DOI: https://doi.org/10.20535/2707-2096.3.2020.219320
УДК 622.1.35:539.3

Ю. І. Войтенко, д.т.н.
Український державний геологорозвідувальний інститут,
В.В. Вапнічна, к.т.н., доц.
КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПРО РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТРІЩИН В КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ І ГІРСЬКИХ ПОРОДАХ З ПОЗИЦІЙ СИНЕРГЕТИКИ

Yu. Voitenko, Dr. Eng. Sc.,
Ukrainian State Geological Research Institute
V. Vapnichna, Cand. Eng. Sc., Assoc. Prof.,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

ON THE CRACK PROPAGATION IN STRUCTURAL MATERIALS AND ROCKS FROM THE STANDPOINT OF SYNERGETICS

Метою роботи є аналіз з позицій принципів синергетики експериментальних результатів руйнування твердих полімерів, сталей і гірських порід.

Проаналізувати експериментальні дані щодо розповсюдження тріщин розриву при квазістатичному та імпульсному розтяганні та згині зразків твердих полімерів (ПММА), сталей і бетону з урахуванням запасу пружної, або пружно-пластичної енергії на момент руйнування. Проаналізувати форму і кількісні характеристики дисипативних структур, які утворюються в твердому тілі при розповсюдженні тріщини по матеріалу.

Аналіз режимів розповсюдження повільних та швидких тріщин в полімерних матеріалах (ПММА), інструментальних сталях і бетоні при різних схемах і режимах навантаження зразків показує, що стрибкоподібний характер їхнього руху з періодичним падінням швидкості тріщини частково або до нуля є фундаментальною генетичною властивістю твердого тіла. В основі природи даного явища лежать принципи синергетики, зокрема принцип мінімуму виробництва ентропії.

Показано, що закономірності розповсюдження тріщин в твердих полімерах, металах і гірських породах мають синергетичну природу. Сформульовано робочу гіпотезу щодо синергетичного механізму знеміцнення і деформаційного руйнування крихких дилатуючих порід поблизу підземних виробок.

Показано, що характер розповсюдження повільних тріщин при гідророзриві ПММА, а також швидких тріщин при імпульсному розтягненні та згині плоских зразків ПММА і сталі повністю підпорядковано принципам синергетики, зокрема принципу мінімуму виробництва ентропії. Очевидно, що для якісного та кількісного опису структурних змін і руйнівного деформування гірських порід поблизу підземних виробок недостатньо моделей механіки суцільного середовища. В практичних застосуваннях необхідно враховувати стрибкоподібний характер процесів і кооперативні ефекти.

Ключові слова: *тріщина, динамічне руйнування, синергетика, ентропія, дисипативна структура*

ВСТУП

Актуальність теми. Синергетика, як наукова теорія є однією з найбільш загальних і ефективних в аналізі поведінки відкритих термодинамічних систем. На думку одного їз її творців термодинаміка є складовою частиною синергетики [1]. Дана теорія дозволяє пояснити і за наявності відповідної техніки і технології прогнозувати динамічні явища в надрах планети, динамічні явища, які супроводжують розробку родовищ корисних копалин, катастрофічні явища, повязані з руйнуванням крупногабаритних технічних і будівельних споруд, катастрофічні вибухи на складах і виробництвах хімічних речовин [2]–[4]. Разом з апаратом фрактального аналізу дана теорія дозволяє говорити про конструювання матеріалів з наперед заданими властивостями [2]. Кооперативні ефекти, які спостерігаються в фізичних та фізико-хімічних процесах також підпорядковані її законам і принципам. Так наприклад, руйнування тріщинуватих гірських порід вибухом посилюється застосуванням будь-яких заходів, спрямованих на підвищення їхньої акустичної жорсткості.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основні принципи синергетики висвітлені в монографії [2]. Зупинимось на основних принципах, зокрема:

- принцип мінімуму виробництва ентропії;
- принцип поточної і локальної рівноваги;
- принцип підпорядкованості;
- принцип мозаїчної нерівноважної термодинаміки.

