

УДК 622. 23: 05459

Калганков Є.В., аспірант
(ІГТМ НАН України)**ОСОБЛИВОСТІ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ПОВЕРХНІ
РУЙНУВАННЯ ГУМОВИХ ФУТЕРІВОК, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В
УМОВАХ АБРАЗІВНО-ВТОМНОГО ЗНОСУ*****Калганков Е.В.,** аспірант
(ІГТМ НАН Украины)**ОСОБЕННОСТИ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТИ
РАЗРУШЕНИЯ РЕЗИНОВЫХ ФУТЕРОВОК, КОТОРЫЕ
РАБОТАЮТ В УСЛОВИЯХ АБРАЗІВНО-УСТАЛОСТНОГО
ИЗНОСА****Kalgankov Ye.V.,** Ph. D. Student
(IGTM NAS of Ukraine)**FEATURES OF FRACTAL ANALYSIS OF FRACTURED
SURFACES OF THE RUBBER LINERS, WHICH WORK IN
CONDITIONS OF ABRASIVE AND FATIGUE WEAR**

Анотація. Наводяться результати досліджень локальності утворення подряпин на поверхні гумових футерівок, що працюють в умовах абразивно-втомного зносу та дії на поверхневий шар агресивного середовища у вигляді підвищеної температури та хімічно активних речовин. Зразки гуми були отримані в процесі ревізійного огляду барабанного млина і досліджувались на оптичному мікроскопі. В результаті проведених досліджень встановлено стохастичний процес появи та самоподібність подряпин поверхневого шару футерівки, утворених в наслідок дії навантаження барабанного млина.

Розглянуто методику та проведено визначення фрактальної розмірності масивних гумових деталей, що працюють в умовах абразивно-втомного зносу за результатами якого встановлено величину фрактальної розмірності гумової футерівки яка становить 1,8125. Наведено залежності її зміни за час експлуатації, а також доведено збільшення фрактальної розмірності зі збільшенням часу експлуатації футерівки, тобто наявності збільшених подряпин та каверн, які виникають внаслідок втомного руйнування (деструкції) поверхневого шару футерівки. Встановлено залежність між фрактальною розмірністю поверхні гумової футерівки та коефіцієнтом Пуассона.

Використання методу фрактального аналізу поверхонь руйнування дозволяють отримати узагальнені співвідношення між механічними характеристиками гуми та параметрами її структури. Також в статті встановлено взаємозв'язок між фрактальною розмірністю та напрацюванням гумової футерівки.

Ключові слова: Футерівка, знос, фрактал, фрактальна розмірність, абразивно-втомний знос, деструкція, самоподібність

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. Гума знайшла широке застосування в різних галузях народного господарства. В більшості випадків вона використовується як захисний матеріал у вигляді гумових деталей: матів, прокладок, ущільнень, футерівок та інше. Але в процесі роботи вона сприймає різні навантаження від подряпання абразивними частинами до ударних навантажень та значної температурної і хімічної дії. Особливо чітко це проявляється на млинах першої стадії подрібнення де використовується гумова

* © Калганков Є.В., 2017

Стаття посвячена 50-літтю со дня основания Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

футерівка, а в якості подрібнюючи тіл кулі діаметром 100 мм [1]. В результаті цього гума втрачає свої фізико-механічні властивості і в певний момент перестає виконувати свої функції [1].

Процес втрати роботоздатності футерівки досить складно описати без введення якихось додаткових коефіцієнтів та припущень. Як правило процес зносу чи руйнування розглядається на макрорівні або на мікрорівні, а отримати залежності між механічними характеристиками гуми та параметрами її структури майже неможливо. Також зрозуміло, що для вивчення процесу руйнування реальної поверхні в реальних не ідеалізованих умовах, поведінки дефектів на макрорівні – недостатньо. Треба розглядати вплив на руйнування поверхні і структурних перетворень матеріалу.

