

УДК 620.197: 502/504

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ТРІЩИН ІЗОЛЯЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ ТРУБОПРОВОДУ У КОНТЕКСТІ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

О. І. Слізаров, В. В. Журав, О. Б. Кобильська, А. В. Яцура

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна. E-mail: fizika@kdu.edu.ua

Головною причиною виникнення аварійних ситуацій на трубопроводному транспорті є внутрішня і зовнішня корозія. Для боротьби з нею застосовується електрохімічний спосіб захисту (катодний захист) і ізоляційне покриття. На початкових етапах порушення ізоляційного покриття трубопроводів – утворення тріщин і доступу пари води до поверхні металу, за відсутності електролітичного контакту між жертвними анодами і захищеною поверхнею – катодний захист не є ефективним бар'єром на шляху корозії поверхні трубопроводу. Основа механізму процесу руйнування твердих тіл полягає у порушенні молекулярних зв'язків, проявом яких є утворення і розвиток тріщин. На основі фрактального механізму розвитку тріщин створено комп'ютерний програмний модуль «Моделювання розвитку тріщин».

Ключові слова: катодний захист, щілинна корозія, фрактали, щілинний кластер.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН ИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ТРУБОПРОВОДА В КОНТЕКСТЕ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

О. И. Елизаров, В. В. Журав, Е. Б. Кобильська, А. В. Яцура

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина. E-mail: fizika@kdu.edu.ua

Главной причиной возникновения аварийных ситуаций трубопроводного транспорта является внутренняя и внешняя коррозия. Для борьбы с нею применяется электрохимический способ защиты (катодная защита) и изоляционное покрытие. На начальных этапах разрушения изоляционного покрытия трубопроводов – образование трещин и доступа паров воды к поверхности металла, при отсутствии электролитического контакта между жертвенными анодами и защищаемой поверхностью – катодная защита не является эффективным барьером на пути коррозии поверхности трубопровода. В основе механизма процесса разрушения твердых тел лежит нарушение молекулярных связей, проявлением которых является образования и развитие трещин. На основе фрактального механизма развития трещин был создан компьютерный программный модуль «Моделирование развития трещин».

Ключевые слова: катодная защита, щелевая коррозия, фракталы, щелевой кластер.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Трубопровідний транспорт, особливо магістральні нафтопроводи і газопроводи, має важливе економічне і енергетичне значення, а отже потребує колосальних затрат, пов'язаних з його збереженням.

Більшість аварій на трубопроводах стаються через внутрішню та зовнішню корозію, для захисту від якої використовують пасивний (ізоляційне покриття) і активний (катодний захист) методи. В багатьох публікаціях оглядового характеру показано, що в 70 % випадків причиною корозії підземних магістральних трубопроводів є порушення однорідності (руйнування) ізоляційного покриття (рис. 1).

Щоб забезпечити надійний захист від корозії ізоляційне покриття повинне бути суцільним, мати гарну адгезію з основним металом (зчеплення), бути непроникним для агресивного середовища, рівномірно розподілятися по поверхні, мати високу зносостійкість (в окремих випадках) [1–4].

За характером руйнівного впливу на матеріали навколишнього середовища розрізняють адсорбційний, дифузійний, хімічний, корозійний, радіаційний, кавітаційний, ерозійний механізми впливу; у випадку кавітації та ерозії додатковий вплив середовища на руйнацію поверхні матеріалу пов'язаний з рухом середовища.

На випадок пошкодження ізоляції передбачена система катодного захисту трубопроводів. Проте, як

показано у роботах [5, 6], на початкових етапах руйнування захисного ізоляційного покриття, а саме, його розтріскування і доступу пари води до поверхні металу, електролітичний контакт між катодно захищеною поверхнею і жертвним анодом відсутній, а отже катодний захист не спроможний виконати захисну функцію.



