

УДК 621.9

Ю.О. Мельничук, к.т.н.

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

## ЗАСТОСУВАННЯ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ОЦІНКИ СТРУКТУР ТВЕРДИХ СПЛАВІВ ТА ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ

*Розглянуто можливості застосування мультифрактальної параметризації для оцінки структур твердих сплавів, виготовлених за різними технологіями. Наведено зв'язок мультифрактальних характеристик структури твердих сплавів з працездатністю оснащених ними різальних інструментів.*

**Вступ.** Ефективність механічної обробки різних матеріалів багато в чому визначається властивостями і, відповідно, структурою матеріалу різального інструмента. При цьому актуальною науковою і прикладною задачею є розробка технологій виготовлення інструментальних композитів, що характеризуються високою зносо- і ударостійкістю при механічній обробці різних матеріалів.

Проте на сьогодні недостатньо вивченим є взаємозв'язок між параметрами мікроструктури, зерновим складом, мікробудовою міжфазних меж у твердих сплавах із працездатністю виготовлених з них різальних елементів. Тому необхідний подальший розвиток методів та методик, які дозволяють виявити особливості побудови матеріалів з гетерогенною структурою та мають гаму показників для їх опису.

Введення кількісних характеристик, які дозволяють розрізняти подібні одна до одної системи, наприклад, структури твердих сплавів, є основою експериментального методу в наукових дослідженнях.

**Основний матеріал.** Для чорнової обробки залізовуглецевих сплавів твердістю до 40 HRC при нерівномірному перетині зрізу та переривчастому різанні найбільш перспективними інструментальними матеріалами є вольфрамокобальтові (ВК) та титанотанталовольфрамокобальтові (ТТК) тверді сплави. Структура сплавів ВК у вихідному стані являє собою вільні та контактуючі зерна карбіду вольфраму, що знаходяться у зв'язці – твердому розчині вольфраму і вуглецю в кобальті. Сплави ТТК складаються, відповідно, із зерен карбіду вольфраму, твердого розчину TaC, NbC і WC в TiC та зв'язки. У твердих сплавах присутній також вільний вуглець, який є небажаною домішкою і повинен знаходитись у якнайменшій кількості. Наявність пор (особливо великих розмірів), графітових та інших включень призводить до зниження механічних та експлуатаційних властивостей твердих сплавів.

Руйнування твердих сплавів при різанні з великими ударними навантаженнями відбувається внаслідок утворення в контактних об'ємах матеріалу мікродфектів у вигляді мікротріщин, їх накопичення та розповсюдження. Про мікросколювання та виривання окремих мікрочастинок (груп карбідних зерен) і крихкий характер руйнування твердих сплавів при обробці за таких умов свідчить і шпильчастий вигляд зруйнованої частини задньої поверхні різальної частини різця зі сплаву ВК8 (рис. 1).

Утворення мікродфектів у твердих сплавах відбувається переважно по міжфазних границях зерен карбідів зі зв'язкою (WC–Co) та межах "карбід–карбід" (WC–WC) і свідчить про те, що вони є найбільш слабкою частиною у структурі твердих сплавів. Аналізуючи зношені частини інструмента, також необхідно зазначити, що в процесі переривчастого різання відбувається в'язке руйнування відносно великих прошарків м'якої кобальтової зв'язки, а потім поступове випадання виступаючих карбідних зерен.

У сплавах з відносно однорідною дрібнодисперсною структурою тріщини, розповсюджуючись по міжфазних границях і зв'язуючій фазі та огинаючи дрібні зерна, мають складну розвинуту форму, що гальмує процес їх росту та вимагає більших енергетичних витрат на розповсюдження макротріщин (рис. 2). Крім того, в таких сплавах утворюється значна кількість дрібних тріщин, що сприяє розсіюванню енергії руйнування.