Процес руйнування поверхні гумової футерівки носить хаотичну та ймовірнісну природу подряпання з наступним руйнуванням поверхні гумової футерівки. Але враховуючи повторюваність цих дій можна стверджувати, що процес накопичення пошкоджень – автомодельний. Тому для аналізу таких поверхонь доцільно застосовувати теорію множин дрібної розмірності – фрактальності [2]. Також введення фрактального аналізу поверхонь руйнування може вирішити проблему зв'язків між механікою руйнування та структурою.

Аналіз досліджень та публікацій. Дослідженню процесів зносу та руйнування гумових деталей присвячено багато робіт відомих вчених. Таких як Шалламах, Мур, Палмгрен, І.В. Крагельський, В.Г. Копченков, Н.С. Пенкін, А.Г. Дербас, В.І. Дирда, Є.Ф. Чижик та інші. Але в більшості робіт проводились дослідження зносу поверхні в класичному його прояві тобто зносу поверхні внаслідок занурення інерідного тіла та викиду часток основного матеріалу. Питання фрактального аналізу досить добре розглянуті для металів, кераміки, природніх об'єктів, гірничих порід, навіть котирування фінансових ринків розглядаються та прогнозуються фрактальним аналізом, а для високо дисипативних матеріалів таких як гума приділено дуже мало уваги.

В роботі [2] розглянуто загальні моделі формування та накопичення пошкоджень еластомерних матеріалів при тривалому циклічному навантаженні. Започатковано теорію виникнення та росту тріщини в гумі.

Дослідженню природи руйнування еластомерних матеріалів присвячено роботи [2, 3] в яких розглядається процес накопичення пошкоджень у вигляді мікротріщин, які з часом розростаються та повторюються. Автор розглядає формування тріщини та визначення її фрактальної розмірності для конкретних випадків руйнування при тривалому циклічному деформуванні. Та доведення, що матеріал в зоні руйнування володіє нелінійними властивостями. Також автором увага приділяється саме виникненню тріщини внаслідок тривалих циклічних навантажень.

Питанням фрактального аналізу внаслідок циклічних ударних навантажень (удар кулі по футерівці в барабанному млині) та накопиченню втомних процесів матеріалу внаслідок постійних занурень іншорідних тіл та подряпання ними поверхонь (абразивний знос) розглянуті на загальному рівні і їх явно недостатньо для формування висновків про природу руйнування матеріалу, а тим паче прогнозування його ресурсу за даними фрактального аналізу.

Тому подальші дослідження в області фрактального аналізу поверхонь руйнування еластомірних матеріалів є актуальною і потребує подальшого розгляду.

Метою роботи є дослідження взаємозв'язків між пошкодженнями еластомерних матеріалів та їх структурними змінами за рахунок фрактального аналізу поверхонь руйнування.

Розглянемо одну з важливих сторін механіки руйнування, фрактальний аналіз поверхні руйнування масивних гумових зразків при їхньому тривалому циклічному навантаженні. Використання фрактального трактування руйнування тут цілком доречно по наступних причинах. Для гум при циклічному навантаженні поверхня макротріщин (подряпин внаслідок абразивного зносу) має нерегулярну структуру з наявністю різного роду нерівностей. Важливою особливістю такої поверхні є статистична самоподібність рельєфу поверхні; при цьому властивість самоподібності зберігається на макро-, мезо- і мікрорівнях. Усе це дозволяє моделювати таку нерегулярну структуру фрактальними поверхнями [2].

Численні спостереження за процесом зносу гумових футерівок вказало на те, що процес руйнування починається з утворення подряпин (мікротріщин), каверн різного розміру, які володіють властивістю самоподоби з наступним переростанням їх у більш крупні бороздки як з виділенням частини матеріалу так і без (поріз). Тобто процес руйнування футерівки можна розглядати як процес множинного мікроруйнування у якого змінюються лише розмірні параметри, а безрозмірні характеристики мікродефектів залишаються без змін.