Рисунок 1 – Фотографія пошкодженої ділянки ізоляції нафтопроводу “Гнідинці – Глинсько-Розбишівська”

І лише при відшаровуванні покриття в місцях локалізації розтріскувань, коли встановиться надійний електролітичний контакт між жертвними ано-

дами і захищеною поверхнею, свою функцію починає виконувати катодний захист. Але до цього часу щільна корозія може завдати непоправної шкоди тілу трубопроводу. Таким чином, для вдосконалення антикорозійного захисту важливою задачею є аналіз процесів, що відбуваються при руйнації ізоляційного покриття. Він ґрунтується на поєднанні статистичних, імовірнісних методів дослідження та глибокому проникненні у фізичну (або фізико-хімічну) сутність цих процесів.

Метою даної роботи є осмислення процесів, які відбуваються при деградації матеріалів ізоляційного покриття, умов утворення і розвитку тріщин, і побудова комп'ютерної моделі цього процесу.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. В основі руйнації початкового стану будь-якого твердого тіла лежать розриви молекулярних чи атомарних зв'язків. Прояви такого розриву можуть бути різними: зміна форми тіла (пластична деформація металів, аморфних тіл), розтріскування, випаровування (наприклад, кристали йоду).

У випадку, коли наслідком розриву молекулярних зв'язків є утворення тріщини, характерним є локалізація процесу подальшого руйнування таких зв'язків, проявом чого є розвиток тріщини – її подовження і розгалуження. Такі подовження і розгалуження провокують нові акти розтріскування. Таким чином, утворюється просторово зв'язаний кластер порушених молекулярних зв'язків.

Спостережувана експериментально кінетика руйнування твердих тіл обумовила важливе емпіричне узагальнення: макроруйнацію матеріалів можна розглядати як процес множинної мікроруйнації. Протягом певного часу відбувається ймовірнісний процес зародження, руху, росту мікрodefektів, каскад яких зростає як самодостатній кластер. Цей кластер має сувору ієрархічну структуру і має внутрішній порядок, який є фрактальною розмірністю кластера. Приклади таких фракталів показано на рис. 2.

Поклавши в основу міркування лише одне припущення, а саме: акт мікроруйнації має ймовірнісний характер, відшукаємо часову залежність числа активів подовжень і розгалужень кластеру.

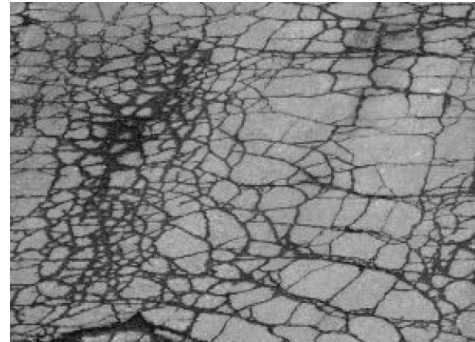
Нехай від початку спостереження до моменту часу t відбулося N таких активів. Тоді очевидно, що число активів dN , які виникнуть за проміжок часу dt , буде пропорційним як цьому проміжку часу, так і числу вже існуючих ділянок кластеру, схильних до руйнації, тобто числу N .

Отже

$$dN = \mu N dt \quad (1)$$

Тут μ – певний коефіцієнт пропорційності. Його величина визначає активність руйнації конкретних матеріалів в конкретних умовах впливу на них руйнівних чинників: температури, статичних механічних навантажень, вібрацій, впливу агресивного середовища і т. ін. Структура коефіцієнта μ повинна відбивати протистояння двох енергетичних факторів – енергії молекулярних зв'язків матеріалу (фактор

упорядкованості) і енергії руйнівних процесів (фактор хаосу). Оскільки розв'язок задачі динаміки росту щільного кластеру ми відшукуємо в найбільш загальному випадку, деталізацію структури коефіцієнту μ можна лишити поза увагою.



а)



б)

Рисунок 2 – Фотографії фрактальних структур, які утворилися при розтріскуванні асфальтового покриття – а) і фарбованої поверхні металу – б).