Принципова різниця між класичною термодинамічною і поточною рівновагою у відкритій термодинамічній системі полягає у кінцевому виробництві ентропії. Еволюцію такої системи можна розглядати як переходи системи через ряд квазірівноважних станів, які супроводжуються утворенням дисипативних структур. Принцип підпорядкованості, який реалізується в системах, що самоорганізуються визначає відбір найбільш пристосованої моди, сценарію протікання процесу, повязанних з досягненням критичних умов, при яких процес протікає так, а не інакше.

Принцип мозаїчної нерівноважної термодинаміки полягає в розподілі складної системи на складові фізичні і хімічні елементи і відповідні елементарні процеси. З іншими принципами «найменшого примушування», «нерівноважність – джерело впорядкованості» читач при бажанні може познайомитися самостійно.

Процеси руйнування, як правило, супроводжують підготовчі роботи, спорудження і експлуатацію підземних виробок, видобуток і переробку корисних копалин. Повного розуміння природи і законів руйнівного деформування порід в таких умовах на сьогодення немає, незважаючи на помітні досягнення в цій галузі науки і техніки [5]–[7].

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз з позицій принципів синергетики експериментальних результатів руйнування твердих полімерів, конструкційних матеріалів і гірських порід.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Матеріали і результати досліджень. Особливості розповсюдження тріщин в твердих полімерах і металах при квазістатичних та динамічних навантаженнях. Структура стінки тріщини гідророзриву в об'ємному зразку поліметилметакрилату (ПММА), представлена на рис. 1, обумовлена циклічним повторенням процесів руху тріщини та її гальмування до повної зупинки [8]. Строга повторюваність ділянок руху і гальмування тріщини, постійність їх лінійних розмірів вказує на самоорганізованість структуроутворення, яка можлива лише в умовах, коли рухомою силою процесу є

прагнення системи до мінімуму виробництва ентропії. Структуроутворення носить автоколивальний характер, а параметром порядку є теплопровідність взаємодіючих середовищ: ПММА і рідини (вода, або гліцерин). Це визначає чергування структурних ділянок стрибків тріщини (світлі полоси) та гальмування і зупинки (поточної, локальної рівноваги, або точки біфуркації - темні полоси). Протяжність стрибків тріщини складала 1,0…20,0 мм при тривалості 0,5…1,5 ms. Тривалість гальмування і зупинок тріщин досягала 0,6…2 ms. Протяжність стрибків тріщини при розриві в'язкою рідиною, як правило, була більшою, ніж при розриві малов'язкою. Рельєф поверхні руйнування швидше всього характеризується фрактальними властивостями.

Рисунок 1 – боріздки, які залишила тріщина гідророзриву в ПММА; стрілкою показано напрямок розповсюдження тріщини

Аналогічна картина руху тріщини спостерігалась при імпульсному розтягненні плоских зразків ПММА Протяжність стрибків тріщини складала 0,5…1,5 мм при тривалості 1…3 μs. Тривалість зупинок тріщин досягала 2 μs [9].

При підриванні заряду гексогену масою 0,15 г в пісчаній оболонці діаметром 10-2 м в об'ємному зразку ПММА на всіх трьох тріщинах, які утворилися на стінках свердловини, спостерігається аналогічна картина структуроутворення (рис. 2). Протяжність стрибків тріщини складає 3…3,7 мм.

При підриванні зарядів ТЕН'у в об'ємних зразах ПММА в дископодібних щілинах утворювалися 2…3 магістральні тріщини [10]. Структура поверхонь цих тріщин говорить про наявність десяти стрибків протяжністю ≈3,5…4 мм (в більшій тріщині) і ≈1,7…2 мм (в меншій тріщині).

Рисунок 2 – Картина руйнування об'ємного зразка ПММА вибухом заряду гексогену в піщаній оболонці

Стрибкоподібний режим руху в зразках ПММА та інструментальної сталі Pitho отримано в роботі [11]. Випробування проводилися на трьох точковий згин при швидкостях навантаження 0,1…130 мкм/с. В роботі [12] наведено аналогічні результати досліджень динамічного руйнування сталі 85ХВ. Швидкості тріщин, які досліджувались в роботах [8], [11] менше залежали від швидкості навантаження, ніж від величини тиску руйнування [8] і напруження біля надрізу, при якому відбувається руйнування зразка в роботі [11]. Тобто від величини пружної енергії в зразку на момент руйнування. Швидкості повільних тріщин в ПММА [8] на порядок менші, ніж динамічних тріщин в роботах [9]–[11] (≈ 100…750 м/с). На окремих ділянках швидкість динамічних тріщин перевищувала верхнє значення цього діапазону приблизно в два рази (≈1500 м/с). Нагадаємо, що гранична розрахункова швидкість тріщини в ПММА – 590…600 м/с [8].