Таким чином, у процесі руйнування каскад мікродефектів росте як самоподібний кластер. Спостережуваний у гумі в реальних умовах фрактальний кластер відображує динаміку процесу руйнування, створений за випадковим законом і на перший погляд має зовсім неупорядковану структуру. Проте дослідження показують, що кластер має сувору ієрархію структури й має внутрішній порядок, що є дробовою розмірністю Хаусдорфа-Безіковича або фрактальною розмірністю кластера.

Як відомо фрактальна розмірність поверхні ухвалюється рівною $D + 1$, де D – фрактальна розмірність профілю. При цьому якщо фрактальна розмірність окремого полімерного ланцюга $df = 2$, то розмірність полімеру може мати й дробове значення, що лежить у межах $2 < df < 3$.

За аналогією із класичною теорією пружності був запропонований варіант теорії пружності фракталів; в основі його лежать два експериментально встановлені закони: закон Гука, який стверджує пропорційність відносної деформації ε твердого тіла діючому напруженню, і закон Пуассона, згідно з яким існує ефект поперечних деформацій $\varepsilon_{\perp} = \nu \cdot \varepsilon_{\parallel}$ при відсутності відповідних напружень (ν – коефіцієнт Пуассона).

У цьому випадку слушні два твердження.

По-перше, пружна деформація фрактала під дією зовнішньої сили F , віднесеної до одиничного перетину, призводить до появи одиниці нового характерного масштабу довжини L_F .

$$F = \frac{\partial u}{\partial L_F} - T \frac{\partial S}{\partial L_F},$$

де перший член обумовлений енергетичною складовою пружності фрактала, а другий – ентропійною (u – енергія, S – ентропія, T – температура).

По-друге, при пружній деформації фракталу самоподібність структурних змін (розвиток каскаду ушкоджень) зберігається, тобто $d_f = \text{const}$.

Таким чином, коефіцієнт поперечної деформації фракталу однозначно визначається його розмірністю d_f і розмірністю огинаючого його простору d . При $d = 3$

$$\nu = \frac{d_f}{d-1} - 1, \quad d_f = (d-1) \cdot (1 + \nu).$$

На основі цих припущень були отримані вирази, що зв'язують параметри пружності твердого тіла.

$$G = \frac{d-1}{2 \cdot d_f} \cdot E, \quad B = \frac{E}{d \cdot (d - d_f)},$$

де G , E , B – відповідно модулі зсуву, пружності й об'ємної пружності.

При $d = 3$

$$G = E/d_f.$$

Як відомо, реальна поверхня руйнування гум має шорсткувату, нерегулярну структуру, що відображає динаміку процесу руйнування. При цьому незважаючи на уявну хаотичність, поверхня руйнування гуми має властивості самоподібності на мікро- і макрорівнях. Якщо площу S такої самоподібної (автомодельної) поверхні покрити квадратами зі стороною R , то вона буде пропорційна

$$S = (R/R_0)^{d_f-2},$$

де d_f – фрактальна розмірність Хаусдорфа-Безіковича.

Для гладких поверхонь руйнування (у гумі вони при циклічному руйнуванні не спостерігаються) $d_f = d - 1$ та при $d = 3$ (евклідовий простір) $d_f = 2$.

Як відзначалося вище, методи фрактального аналізу дозволяють одержати узагальнені співвідношення між механічними характеристиками гуми й параметрами її структури. Випробовувані гумові зразки мали евклідову розмірність $d = 3$; їх фрактальна розмірність змінювалася в межах $2 \leq d_f \leq 3$. Установлено, що саме дробова частина d_f відображає відхилення структури реального тіла від класичного евклідова тіла, а величина фрактальної розмірності поверхні руйнування d_p показує відмінність реальної поверхні руйнування ($d_p > 2$) від ідеалізованої лінійної. Якщо в лінійній механіці руйнування розмірність площини прийнята $d_p = 2$, то в реальних поверхнях руйнування завжди $d_p > 2$.