При переривчастому різанні твердими сплавами зношування інструмента характеризується сколюванням відносно великих об'ємів різальної частини інструмента. У процесі різання з ударними навантаженнями відбувається злиття утворених мікротріщин з порами та іншими включеннями, поступове збільшення їх розміру та кількості з подальшим об'єднанням (злиттям) у макротріщину, після чого відбувається відокремлення частини матеріалу. На рис. 3 показано зображення ділянки передньої поверхні різальної пластини зі сплаву ВК8, наближеної до межі зносу, в якій у процесі переривчастого точіння сталі 40X (40 HRC) утворилася макротріщина на значній відстані від різальної кромки. Інтенсивність протікання такого процесу залежить від умов навантаження на інструмент, швидкості різання, твердості оброблюваного матеріалу та інших факторів.

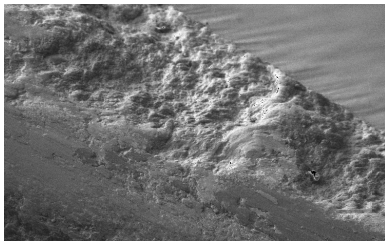


Рис. 1. Зношена ділянка задньої поверхні ( $\times 120$ ) інструмента з твердого сплаву BK8M

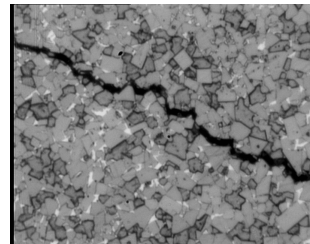
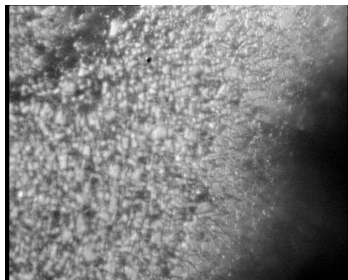
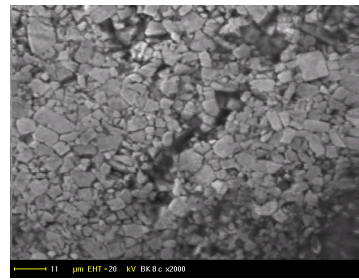


Рис. 2. Тріщина, що утворилась у сплаві TT7K12 при вколюванні пірамідою Віккерса



а)



б)

Рис. 3. Тріщини, що утворилися в стандартному сплаві BK8 після переривчастого точіння (а –  $\times 1250$ , б –  $\times 2000$ )

Традиційні методи параметризації структур матеріалів не враховують одну з найважливіших якостей систем – цілісність, що виражається в невизначеності властивостей системи із суми властивостей складових її елементів і навпаки [1]. На практиці переважно використовують низку параметрів, які характеризують не структуру в цілому, а окремі її елементи і не дозволяють виявити особливості формування конкретного сплаву на мікрорівні та характер розподілу дефектів у ньому.

Одним із перспективних напрямів у розв'язанні задачі кількісного опису структур матеріалів є їх параметризація, заснована на використанні теорії фракталів, що знаходить усе більше застосування в матеріалознавстві для дослідження складних явищ [2], [3], а саме для діагностики матеріалів при їх створенні та експлуатації.

Основою мультифрактального підходу до кількісного опису структур різної природи є побудова тим або іншим способом міри множини, що апроксимує досліджувану структуру. Мультифрактальні характеристики пов'язані з дослідженням розподілу фізичних або будь-яких інших величин на геометричному носії.

При вивченні мікробудови твердих сплавів і параметризації їх структури фрактальні параметри розраховувались за домірними зображеннями досліджуваних структур з використанням методики цифрової мультифрактальної параметризації [1], [4] і спеціальної комп'ютерної програми мультифракталодром (MFRDrom), розробленої Г.В. Встовським. Оброблені цією програмою зображення, за якими проводився розрахунок мультифрактальних параметрів, показують характер розподілу сукупності кобальтової фази, пор та включень – чорні фрагменти, контури яких відповідають формам міжфазних границь. Із збільшенням вмісту кобальту в твердих сплавах відповідно зростають кількість і розміри чорних фрагментів, зображення стають більш інформативними, а отримані результати коректними. Таким чином, програмно оброблені зображення являють собою структуру із частково виявленими міжфазними границями та несуть інформацію про характер розподілу кобальтових прошарків та дефектів структури (пор, включень та ін.).

