ПРОБЛЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ И НАДЕЖНОСТИ МАШИН 2020, № 5, с. 87–94

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ

УДК 539.375 01;05

ПРИРОДА ФРАКТАЛЬНОГО РЕЛЬЕФА РАЗРУШЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

© 2020 г. Г. Г. Савенков[1,2,3,*], В. В. Столяров[4], А. В. Кузнецов[3], Ю. И. Мещеряков[5]

[1] *Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия*

[2] *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия*

[3] *Машиностроительный завод "Армалит", Санкт-Петербург, Россия*

[4] *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*

[5] *Институт проблем машиноведения, Санкт-Петербург, Россия*

**e-mail: sav-georgij@yandex.ru*

Поступила в редакцию 08.05.2019 г.
Принята к публикации 29.05.2020 г.

Представлены экспериментально-теоретические результаты исследований показывающие, что фрактальность контуров поверхностей разрушенных в результате динамического нагружения образцов объясняется дисперсией скоростей частиц (элементарных носителей деформации) на различных масштабно-структурных уровнях деформирования и разрушения.

Ключевые слова: фрактал, динамическое нагружение, распределение скоростей частиц

DOI: 10.31857/S0235711920050132

Прежде чем говорить о фрактальности рельефа разрушения напомним определение понятия "фрактального объекта". В соответствии с суженным определением этого понятия, которое предложил Б. Мандельброт, оно звучит так: "фракталом называется структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому".

То, что рельеф и поверхности разрушения металлических материалов или контур одиночной трещины в неком образце на мезомасштабном уровне не являются гладкими, а имеют фрактальную структуру, отражающую их самоподобие, в настоящее время не вызывает сомнений. В этом случае характеристикой поверхности излома является фрактальная размерность D_f либо его контура, либо его поверхности. В первом случае $1 < D_f < 2$, во втором – $2 < D_f < 3$. Определение фрактальной размерности позволяет в первую очередь более точно определить истинные механические характеристики материалов. Десятки работ, подтверждающих данное утверждение, увидели свет после первой публикации основоположника фрактальной геометрии Б. Мандельброта с соавторами [1]. Существуют работы, находящиеся в бесспорном меньшинстве, которые ставят под сомнение вышеприведенное утверждение. В первую очередь эти сомнения связаны с отсутствием объяснений причин формирования фрактальной геометрии при разрушении. В некоторых работах предпринимались попытки (не очень успешные) создания моделей разрушения, приводящих к фрактальности поверхностей разрушения металлических материалов при квазистатическом нагружении. Несмотря на то, что существует большое количество публикаций (например, [2] и ряд других более ранних), в которых приводятся доказательства фрактальности рельефа макротрещин и поверхностей разрушения при динамическом нагружении, в них также не объясняются причины, приводящие к такой геометрии поверхностей разрушения.

Рассмотрим вопросы, связанные с изложением причин, приводящих к структурам разрушения с фрактальной геометрией при динамическом нагружении.

Механизмы динамического деформирования и разрушения. Под динамическими процессами будем понимать процессы деформации и разрушения, происходящие при скоростях деформации $\dot{\varepsilon} = 10^3–10^6$ с$^{-1}$. Такие скорости реализуются и регистрируются в рамках методик разрезного стержня Гопкинсона (РСГ), плоского соударения пластин со скоростями до 1000 м/с и некоторых других.

В настоящее время, благодаря многочисленным экспериментальным исследованиям, установлено, что при ударном и ударно-волновом нагружении разрушению твердых тел в поле внешних сил предшествует появление некоторой плотности дефектов кристаллического строения (дислокаций, деформационных вакансий и др.). Коллективные движения дефектов на разных структурных уровнях в диапазоне масштабов от нано- до макроуровней являются актами пластической деформации, и процесс разрушения является заключительной стадией пластической деформации (ПД) твердого тела.

Важным фактором при динамическом нагружении твердых тел может являться кривизна кристаллической решетки, которая сильно изменяется при увеличении скорости деформации [3].

При динамическом нагружении материалов ПД осуществляется в виде распространения волнового пластического фронта на нескольких масштабных уровнях, а само динамическое разрушение металлических материалов является сложным, многостадийным, многомасштабным и неоднородным в пространстве и времени процессом. Многостадийность процесса разрушения обусловлена предваряющей ему пластической деформацией (также многостадийной), предразрушением – ослаблением и разрывом межатомных связей (образование зародышевых дефектов) с дальнейшим развитием различного рода микронесплошностей и последующего окончательного разрушения – накопление дефектов и повреждений, их рост и смыкание в магистральную трещину (разрыв тела). Неоднородность динамического деформирования и разрушения обусловлена в первую очередь тем, что практически все значимые конструкционные материалы неоднородны (в зависимости от масштаба измерения) по структуре, фазовому и химическому составу.