Для композитних матеріалів із квазів'язким руйнуванням отримано вираз, що зв'язує фрактальну розмірність із коефіцієнтом Пуассона [4].

$$d_p = \frac{2 \cdot (1 + 4 \cdot \nu)}{1 + 2 \cdot \nu}.$$

При $\nu = 0,5$ величина $d_p = 2$ відповідає гладкій поверхні (лінійний процес руйнування).

Коефіцієнт Пуассона може бути визначений при випробуванні зразків на об'ємний стиск. У цьому випадку можна використовувати вираз виду [2].

$$\frac{\sigma_e}{A} = \frac{1 - 2 \cdot \nu}{6 \cdot (1 + \nu)},$$

де σ_e – межа змушеної еластичності.

Для фрактального аналізу поверхні руйнування скористаємося експериментальним прийомом Б. Мандельброта. Мандельброт досліджував поверхню розламу металів; на його думку, така поверхня руйнування є поверхнею з локальною фрактальною розмірністю, вона має самоподобу й для неї можна використовувати співвідношення периметра й площі у вигляді

$$L(\delta) \sim [S(\delta)]^{\frac{d_p}{2}},$$

або

$$d_p = \frac{2 \cdot \lg L(\delta)}{\lg S(\delta)},$$

де $d_p = d - 1$ (тут, як і вище, d_p – фрактальна розмірність поверхні руйнування); L – довжина «берегової лінії» шорсткої або світлої зони на фрактограмі; S – площа цих зон; δ – крок виміру або так званий «еталон».

Сьогодні існує багато комп'ютерних програм за допомогою яких можливе швидке та якісне оцінювання фрактальної розмірності поверхні руйнування, а також провести аналіз процесу руйнування.

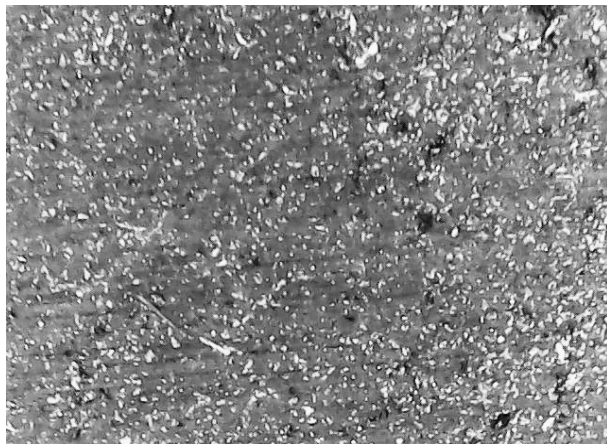
Так, нами були досліджені фрактограми реальних поверхонь гумової футерівки на різних етапах її експлуатації, тобто під час зупинки млина на профілактику. Досліджувались футерівки першої стадії подрібнення залізної руди ПівнГЗК м. Кривий Ріг.

На ПівнГЗК випробування проводились на млині МШР 3,6×4,0 з кулями Ø100 мм, тип футерівки «Плита-Н хвиля» висотою 270 мм та 240 мм, крупність куска в живильнику – до 25 мм, робоча температура в середовищі млина 65...80 °С.

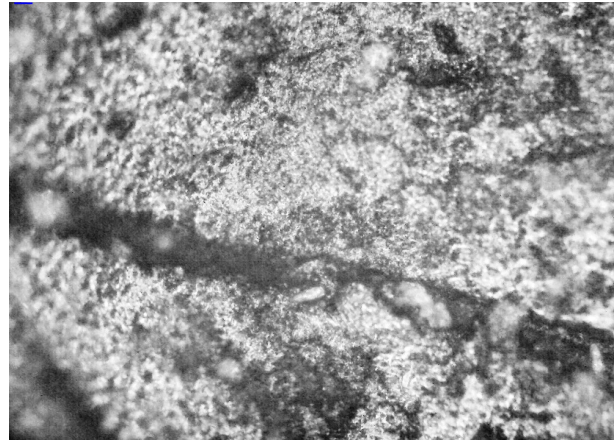
Були спеціально підготовлені зразки для лабораторних випробувань які отримані шляхом вирізання спредером під час огляду млина. Для прикладу наведено оптичне зображення (фрактограми) поверхні нової гуми та гуми після напруження 7560 год (рис. 1).