З метою визначення більш конкретного змісту мультифрактальних параметрів при дослідженні структур твердих сплавів було проведено спеціальний експеримент. На оптичному мікроскопі AXIOVERT 200 MAT (Carl Zeiss) отримані зображення мікроструктур сплаву BK8M (рис. 4, а, б) і з використанням спеціальної програми отримано зображення границь зерен (рис. 4, в). Зображення на рис. 4, г відрізняється від аналогічного на рис. 4, в тільки збільшеними товщинами границь зерен; на рис. 4, г – збільшеними товщинами границь та наявністю невеликих пор; рис. 4, д – появою більших пор аналогічно.

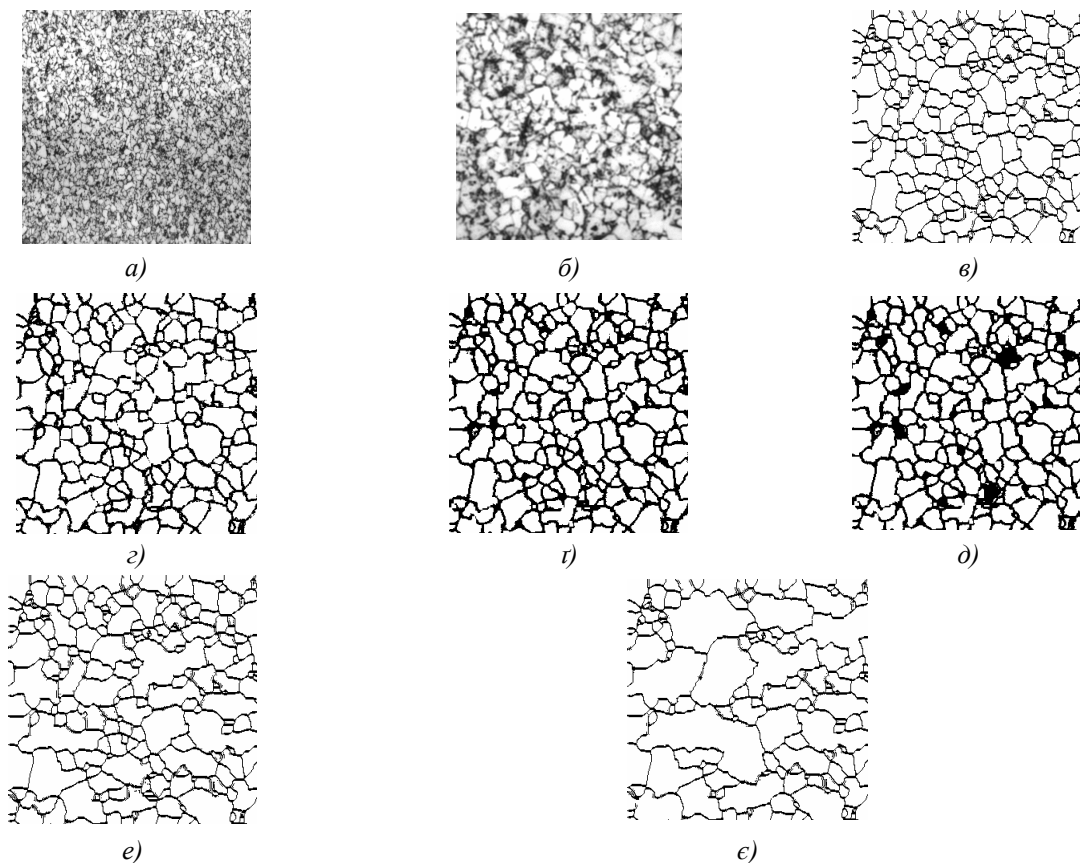


Рис. 4. Структура сплаву ВК8 з виявленими зернами:  
 а ( $\times 200$ ), б ( $\times 2000$ ) – вихідна структура; в-є – структура з виявленими границями;  
 з – структура зі збільшеними товщинами границь зерен; г, д – структура зі збільшеними товщинами  
 границь зерен та наявністю невеликих та більших пор відповідно;  
 е, є – крупнозернисті структури, отримані шляхом об'єднання дрібних зерен

На рис. 4, е, є – крупнозернисті структури, отримані шляхом об'єднання дрібних зерен на рис. 4, з. Аналізуючи дані, наведені в табл. 1, можна зробити певні висновки. Параметр упорядкованості  $\Delta_q$  характеризує ступінь "розгалуженості", звивистості границь зерен у цілому.