Розділивши змінні і проінтегрувавши

$$\frac{dN}{N} = \mu dt, \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \mu \int_0^t dt.$$

$$\text{Отримаємо } N = N_0 e^{\mu t}, \quad (2)$$

де N_0 – число активів мікроруйнації в початковий момент спостереження.

Експоненціальний зв'язок між числом активів мікроруйнації і часом визначає лавиноподібний характер розвитку тріщин, що і показано в роботах [7–10].

На основі фрактального механізму розвитку тріщин було створено комп'ютерний програмний модуль «Моделювання розвитку тріщин».

Механізм роботи програмного модуля полягає в наступному: обирається фокус зародження тріщини, далі акти подовження чи розгалуження щілини відбуваються з деякою ймовірністю p_0 , яка задається в моделі довільно, і повинна бути конкретизована в реальній задачі, параметрично залежно від матеріалу досліджуваної поверхні. Ймовірність розгалуження мікротріщин задається параметром q_0 у рівних проміжках часу Δt . Утворені за час Δt ланцюжки кластеру діляться на n частин, кожна з яких може породити нову мікротріщину з ймовірністю:

$$q = \frac{q_0}{2n}, \quad (3)$$

де 2 у знаменнику означає ймовірність відгалуження в одну із двох можливих сторін. Структура, що утворюється на кожному з інтервалів Δt , розглядається як множина окремих відрізків.

Наступний акт подовження чи розгалуження тріщини, а також місце звідки йшов її розвиток визначався генератором випадкових чисел. По закінченні декількох послідовних процесів розгалуження і подовження утворюється самоподібна структура. І в цій структурі, як правило, виникає місце найбільшої густини мікротріщин, що перетинають одна одну (рис. 3). Саме місце локалізації максимальної густини і є найбільш можливим місцем відшарування покриття.

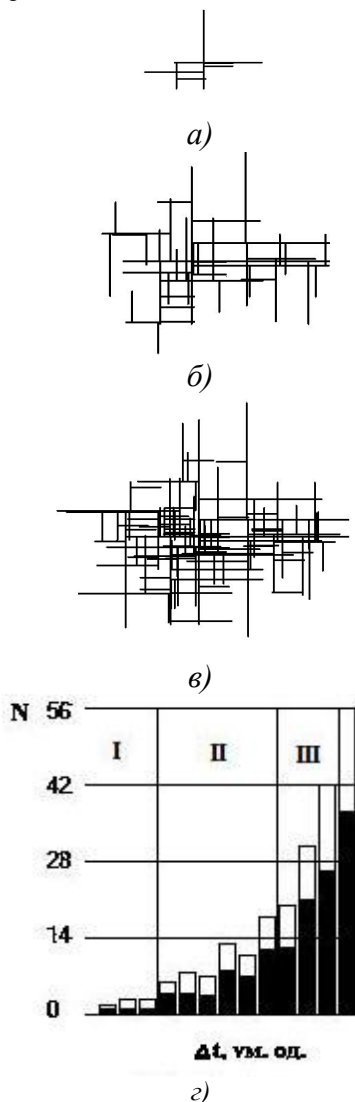


Рисунок 3 – Залежність від часу числа актів подовжень (нижня частина діаграми) і розгалужень (верхня частина діаграми) побудованих у програмному модулі *з*). Зона I відповідає стану *а*) 3 інтервали Δt , зона II – *б*) 9 інтервалів Δt , зона III – *в*) 13 інтервалів Δt . Подовження і розгалуження мали однакою ймовірність

Кількість актів подовжень і розгалужень фіксувалося програмним модулем «Моделювання розвитку

ку тріщин». На рис. 3 показана часова динаміка збільшення їхньої кількості.

Перебудова графіку (рис. 3,г) у логарифмічному масштабі (рис. 4) свідчить про те, що динаміка розвитку щільного кластеру описується експоненціальним законом. Нахил прямої дозволяє визначити коефіцієнт μ .

