

УДК 539.42

https://doi.org/10.33619/2414-2948/90/51

## ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ МИКРОТРЕЩИН В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

©**Ташполотов Ы.**, ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN-код: 2425-6716, д-р физ.-мат. наук,  
Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан, itashpolotov@mail.ru

©**Хожиматов У. Т.**, Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан

©**Садыков Э.**, Ошский государственный университет,  
г. Ош, Кыргызстан, sadykov.erkinbai@mail.ru

©**Абдыбапова Г.**, Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан

## FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF MICROCRACKS IN SOLIDS

©**Tashpolotov Y.**, ORCID: 0000-0001-9293-7885, SPIN-code: 2425-6716, Dr. habil.,  
Osh State University, Osh, Kyrgyzstan, itashpolotov@mail.ru

©**Khozhimatov U.**, Osh State University, Osh, Kyrgyzstan

©**Sadykov E.**, Osh State University,

Osh, Kyrgyzstan, sadykov.erkinbai@mail.ru

©**Abdybapova G.**, Osh State University, Osh, Kyrgyzstan

*Аннотация.* Несмотря на многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, проблема разрушения твердых тел остается до сих пор не решенной. В данной работе экспериментально исследовались процессы трещинообразования в тонкой пленке ферромагнитного порошка. Высушенная порошкообразная пленка помещалась в колонну электронного микроскопа и изучались разрушение слоя порошка в процессе электронного облучения с энергией 75 кэВ. За счет быстрого нагревания под действием электронного пучка в тонкой пленке происходят процессы структурных и фазовых превращений. Образующиеся микротрещины взаимодействуют между собой и трещинообразование начинает приобретать коллективный характер. Для процесса разрушения тонкой пленки получено рекуррентное уравнение. Показано, что разрушение микроскопических твердых тел и образование микротрещин является самоподобным (фрактальным).

*Abstract.* Despite numerous experimental and theoretical studies, the problem of the destruction of solids remains unresolved. In this paper, crack formation processes in a thin film of ferromagnetic powder were experimentally investigated. The dried powdery film was placed in an electron microscope column and the destruction of the powder layer during electron irradiation with an energy of 75 keV was studied. Due to the rapid heating under the action of an electron beam, the processes of structural and phase transformations occur in a thin film. The resulting microcracks interact with each other and the crack formation begins to acquire a collective character. A recurrent equation is obtained for the process of destruction of a thin film. It is shown that the destruction of microscopic solids and the formation of microcracks is self-similar (fractal).

*Ключевые слова:* твердая пленка, микротрещины, фрактальность, самоподобность, дискретность.

*Keywords:* solid film, microcracks, fractality, self-similarity, discreteness.

В последние несколько десятилетий сильно расширились области применения кристаллических твердых тел в самых различных областях техники. Все возрастающие потребности техники стимулируют синтеза твердых веществ, изучение их физико-химических свойств, реакций с их участием и в конечном итоге создание материалов с заранее заданными свойствами. Обычно применяемые в промышленности твердые кристаллические материалы имеют реальную структуру, отличающуюся от идеальной (строго упорядоченной) наличием разнообразных дефектов. Проблема дефектного состояния твердых тел различной природы в настоящее время является одной из важнейших в современной физике твердого тела. Несмотря на многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, проблема разрушения твердых тел остается до сих пор открытой, поскольку, с одной стороны, не сформулированы условия автомодельности разрушения твердых тел [1], а с другой — не учтена динамика развития трещины [2].

Развитие микротрещин может привести к серьезным проблемам с твердыми телами, особенно если они используются в критических приложениях или при высоких нагрузках. Поэтому необходимо знать общие закономерности развития микротрещин в твердых телах и выбрать нужную технологию, позволяющую свести к минимуму развитие микротрещин. Существует различные факторы, которые могут повлиять на развитие микротрещин (напряжение, температура и др.). Чем больше напряжение, тем склоннее материал к образованию микротрещин. Для того чтобы уменьшить развитие микротрещин, используют различные методы обработки, например, сплавление и литье под давлением, а также существуют специальные покрытия, которые могут помочь защитить материалы от разрушения.

В монографии «Синергетика и фракталы в материаловедении» авторы установили, что различные материалы обладают фрактальной иерархией структуры, что влияет на их деформационное и разрушающее поведение [3].