Таблиця 1

*Мультифрактальні параметри зернистих структур*

Мульти- фрактальні параметри	Зерниста структура					
	в	з	г	д	е	є
$\Delta_q$	0,397	0,371	0,334	0,347	0,396	0,397
$f_{40}$	7,984	5,493	5,400	4,195	7,969	7,292
$D_0$	1,284	1,420	1,519	1,543	1,286	1,265
$D_1/D_{40}$	0,776	0,803	0,826	0,834	0,777	0,775

Необхідно зазначити, що із "зростанням зернистості" (рис. 4, в, е, є) параметр  $\Delta_q$  змінюється відносно слабо у зв'язку з тим, що не змінюється конфігурація границь зерен. Параметр однорідності  $f_{40}$  характеризує однорідність розмірів (товщини) границь зерен та дефектів по розміру (в даному випадку однорідність товщини кобальтового шару і розмір пор), фрактальна розмірність  $D_0$  – загальну кількість дефектів у структурі. Зі збільшенням пористості величини  $D_0$  суттєво зростають, а  $f_{40}$  – навпаки. При збільшенні дефектності структури відзначається зменшення значення відношення  $D_{40}/D_1$  (або збільшення  $D_1/D_{40}$  – при розрахунках за псевдоспектрами) – фрактальної міри адаптивності структури до зовнішнього впливу.

Залежно від умов виготовлення тверді сплави одного хімічного складу можуть мати різну структуру. Для оптимізації технології спікання при створенні нових твердих сплавів з певними властивостями необхідно встановлення взаємозв'язку між параметрами, що інтегрально описують їх структуру, і експлуатаційними характеристиками. На рис. 5 представлено отримані на електронному скануючому мікроскопі «CamScan-4DV» структури зразків твердих сплавів ВК8М, виготовлених з однієї вихідної сировини за п'ятьма різними технологіями.

Відмінність цих структур свідчить про вплив багатьох факторів на структурний стан твердих сплавів: середовища спікання (водень, вакуум), температури та часу спікання, проведення термокомпресійної обробки, наявності тиску при спіканні (компресійне спікання), швидкості охолодження та ін.

Результати рентгеноструктурного аналізу (рис. 6) нетравлених поверхонь зразків не дозволили виявити суттєві відмінності між експериментальними сплавами. Зразки досліджувались у монохроматизованому  $K_{\beta}$  випромінюванні рентгенівської трубки із залізним анодом на автоматизованому рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3 з використанням графітного монохроматора первинного променя.

