yanchuk et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2022. № 10 (44). P. 1275–1292.
  8. Use of detonation sputtering to increase the durability of hydraulic hammer critical parts / D.B. Hlushkova et al. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2021. № 5 (135). P. 139–145.
  9. Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys / N.E. Kalinina et al. *Functional Materials*. 2019. № 3 (26). P. 514–518.
  10. Дослідження механічних властивостей і зносостійкості плазмових покриттів на основі інтерметаліду Fe-Al / А. П. Мурашов та ін. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. № 4. С. 91–96.
  11. Increasing the corrosion resistance of welded joints of heat-resistant nickel alloy with steel / V.I. Bolshakov et al. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2022. № 1 (137). P. 195–198.
  12. Volchuk V., Kroviakov S., Kryzhanovskiy V. Strength assessment of lightweight concrete considering metric variance of the structural elements. *Revista Română de Materiale / Romanian Journal of Materials*. 2022. № 2 (52). P. 185–193.
  13. Mandelbrot B.B., Evertsz C.J., Gutzwiller M.C. *Fractals and chaos: the Mandelbrot set and beyond*. New York: Springer, 2004. 308 p.
  14. ZrN fractal-graphene-based metamaterial absorber in the visible and near-IR regimes / M.A. Baqir et al. *Optik*. 2021. № 237. P. 166769.
  15. Nucleation and fractal growth of zirconium oxoalkoxy nanoparticles at the induction stage of sol-gel process / S. Tieng et al. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2012. № 1 (64). P. 145–148.
  16. Bolshakov V.I., Glushkova D.B., Voronova Ye.M. Investigation of peculiarities of piston rings laser berating. *Вісник ПДАБА*. 2015. № 11. С. 27–31.
  17. 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.
  18. Multifractal analysis of ITO thin films prepared by electron beam deposition method / D. Raoufi et al. *Applied Surface Science*. 2008. № 7 (254). P. 2168–2173.
  19. Rényi A. *Probability Theory*. Amsterdam: North-Holland, 1970. P. 301–367.
  20. Hausdorff F. Dimension und äusseres Mass. *Math. Ann.* 1919. № 79. P. 157–179.
  21. Bol'shakov V.I., Volchuk V.M. Materials science aspects of using of wavelet-multifractal approach to an evaluation of structure and properties of low-carbon low-alloyed steels. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2011. № 3 (33). P. 347–360.
  22. Durbin-Watson statistic. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Durbin%E2%80%933Watson\\_statistic](https://en.wikipedia.org/wiki/Durbin%E2%80%933Watson_statistic)

## References

1. Sidashenko, O.I., Luzan, S. (2017). Study of the wear resistance of restorative coatings of the Ni-Cr-B-Si system, modified with mechano-activated SVS-materials. *Design, production and operation of agricultural machines: general state. between science and technology coll.* Kropyvnytskyi, vol. 47, part 1, pp. 221–229.
2. 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), pp. 137–140.
3. 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), pp. 125–130.
4. Paul, C., Ganesh, P., Mishra, S. (2007). Investigating laser rapid manufacturing for Inconel-625 components. *Optics and Laser Technology*, no. 39 (4), pp. 800–805.
5. Hlushkova, D.B., Bahrov, V.A., Hrinchenko, O.D., Hnatiuk, A.A., Kalinina, N.E., Kalinin, V.T.