В работе «Формирование фрактальных структур микрометрового размера из наночастиц диоксида кремния» авторы исследовали процессы формирования фрактальных структур микрометрового размера из наночастиц диоксида кремния. Они обнаружили, что многие аспекты этого процесса обладают фрактальными свойствами, такими как самоподобие микроструктур на различных уровнях [4].

Yaohui W., Tingjie L., Sun B., Liu S., Zeng S. et al. исследовали взаимосвязь между фрактальными параметрами микротрещин и временем до полного разрушения материалов и установили, что фрактальные параметры микротрещин могут служить индикаторами разрушения материала [5, 6].

В работе «Фрактальная размерность как характеристика усталости поликристаллов металлов» установлена взаимосвязь фрактальной размерности и усталости поликристаллов металлов [7].

Таким образом, на многие проблемы образования микротрещин в твердых телах можно получить на основе *фрактальной кинетики* разрушения, рассматривающей разрушение как равновесный фазовый переход в системе, далекой от равновесия, и учитывающей влияние дискретности среды на показатели сопротивления разрушению с помощью *фрактальной размерности диссипативной структуры*, контролирующей это разрушение. Поэтому *задачей фрактальной механики разрушения* является установление универсальных законов самоподобного разрушения твердых тел. Разрушение твердых тел обычно рассматривается не как критическое событие, а как кинетическое явление [2, 3], т.е. макроскопический разрыв тела является завершающим актом процесса разрушения. Интегральной

характеристикой этого процесса является долговечность  $\tau$  — время от момента приложения нагрузки до разрыва тела. Для широкого круга материалов в большом диапазоне напряжений и температур  $T$  получено общее выражение для долговечности [1-3]:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $\tau_0 = 10^{-13}$  с,  $U_0$  совпадает с энергией диссоциации межатомных связей;  $\gamma$  включает в себя активационный объем и коэффициент локальных перенапряжений (следствие структурной неоднородности материала).

Выражение (1) позволяет охарактеризовать кинетику разрушения как процесс, контролируемый термофлуктуационным распадом напряженных межатомных связей в нагруженном теле. Однако глубокого понимания существа данной проблемы с фрактальной точки зрения пока еще нет. Явления растрескивания тонких пленок принадлежат к числу наиболее интересных и сложных процессов в материаловедении. Решающую роль в них играют многие факторы, такие, как природа материала, примеси, дефекты, внутренние и внешние границы и т.д., что обуславливает существование обширного семейства механизмов трещинообразования. Несмотря на это, полученные нами результаты показывают, что трещинообразование в пленках обладает фрактальной природой, что стимулирует дальнейшие исследования в этом направлении.

#### *Материалы и методы исследования*

Эксперименты по изучению трещинообразования в тонкой пленке нами проводились следующим образом: несколько капель ферромагнитного порошка в эфире наносились на коллодиевую пленку, расположенную на предметной электронно-микроскопической сетке [8, 9]. Высушенный препарат помещался в колонну электронного микроскопа, где и наблюдалось разрушение слоя порошка в процессе электронного облучения с энергией 75 кэВ (Рисунок).