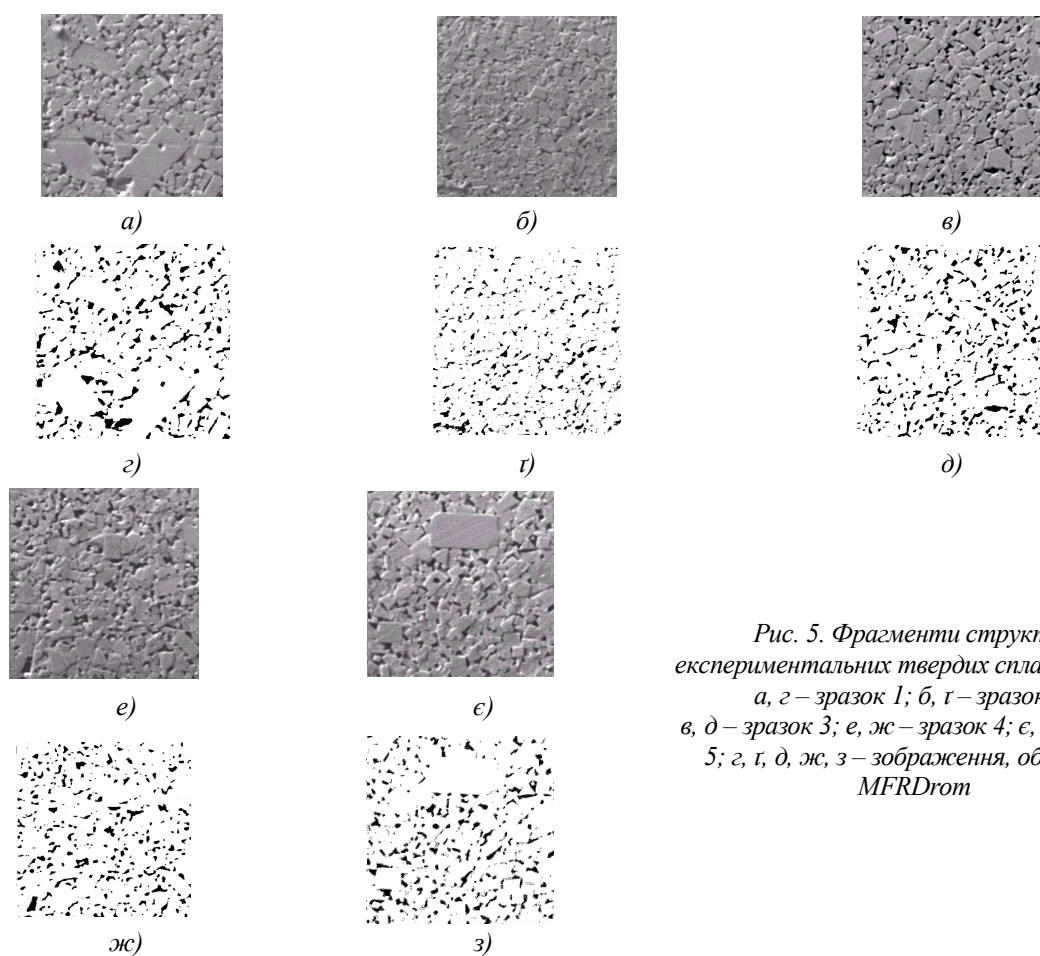


Рис. 5. Фрагменти структур експериментальних твердих сплавів ВК8М: а, г – зразок 1; б, г – зразок 2; в, д – зразок 3; е, ж – зразок 4; е, з – зразок 5; г, г, д, ж, з – зображення, оброблені MFRDrom

Зміна мультифрактальних характеристик (зниження ступеня однорідності  $f_{40}$  і впорядкованості  $\Delta_{40}$ , пов'язана зі зменшенням щільності досліджуваних структур, зниженням "розгалуженості" границь зерен і зменшенням разорієнтування. Вище було встановлено, що параметр упорядкованості  $\Delta_{40}$  характеризує ступінь "розгалуженості" границь зерен у цілому, параметр  $f_{40}$  – однорідність дефектів за розміром (у даному випадку однорідність товщини кобальтового прошарку і розмір пор), фрактальна розмірність  $D_0$  – загальну кількість дефектів у структурі.

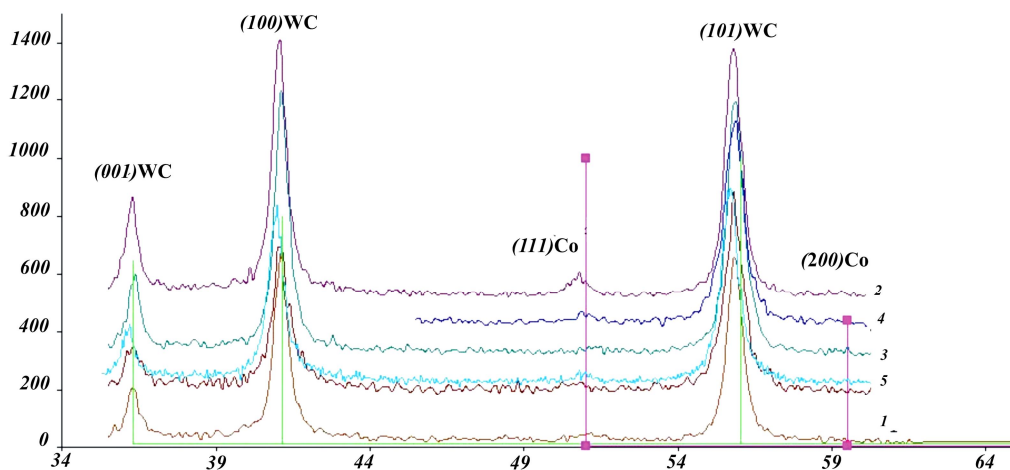


Рис. 6. Дифрактограми зразків твердих сплавів ВК8М:  
 1 – зразок 1; 2 – зразок 2; 3 – зразок 3; 4 – зразок 4;  
 5 – зразок 5