Многостадийность связана, прежде всего, с дефектами кристаллического строения металлических материалов, а также и с их структурными неоднородностями на различных масштабных уровнях – от микро- до макроуровня уже изначально существовавшими в материале или образовавшимися в процессе нагружения. Под структурными неоднородностями, возникающими в ходе динамического нагружения, обычно понимают: границы субзерен, двойники, скопления дислокаций, полосы локализованного сдвига, вихревые образования и другие.

На каждом масштабном структурном уровне, так же, как и для квазистатического нагружения, существуют свои элементарные носители динамической деформации (ЭНД) и динамического разрушения. На микроуровне к таким носителям относятся точечные дефекты, дислокации, двойники и т.п. Сложнее обстоит дело с носителями динамического деформирования и разрушения на мезоскопическом масштабном уровне. Для квазистатического деформирования элементарными носителями мезоуровня являются конкретные дефекты кристаллической структуры, такие как скопления дислокаций, полосы локализованного сдвига, мезофрагменты и другие структурные элементы, размером более 0.1 мкм и менее 500 мкм. Поскольку при определенной

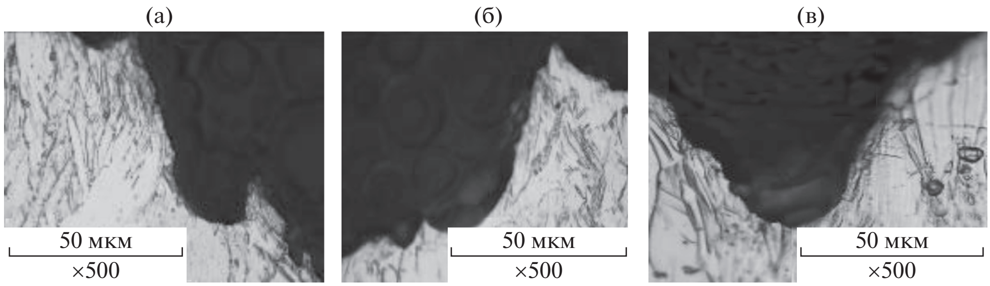

Рис. 1. Структуры титанового сплава 3М в зоне разрушения образцов: (а) – 800 $с^{-1}$; (б) – 1100 $с^{-1}$; (в) – 1500 $с^{-1}$.

кривизне кристаллической решетки проявляется структурная турбулентность пластического течения, то она может определять и элементарные носители динамического деформирования [4]. В общем случае динамического деформирования в качестве мезочастиц выступают дислокационные заряды, зерна или даже полевые пространственные структуры. Отличительной особенностью таких структур является их кооперация в мезопотоки. Время жизни подобных структур определяется продолжительностью процесса динамического деформирования, т.е. до тех пор, пока скорости движения частиц среды не равны нулю [5].

Для квазистатического нагружения деформация структурных элементов каждого масштабного уровня обеспечивается элементарными носителями более мелких масштабов, причем трансляция на одном уровне обязательно сопровождается поворотом на более высоком уровне и наоборот. В случае динамического нагружения трансляционные и ротационные кинематические механизмы деформации могут реализоваться на нескольких масштабных уровнях одновременно, но и в этом случае элементарные носители деформации низшего масштабного уровня обеспечивают деформацию более высокого уровня. Известно, что элементарному акту разрушения предшествует появление в субмикроскопических объемах материала некоторой плотности дефектов кристаллического строения. По мере накопления дефектов и их взаимодействия между собой они формируют новую иерархическую последовательность ансамблей мезоскопического уровня. Объединение дефектов мезоскопического уровня приводит к макроразрушению.

В работе [6] установлено, что с ростом скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ релаксационные свойства структуры не успевают аккомодировать структурные искажения, тем самым, локализуя область критической повреждаемости материалов накануне акта разделения образцов на части. Микроструктурные исследования образцов после испытаний на РСГ показали, что с повышением $\dot{\varepsilon}$ от 1300 до 2000 $с^{-1}$ в зоне разрушения образцов стали 08Х18Н10Т последовательность структур изменяется от фрагментов (50 × 10 мкм) до каналов деформации в форме полос шириной 15 ± 5 мкм и менее 5 мкм. Т.е. при увеличении $\dot{\varepsilon}$ характерный размер области, в пределах которой происходят процессы микропластической деформации, уменьшается.