Як видно з фото, поверхня нової гумової футерівки рівна без явних пошкоджень, лише має незначні подряпини та точкові каверни які утворились під час виготовлення футерівки, фрагмент футерівки після напруження 7560 годин

суттєво відрізняється і має глибокі каверни які утворені вирином шматків гуми, а також глибокі подряпини, що утворюють певний рельєф поверхні.



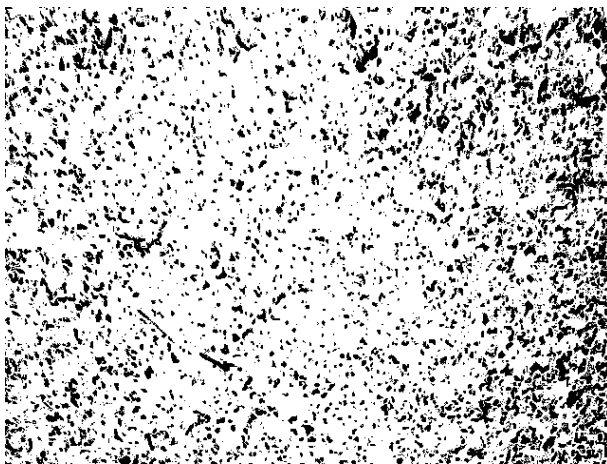
а – нова гума



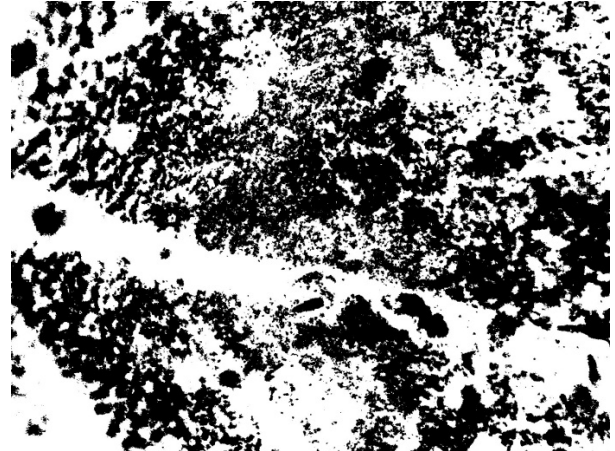
б – напрацювання 7560 годин

Рисунок 1 – Оптичне зображення поверхонь при 200-кратному збільшенні

Для зменшення похибки, при випробуваннях опрацьовувалось не менше дев'яти зразків кожного періоду напрацювання, а також оброблялось по дев'ять фрактограм кожного зразка. Але фрактограми виконані в 3-х мірному просторі, а опрацювання та підрахунок фрактальної розмірності виконується в двовимірному просторі, тому фрактограми були опрацьовані за допомогою програмного комплексу ImageJ і переведені в бінарну систему (рис. 2).