- (2021). Corrosion Resistance of Reinforced Layers of 15X11MФ Steel Steam Turbine Blades. *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 2 (132), pp. 136–141.
6. Trembach, B.O., Sukov, M.G., Vynar, V.A., Trembach, I.O., Subbotina, V.V., Rebrov, O.Yu., Rebrova, O.M., Zakiev, V.I. (2022). Effect of incomplete replacement of Cr for Cu in the deposited alloy of Fe–C–Cr–B–Ti alloying system with a medium boron content (0.5% wt.) on its corrosion resistance. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, no. 4 (44), pp. 493–513.
  7. Yanchuk, V., Kruhlov, I., Zakiev, V., Lozova, A., Trembach, B., Orlov, A., Voloshko, S. (2022). Thermal and ion treatment effect on nanoscale thin films scratch resistance. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, no. 10 (44), pp. 1275–1292.
  8. Hlushkova D.B., Kyrychenko I.H., Bahrov V.A., Kalinina N.Ye., Nosova T.V. (2021). Use of detonation sputtering to increase the durability of hydraulic hammer critical parts. *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 5 (135), pp. 139–145.
  9. 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*, no. 3 (26), pp. 514–518.
  10. Murashov, A.P., Vigilyanska, N.V., Gryshchenko, O.P., Yushchenko, A.O., Gorban, V.F. (2022). Study of mechanical properties and wear resistance of plasma coatings based on Fe–Al intermetalide. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, no. 4, pp. 91–96.
  11. Bolshakov, V.I., Kalinin, O.V., Kalinina, N.E., Hlushkova, D.B., Voronkov, O.I., Ryzhkov, Y.V., Stepanyuk, A.I. (2022). Increasing the corrosion resistance of welded joints of heat-resistant nickel alloy with steel. *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 1 (137), pp. 195–198.
  12. Volchuk, V., Kroviakov, S., Kryzhanovskiy, V. (2004). Strength assessment of lightweight concrete considering metric variance of the structural elements. *Revista Română de Materiale / Romanian Journal of Materials*, no. 2 (52), pp. 185–193.
  13. Mandelbrot, B.B., Evertsz, C.J., Gutzwiller, M.C. (2004). *Fractals and chaos: the Mandelbrot set and beyond*. New York: Springer, 2004, 308 p.
  14. Baqir, M.A. et al. (2021). ZrN fractal-graphene-based metamaterial absorber in the visible and near-IR regimes. *Optik*, 237, p. 166769.
  15. Tieng, S., Brinza, O. et al. (2012). Nucleation and fractal growth of zirconium oxo-alkoxy nanoparticles at the induction stage of sol-gel process. *Journal of solgel Science and Technology*, no.1 (64), pp. 145–148.
  16. Bolshakov, V.I., Glushkova, D.B. (2015). Investigation of peculiarities of piston rings laser berating. *Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture*, no. 11, pp. 27–31.
  17. 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), pp. 740–747.
  18. Raoufi, D., Fallah, H.R., Kiasatpour, A., Rozatian, A.S.H. (2008). Multifractal analysis of ITO thin films prepared by electron beam deposition method. *Applied Surface Science*, no. 7 (254), pp. 2168–2173.
  19. Rényi, A. (1970). *Probability Theory*. Amsterdam: North-Holland, pp. 301–367.
  20. Hausdorff, F. (1919). Dimension und äusseres Mass. *Math. Ann.*, no. 79, pp. 157–179.
  21. Bol'shakov, V.I., Volchuk, V.M. (2011). Materials science aspects of using of wavelet-multifractal approach to an evaluation of structure and properties of low-carbon low-alloyed steels. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, no. 3 (33), pp. 347–360.
  22. Durbin-Watson statistic. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Durbin%E2%80%93Watson\\_statistic](https://en.wikipedia.org/wiki/Durbin%E2%80%93Watson_statistic)
- Глушкова Діана Борисівна**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри технології металів та матеріалознавства, тел. 057-707-37-29, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна;
- Волчук Володимир Миколайович**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри матеріалознавства і обробки матеріалів, тел. +38 (056)-745-23-72, e-mail: [volchuky@gmail.com](mailto:volchuky@gmail.com), Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24 а, Дніпро, 49600, Україна;
- Сасенко Владислав Олександрович**<sup>1</sup>, інженер кафедри технології металів та матеріалознавства, тел. 057-707-37-29, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна;
- Єфименко Андрій Олександрович**<sup>1</sup>, молодший науковий співробітник кафедри технології металів та матеріалознавства, тел. 057-707-37-29, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

### Fractal study of the mechanical properties of hardened hydraulic hammer parts

**Abstract. Problem.** Intensive abrasive wear of hydraulic hammer parts during operation leads to a decrease in their residual life. Since the existing

methods of volumetric and surface strengthening of parts do not give a significant effect, the involvement of the ion-plasma chrome plating method has become relevant. **Methodology.** High-quality chrome coatings are obtained at a substrate temperature of at least 80–100°C. On the basis of experimental studies, the effect of ion-plasma chromium plating on the wear resistance and mechanical properties of hydraulic hammer parts was established, and structural changes in the material were also analyzed. The technology of ion-plasma chrome plating ensures the operation of hardened parts without chipping and crushing and increases their wear resistance by 1.75 times. Zones of structural transformations, characteristic of secondary hardening phenomena, are noted in the areas of damage to the parts. **Results.** Fractal theory, in particular, multifractal analysis using the Rényi equation, was used to analyze the non-homogeneous surface of hydraulic hammer parts (hammers, picks). The sorbitol structure of the bran and peaks was considered at  $\times 100$ . Models describing the relationship between mechanical properties and multifractal characteristics of the structure were obtained: homogeneity of  $D_{600}$ , orderliness (hidden periodicity  $\Delta = D_1 - D_{600}$ , regularity  $K = D_{-600} - D_{600}$ ). Adequacy of the models is confirmed by Durbin-Watson statistics at the level of 2.62 and 3.12. The sensitivity of the studied multifractal statistical char-

acteristics of cementite to the strength properties  $\sigma_B$  (0.80) and  $\sigma_{0.2}$  (0.96), as well as ferrite to plastic properties  $\delta$  (0.97) and  $\psi$  (0.97) was established. **Practical value.** The obtained results allow us to use this approach as an express method of non-destructive control when predicting the mechanical properties of the relevant parts of the hydraulic hammer after ion-plasma chrome plating.

**Key words :** mechanical properties, hydraulic hammer, multifractal, strengthening, model, ion-plasma chrome plating.

**Hlushkova Diana**<sup>1</sup>, 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](mailto:diana@khadi.kharkov.ua),

**Volchuk Volodymyr**<sup>2</sup>, Doct. Sc. (Tech.), Head of the Department of Materials Science and Materials Processing, Phone: +38 (056)-745-23-72, e-mail: [volchuky@gmail.com](mailto:volchuky@gmail.com),

**Saenko Vladislav**<sup>1</sup>, Engineer of the Department of Technology of Metals and Materials Science, Phone: 057-707-37-29, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua),

**Efimenko Andrey**<sup>1</sup>, Junior researcher of the Department of Technology of Metals and Materials Science, Phone: 057-707-37-29, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua)

---