В титановом сплаве 3М с повышением $\dot{\varepsilon}$ от 800 до 1500 $с^{-1}$ выявлены цепочки полигонов в форме параллелепипедов размерами 30 × 50 мкм, структурные объекты полосового вида шириной 20 ± 5 мкм и каналы деформации шириной до ~13–15 мкм (рис. 1). Налицо тот же эффект: уменьшение размеров представительной области с ростом скорости.

Предположительно в бронзе пластическая деформация осуществлялась в виде движения зеренных потоков (рис. 2). Данный механизм приводит к образованию каналов (а) (б) (в)

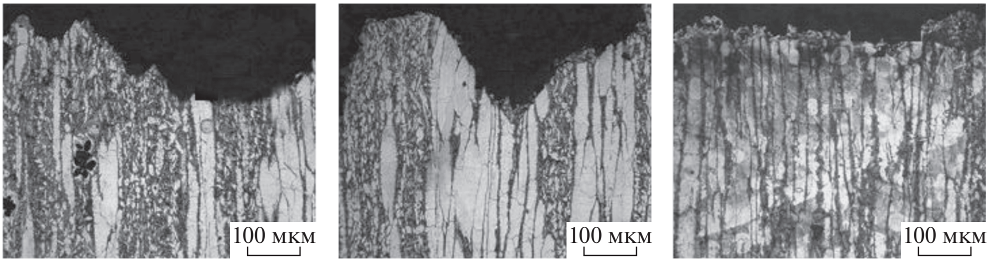

Рис. 2. Структура бронзы в зоне разрушения образцов: (а) – 1150 с$^{-1}$; (б) – 1500 с$^{-1}$; (в) – 1800 с$^{-1}$.

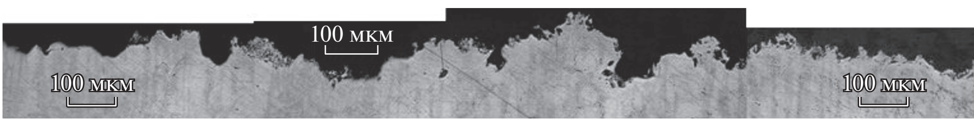

Рис. 3. Поверхность разрушения образца из бронзы БрАЖНМц ($\dot{\varepsilon}$ = 1500 с$^{-1}$).

(а) (б) (в)

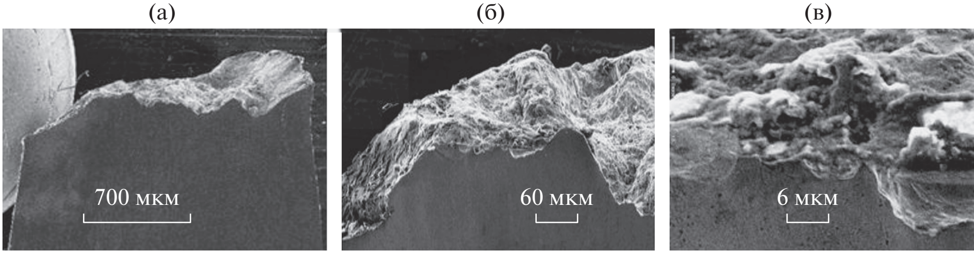

Рис. 4. Поверхность разрушения образца из бронзы БрАЖНМц ($\dot{\varepsilon}$ = 2000 с$^{-1}$): ×25 (а); ×250 (б); ×2500 (в).

микро-мезопластической деформации, которые на микрофотографиях образцов выглядят в виде полос. Как известно, полосовая структура, характерна для мезоскопического масштабного уровня пластической деформации. Поверхность разрушения для бронзы и титана, в некоторых случаях напоминает регулярные фрактальные структуры, так называемые фигуры (звездочки) Коха [7] (рис. 3), что указывает на несомненную фрактальную геометрию поверхности.

На рис. 4 представлена часть поверхности образца из бронзы при разных увеличениях (именно при разных увеличениях одного и того же участка разрушения методом вертикальных сечений определяется фрактальная размерность [7]).