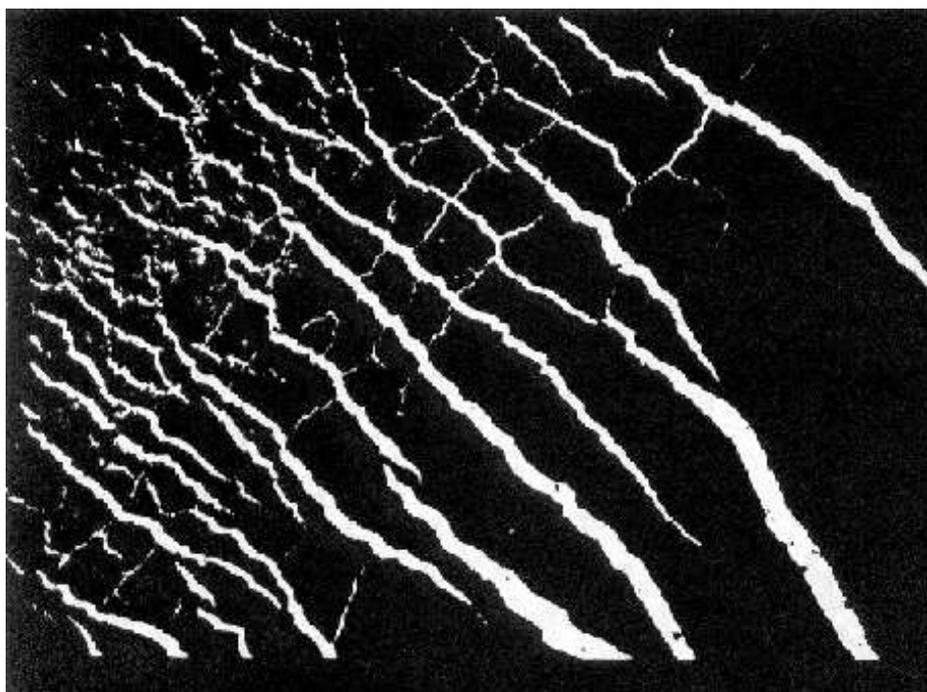


Рисунок. Электронно-микроскопические снимки микротрещины в тонком слое ферромагнитного порошка

В данном случае под действием электронного облучения слой порошка (пленка) переходит в нелинейное состояние. За счет быстрого нагревания в тонкой пленке происходят процессы структурных и фазовых превращений [10]. Образующиеся микротрещины взаимодействуют между собой и третинообразование начинает приобретать коллективный характер. Распределение трещин становится самоподобным. Действительно, полученные электронно-микроскопические снимки (рис.1), позволили сделать следующие выводы:

а) Длины ( $l$ ) микротрещин между двумя последовательными «ветвлениями» изменяются дискретно: 1,52; 3,07; 4,89; 9,19; 18,4 мкм;

б) Среднее арифметическое значение отношения  $\frac{l_n}{l_{n-1}} = 1,9 \pm 0,12$ , где  $l_n$  и  $l_{n-1}$  – соответствующие длины микротрещины,  $n = 1, 2, 3 \dots$ ;

в) Расстояние между трещинами разных порядков также изменяется кратно двум.

### Результаты исследования и их обсуждение

Анализ полученных данных показывает, что для различных видов твердых тел характерна закономерность масштабной инвариантности [16]:  $\frac{X_n}{X_{n-1}} = C = 2$ ; процессы разрушения (под внешним воздействием или самопроизвольно), происходят согласно свойству масштабной инвариантности и обладают *свойством самоподобности*.

Отсюда можно заключить, что каждый раз, когда твердое тело обладает устойчивым периодическим состоянием, и это состояние при изменении соответствующего параметра испытывает последовательность бифуркаций с периодом  $C=2$ , то такой процесс называется *итерационным* и соответствующая последовательность значений параметра неизбежно сходится к решению со скоростью геометрической прогрессии.

Тогда процесс разрушения системы можно описать функциональной итерацией [10]:

$$X_n = X_0 C^n, \quad (2)$$

где  $n = 0, \pm 1; \pm 2, \pm 8, \dots$ ,  $C = 2$  — масштабный инвариант,  $X_n$  — характерный масштаб  $n$ -го изменения,  $X_0$  — масштаб начального изменения. Уравнение (2) можно представить в виде системы рекуррентных уравнений:

$$\frac{X_1}{X_0} = \frac{X_2}{X_1} = \frac{X_3}{X_2} = \dots = \frac{X_n}{X_{n-1}} = C, \quad (3)$$

Таким образом, масштабные уровни (микроскопический, мезоскопический, структурный, микроскопический) между собой связаны итерационным уравнением (3). Отсюда, зная закономерности деформации и разрушения в диапазоне одного масштабного уровня, можно путем функциональной итерации определить состояние системы в любом уровне.

### Выводы

1. Установлено, что одним из перспективных и эффективных методов определения физико-технических условий разрушения твердых тел является применение теории фракталов и получено рекуррентное уравнение для процесса разрушения тонкой пленки и развития структурных уровней.

2. Эксперименты по изучению разрушения микроскопических твердых тел показали фрактальность развития микротрещин в твердых телах (в тонкой пленке).