Для визначення швидкості зношування твердих сплавів у процесі переривчастого різання проводилась обробка (повздовжнє точіння) заготовки з термообробленої сталі ХВГ (55 HRC) з трьома рівномірно розташованими по колу пазами, внаслідок чого різальний інструмент постійно виходив та входив у контакт з оброблюваним матеріалом та піддавався ударним навантаженням високої інтенсивності з визначеною постійною частотою.

Досліджувані зразки механічним способом закріплювались у спеціальній державці, а при встановленні на верстат забезпечувались такі геометричні параметри інструмента:  $\gamma = -5^\circ$ ,  $\alpha = 5^\circ$ ,  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ . Обробка проводилась на таких режимах різання:  $v = 0,66$  м/с,  $S = 0,14$  мм/об.,  $t = 0,25$  мм. Значення швидкостей зношування зразків наведено в табл. 2.

Аналіз отриманих даних свідчить про те, що зі збільшенням значень фрактальних параметрів однорідності ( $f_{40}$ ) і впорядкованості ( $\Delta_{40}$ ) структури і зменшенням значень фрактальної розмірності  $D_0$  збільшується зносостійкість твердих сплавів при точінні з ударними навантаженнями. Між швидкістю зношування інструменту ( $i$ ) і параметрами структури твердого сплаву встановлені такі залежності:

$$i = 0,1D_0^{5,3}, \tag{1}$$

$$i = 1,24D_0 - 1,22, \tag{2}$$

$$i = 1,82 - 0,35f_{40}, \tag{3}$$

$$i = 1,26 - 1,9\Delta_{40} \tag{4}$$

з коефіцієнтами кореляції відповідно 0,84, 0,74, 0,73 (рис. 7). Найбільш працездатним є зразок 2, структура якого характеризується найвищими параметрами  $f_{40}$  (4,612) і  $\Delta_{40}$  (0,551) та найбільш низьким  $D_0$  (1,12).

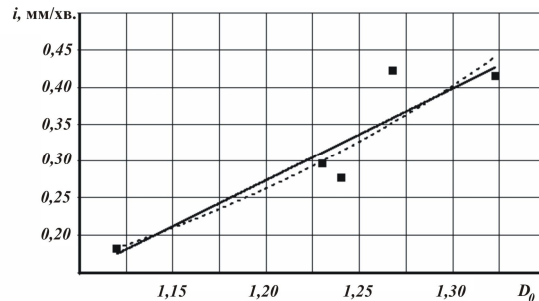
На дифрактограмі зразка 2 (рис. 6) спостерігається незначний, але чіткий пік кобальтової фази, на відміну від інших сплавів, де рефлексів від кобальтової фази не зафіксовано. Це, ймовірно, пов'язано з тим, що при спіканні даних сплавів зв'язуюча фаза насичується дисперсними карбідами, що значно підвищує її міцність, а також утворюється значна кількість  $\eta$ -фази, яка являє собою складний карбід кобальту і вольфраму ((W,Co)<sub>6</sub>C). При спіканні зразка 2 ці процеси протікають менш інтенсивно, зв'язуюча фаза є більш пластичною, що сприяє підвищенню опору зносу при ударному різанні.