Для данного участка контура $D_f = 1.18$. По мере увеличения $\dot{\varepsilon}$ в пределах (1.15–1.8) × 10^3 с$^{-1}$ ширина каналов микро-мезопластической деформации уменьшалась от (80–200) мкм до (20–30) мкм. Между каналами микро-мезопластической деформации были видны микротрещины различной длины. Такие микродефекты свидетельствуют о скоростной неоднородности движения частиц среды в зоне пластического течения материала образца. Представленные результаты подтверждают концепцию, развиваемую двумя авторами настоящей статьи (Ю.И. Мещеряковым и Г.Г. Савенковым),

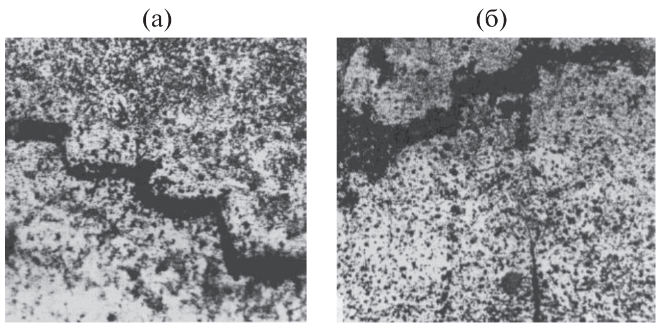

Рис. 5. Контур откольной щели стали 45ХНМФА в виде фрактальной кривой (×100) при скоростях удара 350 м/с – (а) и 400 м/с – (б).

о том, что в процессе динамического нагружения кроме средней скорости частиц существует и дисперсия распределения этих частиц по скоростям, которая определяется движением соседних участков материала с разными скоростями.

Экспериментальные основания фрактальной природы поверхностей разрушения динамически нагружаемых металлических материалов. В работах ([5, 8] и др.) достоверно теоретически и экспериментально установлено, что движение частиц среды под действием волнового импульса на каждом масштабном уровне обладает скоростной неоднородностью в скоррелированном поле скоростей. Так мезопотоки частиц двигаются с различной скоростью относительно друг друга [5], внутри мезопотоков ЭНД микроскопического уровня – дислокации также двигаются с неким разбросом скоростей относительно друг друга [8]. Кроме того, изменение дислокационной структуры, которое происходит в процессе роста пластической деформации, подчиняется принципу самоподобия, т.е. в процессе эволюции дислокационной структуры сохраняются соотношения между ее параметрами.

Экспериментальные методики, основанные на измерении с помощью лазерного дифференциального интерферометра скорости свободной поверхности динамически нагружаемого плоского образца и позволяющие надежно фиксировать разброс по скоростям частиц различного масштабного уровня, подробно изложены в [5].

Если имеется разброс по скоростям элементарных носителей динамической деформации (ЭНД) на каждом масштабно-структурном уровне, то логично предположить, что деформации (а значит и перемещения) локализованных элементов образца материала будут неодинаковы по сечению образца в момент, когда при достижении неких критических условий, произойдет его разрушение. Такое развитие событий, собственно, и приводит к шероховатой поверхности образца. Такая неодинаковость деформаций и перемещений (или удлинений) существует на каждом масштабном уровне. Если же допустить, что разброс скоростей ЭНД каждого уровня внутри материального элемента среды будет приблизительно одинаков, то в результате с неизбежностью на данном элементе появляется рельеф поверхности с фрактальной геометрией.

Поясним данное положение следующим примером. В работе [5] экспериментально показан укрупненный процесс формирования откольной щели в плоских образцах из стали 45ХНМФА. Если же представить, что каждый поперечный фрагмент состоит из множества более мелких фрагментов, то мы получим контур откольной щели (рис. 5), который описывается в рамках фрактальной геометрии.

Статистический подход к теоретическому обоснованию фрактальной природы поверхности разрушения динамически нагружаемого материала. Известно, что теоретическое описание процесса динамического деформирования невозможно без определяющего уравнения для ЭНД. Для микроскопического масштабного уровня определяющим является уравнение Орована, записанное в двучленной форме, которое связывает скорость деформации сдвига $\dot{\gamma}$ с плотностью N_m и средней скоростью подвижных дислокаций V_d, а также со скоростью размножения дислокаций $\dot{N}$

$$\dot{\gamma} = b\dot{N}x + bN_mV_d, \tag{1}$$

где b – вектор Бюргерса; x – средняя длина пробега дислокации.

В случае мезоскопического масштабного уровня, где в качестве ЭНД гипотетически могут выступать дисклинации или диполи частичных дисклинаций, определяющим уравнением для скорости пластической деформации является уравнение Франка, записываемое в виде

$$\dot{\varepsilon} = 2an\omega V_D, \tag{2}$$

где $2a$ – длина плеча диполя; n – плотность диполей частичных дисклинаций; ω – вектор Франка; V_D – средняя скорость диполей.