*Список литературы:*

1. Андрейкив А. Е. Пространственные задачи теории трещин. Киев: Наукова думка, 1982. 345 с.
2. Партон В. З., Борисовский В. Г. Динамика хрупкого разрушения. М.: Машиностроение, 1988. 239 с.
3. Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
4. Мишин М. В., Александров С. Е., Кретушева И. В., Боричева И. К. Формирование фрактальных структур микрометрового размера из наночастиц диоксида кремния // *Материаловедение. Энергетика*. 2012. №4 (159). С. 105-110.
5. Yaohui W., Tingjie L. The fractal characteristics of micro-cracks in rock under uniaxial compression // *ISRM International Symposium-2nd Asian Rock Mechanics Symposium*. OnePetro, 2001.
6. Sun B., Liu S., Zeng S., Wang S., Wang S. Dynamic characteristics and fractal representations of crack propagation of rock with different fissures under multiple impact loadings // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. №1. P. 13071. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92277-x>
7. Кузнецов П. В., Петракова И. В., Шрайбер Ю. Фрактальная размерность как характеристика усталости поликристаллов металлов // *Физическая мезомеханика*. 2004. Т. 7. №S1-1. С. 389-392.
8. Tashpolotov I., Sadvovskii B. F. Phenomenon of discreteness at the formation of aerosol deposits in fiber filters // *Journal of Aerosol Science*. 1995. V. 26. P. S487-S488. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(95\)97151-4](https://doi.org/10.1016/0021-8502(95)97151-4)
9. Ташполотов Ы. и др. Свойства дискретности в процессах разрушения и образования конденсированной фазы // *Доклады Академии наук*. 1995. Т. 344. №4. С. 474-476.
10. Фейгенбаум М. Универсальность в поведении нелинейных систем // *Успехи физических наук*. 1983. Т. 141. №10. С. 343-374.

*References:*

1. Andreikiv, A. E. (1982). *Prostranstvennyye zadachi teorii treshchin*. Kiev. (in Russian).
2. Parton, V. Z., & Borisovskii, V. G. (1988). *Dinamika khрупkogo razrusheniya*. Moscow. (in Russian).
3. Ivanova, V. S., Balankin, A. S., Bunin, I. Zh., & Oksogoev, A. A. (1994). *Sinergetika i fraktaly v materialovedenii*. Moscow. (in Russian).
4. Mishin, M. V., Aleksandrov, S. E., Kretusheva, I. V., & Boricheva, I. K. (2012). *Formirovanie fraktal'nykh struktur mikrometrovogo razmera iz nanochastits dioksida kremniya*. *Materialovedenie. Energetika*, (4 (159)), 105-110. (in Russian).
5. Yaohui, W., & Tingjie, L. (2001, September). The fractal characteristics of micro-cracks in rock under uniaxial compression. In *ISRM International Symposium-2nd Asian Rock Mechanics Symposium*. OnePetro.
6. Sun, B., Liu, S., Zeng, S., Wang, S., & Wang, S. (2021). Dynamic characteristics and fractal representations of crack propagation of rock with different fissures under multiple impact loadings. *Scientific Reports*, 11(1), 13071. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92277-x>
7. Kuznetsov, P. V., Petrakova, I. V., & Shraiber, Yu. (2004). *Fraktal'naya razmernost' kak*

karakteristika ustalosti polikristallov metallov. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 7(S1-1), 389-392.

8. Tashpolotov, I., & Sadovskii, B. F. (1995). Phenomenon of discreteness at the formation of aerosol deposits in fiber filters. *Journal of Aerosol Science*, 26, S487-S488. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(95\)97151-4](https://doi.org/10.1016/0021-8502(95)97151-4)

9. Tashpolotov, Y., Sadovskii, B. F., Chernyaeva, G. A., & Petryanov-Sokolov, I. V. (1995). Svoistva diskretnosti v protsessakh razrusheniya i obrazovaniya kondensirovannoi fazy. In *Doklady Akademii nauk (Vol. 344, No. 4, pp. 474-476)*. Rossiiskaya akademiya nauk. (in Russian).

10. Feigenbaum, M. (1983). Universal'nost' v povedenii nelineinykh sistem. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 141(10), 343-374. (in Russian).

Работа поступила  
в редакцию 04.04.2023 г.

Принята к публикации  
12.04.2023 г.

---

*Ссылка для цитирования:*

Ташполотов Ы., Хожиматов У. Т., Садыков Э., Абдыбапова Г. Особенности развития микротрещин в твердых телах // Бюллетень науки и практики. 2023. Т. 9. №5. С. 406-411. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/90/51>

*Cite as (APA):*

Tashpolotov, Y., Khozhimatov, U., Sadykov, E., & Abdybapova, G. (2023). Features of the Development of Microcracks in Solids. *Bulletin of Science and Practice*, 9(5), 406-411. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/90/51>