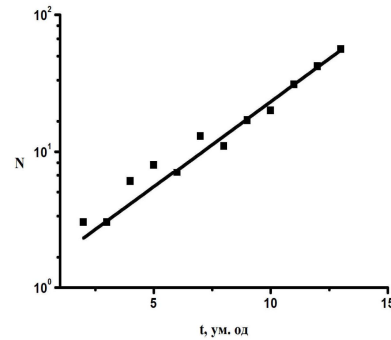


Рисунок 4 – Залежність кількості утворених тріщин від часу

Змінюючи параметри ймовірності подовжень і розгалужень в програмному модулі, можемо отримати інший характер розвитку кластеру тріщин (рис. 5).

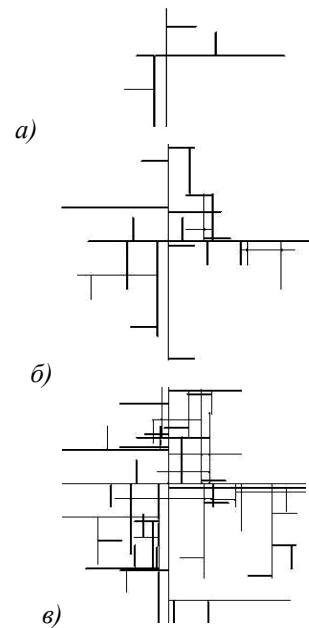


Рисунок 5 – Динаміка розвитку тріщини при змінених параметрах імовірностей подовження і розгалуження *а*) 3 інтервали Δt , *б*) 9 інтервалів Δt , *в*) 13 інтервалів Δt . Ймовірність подовження втричі більша за ймовірність розгалуження

Таким чином, нам вдалося побудувати програмну модель, яка, в деякому наближенні, показує процес руйнування твердого тіла. І її можна застосувати для аналізу процесів руйнування захисного ізоляційного покриття.

ВИСНОВКИ. На основі глибинної спільності механізмів процесу руйнації твердих тіл створено програмний модуль «Моделювання розвитку трі-

щин», який демонструє розвиток тріщин в твердотільних покриттях.

За допомогою нього показано, що розвиток тріщин має експоненціальний в часі характер і поверхневу неоднорідну щільність розтріскувань. Місця максимальної густини розтріскувань є найбільш імовірними ділянками відшарування покриття від основи.

Розширення можливостей програми відтворювати розгалуження кластеру під кутами, відмінними від 90°, дозволить ще більше наблизити конфігурацію модельного кластеру до реального.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бородавкін П.П., Ким Б.И. Охрана окружающей среды при строительстве и эксплуатации магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1986. – 157 с.
2. Середницький Я.А. Протикорозійні та теплоізоляційні матеріали і конструкції покриттів на їх основі // Ринок інсталяційний. – 1997. – № 2. – С. 12–14.
3. Романов О.М., Оксанич О.Е., Гавришко А.Д. Захист матеріалів від корозії: техніко-економічні та організаційні аспекти // Вісник АН УРСР. – 1988. – № 9. – С. 45–50.
4. Середницький Я.А. Захист металоконструкцій в ґрунтах підвищеної корозійної активності // Україн-

ське матеріалознавство. – Львів: Наукове товариство ім. Т. Шевченка. – 1994. – Т. 1. – С. 113–119.