Таблиця 2

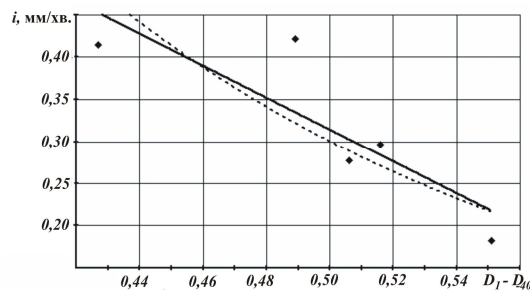
Мультифрактальні параметри структур твердих сплавів ВК8М, спечених за різними технологіями, та швидкість зношування оснащених ними інструментів при точінні сталі ХВГ (55 HRC)

Мультифрактальні параметри	№ зразка				
	1	2	3	4	5
$\Delta_{40}$	0,489	0,551	0,506	0,516	0,427
$f_{40}$	4,091	4,612	4,582	4,185	4,160

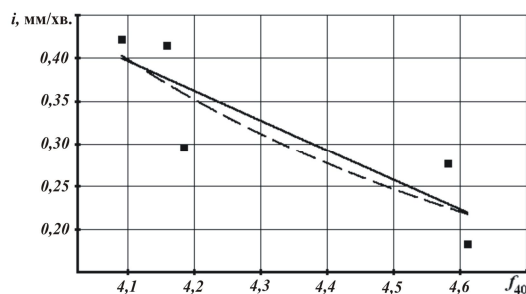
$D_0$	1,268	1,120	1,240	1,230	1,323
$D_1$	1,423	1,361	1,396	1,412	1,500
$D_{40}$	1,912	1,912	1,902	1,928	1,927
$D_1/D_{40}$	0,744	0,712	0,734	0,732	0,781
Швидкість зношування $i$ , мкм/хв.	0,422	0,182	0,277	0,296	0,415



а)



б)



в)

Рис. 7. Залежність швидкості зношування інструментів з твердого сплаву ВК8М при обробці сталі ХВГ (55 HRC) від: а – фрактальної розмірності  $D_0$  структури сплаву (—  $i = 1,24D_0 - 1,22$ ; ----  $i = 0,1D_0^{5,3}$ ); б – упорядкованості  $\Delta_{40}$  структури сплаву (—  $i = 1,26 - 1,9\Delta_{40}$ ; ----  $i = 0,0119\Delta_{40}$ ); в – однорідності  $f_{40}$  структури сплаву (—  $i = 1,82 - 0,35f_{40}$ ; ----  $i = 577,329f_{40}^{-5,158}$ )

Сплави з відносно низькими значеннями  $f_{40}$  (4,2) і  $\Delta_{40}$  (0,43) та високими  $D_0$  (1,3) (зразки 1, 5) характеризуються вкрай низькою зносостійкістю.

Установлені залежності вказують на те, що для підвищення стійкості інструмента в умовах різання з ударами необхідно створювати сплави зі структурою, що характеризується максимально високими по модулю значеннями фрактальних параметрів однорідності та впорядкованості структури і мінімальними значеннями  $D_0$ .

**Висновки.** Проведені дослідження показали, що поряд із традиційними методами дослідження структур твердих сплавів значний науковий і практичний інтерес представляє використання нових матеріалознавчих методологій, зокрема мультифрактальної параметризації. Використаний підхід дозволив на кількісному рівні комплексно оцінити структуру матеріалів, провести їх порівняльну оцінку за фрактальними характеристиками і прогнозувати зносостійкість інструмента при лезовій обробці з ударними навантаженнями.

## ЛІТЕРАТУРА:

1. *Встовский Г.В.* Описание эволюции структуры поверхности металла при механической обработке с использованием мультифрактального анализа / *Г.В. Встовский, А.Г. Колмаков, В.Ф. Терентьев* // *Материаловедение*. – 1998. – № 2. – С. 19–24.
2. *Иванова В.С.* Синергетика и фракталы в материаловедении / *В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев*. – М. : Наука, 1994. – 384 с.
3. *Большаков В.И.* Фракталы в материаловедении : учебник / *В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров*. – Днепропетровск, 2005. – 253 с.
4. *Встовский Г.В.* Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов / *Г.В. Встовский, А.Г. Колмаков, И.Ж. Бунин*. – Ижевск : Науч.-изд. центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – С. 116 с.

МЕЛЬНИЧУК Юрій Олексійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- інструмент з надтвердих матеріалів.

Подано 17.01.2010