а – нова гума

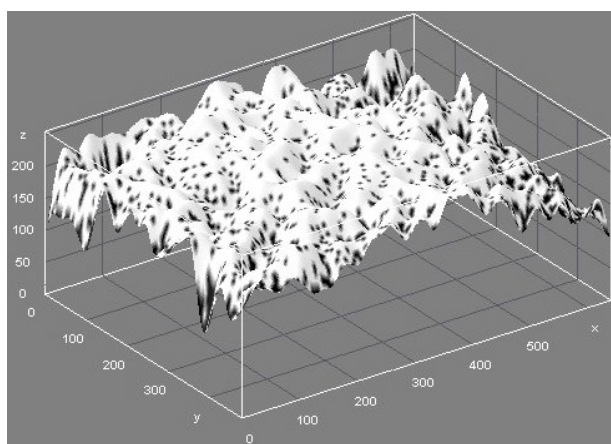


б – напрацювання 7560 годин

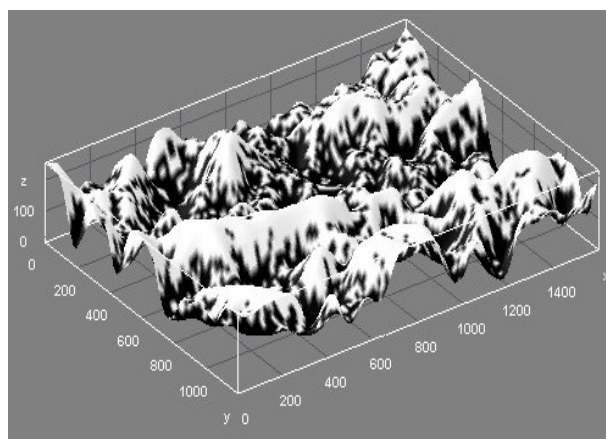
Рисунок 2 – Двовірні зображення поверхонь гумової футерівки

Також на рис. 3 наведено тривимірне зображення поверхонь.

За результатами розрахунку фрактальної розмірності було встановлено її збільшення при збільшенні напрацювання, так для нового зразка фрактальна розмірність становила 2,6681, а для зразка, що відпрацював 7560 годин на ПівнГЗК – 2,8125. Робота футерівки при екстремальних умовах (температура 85...110 °C) характеризується наступним: поверхня футерівки швидко деструктує і руйнується, про що свідчать зображення на рис. 4. При цьому футерівка відпрацювала майже 3000 годин, мала критичний стан і після проведеної ревізії була знята з млина.



а – нова гума

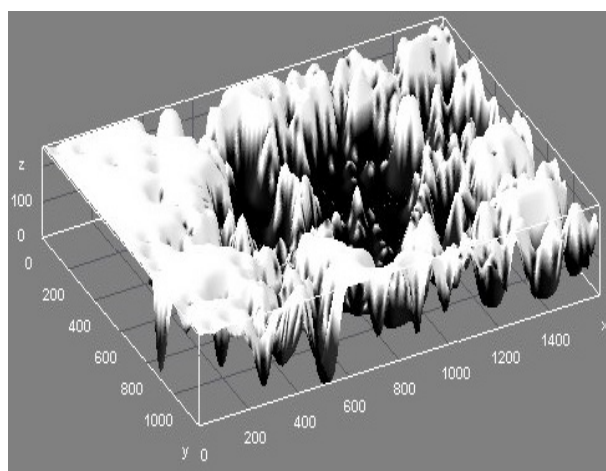


б – напрацювання 7560 годин

Рисунок 3 – Тривимірне зображення поверхонь гумової футерівки



а – двовимірне зображення



б – тривимірне зображення

Рисунок 4 – Зображення поверхонь футерівки, що працювала в екстремальних умовах

Графічне зображення залежності зміни фрактальної розмірності поверхонь гумових футерівок від напрацювання наведено на рис. 5.

Аналізуючи графіки, можна зробити наступні висновки. Фрактальна розмірність залежить від умов роботи і відповідно від характеру пошкоджень поверхневого шару, також спостерігається чітка залежність фрактальної розмірності від фізико механічних властивостей гуми які в процесі роботи змінюються (відбувається старіння гуми), так криву умовно можна розбити на три зони.