Цей далеко не повний перелік прикладів динамічного руйнування ПММА і сталей показує, що механізм і кінетичні параметри руху тріщин в твердих середовищах незалежно від схеми навантаження мають загальну енергетичну природу.

Відомо, що ентропія відкритих систем, які обмінюються енергією і речовиною з навколишнім середовищем, складається з двох частин [2]:

$$dS = d_e S + d_i S,$$

де $d_e S -$ перенос ентропії через границі системи; $d_i S$ - виробництво ентропії всередині системи. Виробництво ентропії в незворотних процесах обумовлено дисипацією енергії – переходом частини енергії упорядкованого руху в енергію неупорядкованого руху. В кінцевому рахунку - в теплоту. В даному випадку і взагалі в процесах руйнування енергія виділяється у вигляді теплових слідів тріщин і розсіюється навколо них. Виробництво ентропії визначається виразом $p = d_i S/dt$. Для відкритих систем аналогом рівноважного стану є стани, при досягненні яких суттєві параметри для опису системи не міняються в часі і $dS = 0$. При цьому умова еволюції має вигляд $dp \leq 0$, а умова поточної рівноваги p =min, p=0. В нашому випадку – це момент чергової зупинки тріщини в місці поточної рівноваги (темні полоси на рис. 1,2). У разі гідророзриву, або інших видів розривного руйнування гірських порід не повинно бути принципових

відмінностей від характеру розповсюдження тріщин в кристалічних конструкційних, будівельних матеріалах, і твердих полімерах [10]–[12]. Існують лише відмінності по часу затримки руйнування з моменту детонації заряду (ПММА та бетон) [10].

Автори робіт [8], [13] пов'язують зміну ділянок прискорення і гальмування тріщини розриву в ПММА з умовами навантаження. При цьому на інтервалах руху, де $dK_I/dl > 0$ (K_I, l - відповідно тріщиностійкість і довжина тріщини) швидкість тріщини постійно зростає. Якщо умови навантаження такі, що $dK_I/dl < 0$, то вона починає гальмуватися. Таке трактування не заперечує, а лише підтверджує синергетичну природу руху тріщин в ПММА. Тому що питома на одиницю поверхні робота руйнування G_{1c} визначається із співвідношення $G_{1c}E \sim K_{1c}^2$ (E – модуль Юнга, K_{1c} – критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень). Аналогічне співвідношення справедливе і для тріщини, яка рухається. Перша з наведених умов означає зростання енергії та ентропії, друга означає зменшення. У разі зупинки тріщини $dK_I/dl = 0$.

У разі деформування при об'ємному стисненні деформаційне руйнування супроводжується розкриттям мікротріщин, які завжди присутні в гірській породі та збільшенням її об'єму (дилатансії) з подальшим утворенням систем макротріщин [14]. Зауважимо, що в роботі [14] мова йде про спонтанне утворення тріщин в зонах дилатансії на великих глибинах через різницю компонентів початкового напруженого стану. В зонах, які прилягають до підземних виробок ця різниця може досягати критичних значень навіть на невеликих глибинах. Із фізичних міркувань з урахуванням принципів синергетики вони не можуть утворюватися всі одночасно, а утворюються постадійно у часі і просторі за певним сценарієм [6], [7].

На сьогоднішній день розроблено лише підхід до вивчення процесів руйнівного деформування, зроблені кількісні оцінки граничних станів порід навколо виробки з використанням апарату механіки суцільного середовища, проведено якісний аналіз процесів руйнівного деформування [7], [15]. Задача для майбутніх досліджень – розробка адекватних моделей, підпорядкованих принципам синергетики з кількісним аналізом розвитку руйнівного деформування навколо виробки в просторі і часі.