5. Єлізаров О.І., Журав В.В. Про деякі аспекти щільової корозії // Науковий журнал „Фізика і хімія твердого тіла” Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, 2008. – Т. 9. – № 3. – С. 635–638.
6. Yelizarov M.A. Visualization of early stages of corrosion processes by a chemography method // Surface and Interface Analysis. – 2006. – V. 38. – pp. 263–266.
7. Мосолов А.Б., Динариев О.Ю. Автомодельность и фрактальная геометрия разрушения // Проблемы прочности. – 1988. – № 1. – С. 3–7.
8. Эрдоган Ф., Кобаяси А., Атлури С., Фрэннд Л., Накагаки М., Нисиока Т., Ньюмен Дж. мл., Раджу И., Сведлоу Дж. Вычислительные методы в механике разрушения: пер. с англ. / Под ред. С. Атлури. – М.: Мир, 1990. – 392 с.
9. Nikishkov G.P., Atluri S.N. Three-dimensional elastic-plastic J-integral calculations for semielliptical surface cracks in a tensile plate // Eng. Fract. Mech. – 1988, – Vol. 29, № 1. – PP. 81–87.
10. Nord K.J., Chung T.J. Fracture and surface flaws in smooth and threat end round bars // Int. J. Fract. – 1986. – Vol. 30, № 1. – PP. 47–55.

MODELING OF THE CRACKING DEVELOPMENT IN THE INSULATION COATING OF THE PIPELINE IN THE CONTEXT OF FRACTAL ANALYSIS

O. Elizarov, V. Zhurav, O. Kobilskaya, A. Yacura

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: fizika@kdu.edu.ua

Internal and external corrosion is a main cause raising the cracking of the pipeline; cathodic protection and protective coating are the measures to prevent this. Cathodic protection is a technique for the metal surface corrosion control when this surface becomes the cathode itself within the electrochemical cell. But cathodic protection is not the corrosion barrier efficient enough for the pipeline surfaces, on the initial stage of destruction of the pipeline insulation coating leads to cracking forming and, as a result, water vapour access to the metal surface while there is no electrolytic contact between sacrificial anode and protectable surface. The mechanism of destruction of solid bodies is based on the molecular linkage disarrangement resulted in creation and development of cracking. The authors have developed a computer programme module "Modeling of the cracking development" based on the cracking fractal mechanism.

Key words: cathodic protection, crevice corrosion, fractal, slotted cluster.

REFERENCES

1. Borodavkin, P.P., Kim, B.I. (1986), *Ohrana ok-ruzhayuschey sredy pri stroitelstve i ekspluatatsii magistralnykh truboprovodov* [Environmental safety at construction and exploitation of main pipelines], Nedra, Moscow, Russia.
2. Serednicikiy, Y.A. (1997), "Anticorrosive and heat insulating materials and based on them coating designs", *Rynok Instalyatsiyniy*, no. 2, pp.12–14.
3. Romanov, O.M., Oksanich, O.E., Gavrishko, A.D. (1988), "Material protection from corrosion: technical and economic and organizing aspects", *Visnik AN URSR*, no. 9, pp. 45–50.
4. Serednicikiy, Y.A. (1994), "Corrosion protection of metal works in hyperactive soils", vol. 1, pp. 113–119, *Ukrayinske materialoznavstvo*.
5. Elizarov, O.I., Zhurav, V.V. (2008), "On some aspects slot-hole corrosion", *Physics and Chemistry of Solid State*, vol. 9, no. 3, pp. 635–638, Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine.

6. Elizarov, M.O. (2006), "Visualization of early stages of corrosion processes by the chemography method", *Surface and Interface Analysis*, vol. 38, pp. 263–266.
7. Mosolov, A.B., Dinariev, O.U. (1988), "Automodel and fractal destruction geometry", *Problemyi prochnosti*, no. 1, pp. 3–7.
8. Erdogan, F., Kobayasi, A., Atluri, S., et al. (1990), *Vychislitelnyie metodyi v mehanike razrusheniya* [Computational Methods in the Mechanics of Fracture], Mir, Moscow, Russia.
9. Nikishkov, G.P., Atluri, S.N. (1988), "Three-dimensional elastic-plastic J-integral calculations for semielliptical surface cracks in a tensile plate", *Eng. Fract. Mech.*, vol. 29, no. 1, pp. 81–87.
10. Nord, K.J., Chung, T.J. (1986), "Fracture and surface flaws in smooth and threat end round bars", *Int. J. Fract.*, vol. 30, no. 1, pp. 47–55.

Стаття надійшла 26.06.2013.