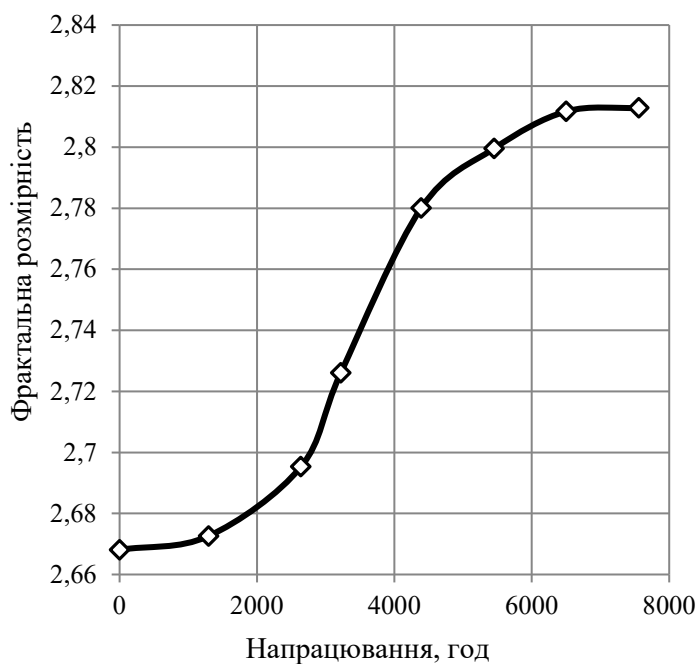


Рисунок 5 – Залежність зміни фрактальною розмірності від напрацювання гумової футерівки

Перша зона напрацювання від 0 до 2640 годин, зона в якій фрактальна розмірність суттєво не змінюється; це пояснюється високо дисипативними властивостями гуми і її здатністю поглинати енергію від ударів шарів та роздираючо-вириваючої дії завантаження і опиратися їм.

Друга зона від 2640 до 4392 години, зона в якій гума накопичила енергію, її дисипативні функції зменшуються і поверхневі шари починають деструктувати внаслідок чого, вириви та роздири збільшуються, в цій зоні спостерігається різке збільшення фрактальної розмірності.

Третя зона, в якій уповільнюється ріст фрактальної розмірності, внаслідок зменшення товщини футеровочної плити і старіння гуми, тобто різкого зниження коефіцієнта дисипації, внаслідок чого відбувається виривання більш крупних шматків поверхневого шару, в цій зоні переважаючим є втомний знос.

Сьогодні важко охарактеризувати фрактальною розмірністю складний процес руйнування матеріалів, особливо еластомерних. Накопичено поки, що дуже мало інформації для будь-яких узагальнюючих інтерпретацій. Значення та зміна фрактальної розмірності відображає процес старіння гуми та її абразивно-втомного руйнування, на конкретному прикладі та в конкретних умовах. Досліджена закономірність безперечно потребує подальшого дослідження та уточнення.

Висновки. Фрактальний аналіз поверхні руйнування гумових футерівок барабанних млинів, являється ефективним апаратом діагностування властивостей та структури матеріалу. Як видно, метод фрактальної оцінки поверхні руйнування дозволяє визначити макроструктурні характеристики гуми за значеннями мікроструктурних параметрів матеріалу без яких-небудь підгінних коефіцієнтів. Результати досліджень свідчать про те, що процес руйнування гуми є нелінійним; очевидно, у локальних зонах, тобто в зонах інтенсивного руйнування матеріалу нелінійність процесу буде більше, чим у середньому за зразком. Також доведено залежність фрактальної розмірності від втомного старіння гуми.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Калганков, Є.В. Інноваційна технологія дезінтеграції руди в кульових барабанних млинах першої стадії подрібнення / Є.В. Калганков // Сборник научных трудов международной конференции «Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта 2016». – Д.: НГУ, 2016. – С. 203-209.
2. Булат, А.Ф. Фрактали в геомеханике / А.Ф. Булат, В.И. Дырда. – К.: Наук. думка, 2005. – 358 с.
3. Щелокова, М.А. Фрактальное обобщение уравнения Гриффитса / М.А. Щелокова // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2004. – №2. – С. 86-89.
4. Баланкин, А.С. Упругие свойства фракталов, эффект поперечных деформаций и динамика свободного разрушения твердых тел / А.С. Баланкин // Доклады АН СССР. – 1991. – Том 319, № 5. – С. 1098-1101.