ВИСНОВОК

Закономірності руху тріщин в твердих полімерах, металах і гірських породах мають синергетичну природу. Як при квазістатичних, так і при імпульсних навантаженнях спостерігаються ділянки з підвищеним виробництвом ентропії і ділянки з мінімальним виробництвом ентропії, що підтверджується швидкістю тріщин в цих інтервалах і наявністю періодичних дисипативних структур на стінках тріщин.

REFERENCES

[1] G. Haken, Synergetics. Moskva: Mir, 1980.

[2] V. S. Ivanova, A. S. Balankin, I. Zh. Bynin, and A. A. Oksogoev, Synergetyka i fraktaly v materialovedeyii. Moskva: Nauka, 1994.

[3] S. V. Mykulyak, "Hierarchical block model for earthquakes", PHYSICAL REVIEW E– 97, 062130, pp. 1–7, Jun. 2018. doi: 10.1103/PhysRevE.97.062130.

[4] Yu. I. Vojtenko, "Synergetyka geologichnykh seredovysfh ta ii vplyv na efektyvnist rozroblennia i poshuku rodovusch korysnykh kopalyn", Mineralni resyrsu Ukrainy, vol. 3, pp. 15–21, Oct. 2019. doi: https://doi.org/10.31996/mru.2019.3.15-21.

[5] O. Khomenko, and M. Kononenko, "Natural researches of behaviour of the rock mass around primary extraction cameras", Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, vol. 9=10, pp. 21–24, 2010.

[6] V. Griniov, L. Zakharova, I. Diedich, and V. Nazymk, "Distant interaction of rock mass clusters around underground opening", *Mining of mineral deposits*, vol. 2, pp.79–83, Jun. 2017. doi: 10.15407/mining11.02.079

[7] A. A. Pirskiiy, and S. N. Stovpnik, "Shakhtnye issledovaniia pucheniia pochvy v vurobotkakh Zapadnogo Donbasa", *Ugol Ukrainy*, vol. 11, pp. 2–3, 1989.

[8] A. A. Vovk, Yu. I. Vojtenko, and A. V. Mykhaliuk, "Impulsnyiy gidrorazpyv polimetilmetakrilata". *PMTF*, vol. 5, pp. 135–141, 1986.

[9] Yu. A. Kostandov, A. I. Ruzhakov, and S. I. Fedorkin, "Razrushenie tverdykh polimerov pri impylsnom rasniazhenii", *Probkemy prochnosti*, vol. 7, pp. 14–17, 1992.

[10] Yu. I. Vojtenko, and V. A. Poplavskiiy, "Modelirovanie razrusheniia gornykh porod pri vzryve zariada v schelevoiy polosti, imeiuscheiy formu diska", *Fiz. - tekhn. probl. razrabotki polez. iskopaemykh*, vol. 5, pp. 54–57, 2002.

[11] Dzh. Konglton, and B. Denton, "Izmerenie rosta treschin v metalakh i nemetalakh", *Mekhanika razrusheniia. Bistroe razrushenie, ostanovka treschin*, Moskva: Mir, pp.172–198, 1981.

[12] V. Z. Parton, and V. G. Boriskovskiiy, "*Dinamika khrupkogo razrusheniia"*, Moskva: Mashynostroenie, pp. 239, 1988.

[13] V. P. Efimov, and E. N. Sher, "Opredelenie dinamicheskoiy treschinostoiykosti organicheskogo stekla", *PMTF*, vol. 5, pp. 217–225, 2001.

[14] A. V. Mykhaliuk, and Yu. I. Vojtenko, "Dylatansionnyiy mekhanizm genezisa treschinovatosti porodnykh massivov", Zbirnyk *naukovykh prats Ukrainskogo derzhavnogo geologorozviduvalnogo instytutu*, vol. 4, pp. 135–146, 2011.

[15] S. N. Stovpnik, and A. S. Osypov, "Isledovanie flishevogo porodnogo massiva v usloviiakh stroitelstva Beskidskogo tonnelia", *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy*, vol. 1, pp. 1-9, 2018. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pbis_2018_1_3

Стаття надійшла до редакції 20.11.2020.