REFERENCES

1. Kalgankov, Ye.V. (2016), "Innovative technology of disintegration of ore in drum ball mill grinding of the first stage", *Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy konferentsyy «Sovremennye ynnovatsyonnye tekhnolohyy podgotovky ynzhenernykh kadrov dlya hornoy promyshlennosty y transporta 2016»*, pp. 203-209.
2. Bulat, A.F. and Dyrda, V.I. (2005), *Fraktaly v geomekhanike* [Fractals in geomechanics], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
3. Shchelokova, M.A. (2004), "Fractal generalization of the Griffith equation", *Novi materialy i tekhnolohiyi v metalurhiyi ta mashynobuduvanni*, no. 2, pp. 86-89.

4. Balankin, A.S. (1991), "Elastic properties of fractals, the effect of transverse deformations and the dynamics of free destruction of solids", *Doklady AN SSSR*, vol. 319, no. 5, pp. 1098-1101.

Про автора

Калганков Євген Васильович, аспірант, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (ІГТМ НАНУ), Дніпро, Україна

About the author

Kalgankov Yevgeniy Vasilievich, Ph. D. Student in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine

Аннотация. Приводятся результаты исследований локальности образования царапин на поверхности резиновых футеровок, работающих в условиях абразивно-усталостного износа и воздействия на поверхностный слой агрессивной среды в виде повышенной температуры и химически активных веществ. Образцы резины были получены в процессе ревизионного осмотра барабанной мельницы и исследовались на оптическом микроскопе. В результате проведенных исследований установлено, стохастический процесс появления и самоподобие царапин поверхностного слоя футеровки, образованных в результате действия загрузки барабанной мельницы.

Рассмотрена методика и проведено определение фрактальной размерности массивных резиновых деталей, работающих в условиях абразивно-усталостного износа по результатам которого установлено величину фрактальной размерности резиновой футеровки, которая составляет 1,8125. Приведены зависимости её изменения за время эксплуатации, а также доказано увеличение фрактальной размерности с увеличением времени эксплуатации футеровки, то есть наличия увеличенных царапин и каверн, которые возникают в результате усталостного разрушения (деструкции) поверхностного слоя футеровки. Установлена зависимость между фрактальной размерностью поверхности резиновой футеровки и коэффициентом Пуассона.

Использование метода фрактального анализа поверхностей разрушения позволяют получить обобщённые соотношения между механическими характеристиками резины и параметрами её структуры. Также в статье установлена взаимосвязь между фрактальной размерностью и наработкой резиновой футеровки.

Ключевые слова: футеровка, износ, фрактал, фрактальная размерность, абразивно-усталостный износ, деструкция, самоподобие.

Abstract. The results of studies of locality of scratches formation on the rubber lining surface operating in conditions of abrasive and fatigue wear and impact of aggressive environment in the form of high temperature and chemically active substances on the surface layer are shown in the article. Rubber samples were taken while inspecting the drum mill and were investigated by the optical microscope. As a result of the conducted researches, it is established that occurrence and self-similarity of the scratches on the lining surface layer formed in result of action of the loaded drum mill feature a stochastic process.

Technique and determination of the fractal dimension of the massive rubber parts, working in conditions of abrasive and fatigue wear were studied, and, as a results, it was established that fractal dimension of the rubber lining should be 1,8125. Dependences of the lining changes during the operation were determined, and it also was proved that fractal dimension increased with prolonged time of the lining operation, i.e. occurrence of increased scratches and cavities in result of fatigue damage (destruction) of the surface layer of the lining. The dependence between the fractal dimension of the rubber lining surface and the Poisson coefficient was established.

The method of fractal analysis of the surface destruction allows formulating a generalized correlation between the rubber mechanical characteristics and parameters of its structure. Interrelation between fractal dimension and the life of the rubber lining is also established.

Keywords: liner, wear, fractal, fractal dimension, abrasive-fatigue wear, destruction, self-similarity.

Статья поступила в редакцию 11.05.2017

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук, проф. В.П. Надутым