В уравнениях (1), (2) фигурируют средние скорости либо дислокаций, либо диполей частичных дисклинаций. При разбросе скоростей ЭНД на каждом из значимых масштабных уровней уже необходим статистический подход к описанию процессов динамического нагружения. В этом случае вводят функции распределения частиц (ЭНД любого уровня) по скоростям или плотности вероятности [5, 8]. В соответствии с определением функции распределения частиц по скоростям, величина $f(w,V,t)$, означает математическое ожидание числа частиц N в объеме w в момент времени от t до $t + dt$, имеющих скорости в диапазоне от V до $V + dV$. Из условия нормировки следует

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(w,V,t)dwdt = N. \tag{3}$$

Уравнение (3) справедливо только для случая однотипных частиц, если имеется несколько типов частиц N_i, каждый из которых характеризуется своей собственной функцией распределения $f_i(\omega,V,t)$, $f_i(\omega,V,t)$, то условия нормировки должны выполняться для каждого типа частиц

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_i(w,V,t)dwdt = N_i. \tag{4}$$

Из условия (4) следует, что величина $n_i(w,t)$ определяемая выражением

$$\int_{-\infty}^{\infty} dVf(w,V,t) = n_i, \tag{5}$$

имеет смысл средней плотности частиц i-го типа. Для характеристики флуктуативных свойств динамически деформируемой среды можно ввести понятие дисперсии скорости частиц [8]

$$D^2 = \int (V-u)^2 f dV, \tag{6}$$

где u – средняя (потоковая) скорость частиц.

Для ансамбля частиц со случайным характером взаимодействия и с дальнодействием, к которым принадлежат микро- и мезочастицы, поведение функции распределения по скоростям f можно описать кинетическим уравнением Фоккера–Планка [5, 8]

$$\frac{\partial f}{\partial t} + V\frac{\partial f}{\partial x} + f_1(x)\frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial V}(F_1 f) + \frac{1}{2}\frac{\partial^2}{\partial V^2}(F_2 f), \tag{7}$$

где $f_1(x)$ – внешняя сила; F_1 – коэффициент динамического трения (иначе называемого коэффициентом дрейфа) характеризует скорость изменения отклонения скорости частиц $\langle V \rangle$ от их средней скорости u; F_2 – коэффициент диффузии (перколяции) частиц в пространстве скоростей характеризует скорость изменения дисперсии D.

Левая часть уравнения (7) описывает конвективный перенос плотности вероятности в координатах: время–пространство–пространство скоростей. Правая часть уравнения (7) определяет условия переноса, а именно: первый (дрейфовый) член в правой части характеризует изменение плотности вероятности в пространстве скоростей, а второй – описывает влияние на распределение флуктуаций скорости частиц. Уравнение Фоккера–Планка представляет собой дифференциальное уравнение в частных производных с переменными коэффициентами и в общем случае не разрешимо. Но в двух случаях решение уравнения (7) возможно для стационарного состояния, когда аргумент не зависит от времени (это случай нас не интересует), и для нестационарного – в автомодельном режиме [9]. Для второго случая функция распределения f зависит только от двух аргументов x, t и выражается через единственную переменную $z = x/l(t)$

$$f(x,t) = l^{\beta}\psi(z), \tag{8}$$

где функции $l(t)$, $\psi(z)$ и показатель β подлежат определению; $l(t)$ – масштаб измерения величины x, который изменяется со временем. Из условия нормировки функции распределения f показатель степени $\beta = -1$ [9]. Функцию $\psi(z)$ можно определить только при задании скейлинговых свойств силы $f_1(x)$ в виде $f_1(x) = l^{\gamma}F(z)$, где зависимость $F(z)$ принимается заданной. В этом случае из решения уравнения Фоккера–Планка (7) при условии $l^{-\gamma}\dot{l} = \mathrm{const} \equiv \mu$ (здесь μ – кинематическая вязкость среды) следует [9]

$$l(t) = \left[\mu(1-\gamma)t\right]^{1/(1-\gamma)}. \tag{9}$$

В [9] показано, что функция координаты от времени $x(t)$ является масштабно-инвариантной фрактальной кривой типа функции Вейерштрасса–Мандельброта. Показатель степени γ в выражении (9) равен

$$\gamma = 1 - D_f. \tag{10}$$

Подставляя (10) в (9) и, учитывая, что μ является функцией дисперсии скоростей ЭНД $\mu = f_2(D) \cong D\Delta h$ (Δh – ширина потока ЭНД (частиц) соответствующего масштабного уровня) [8], получим

$$l(t) = \left[f_2(D)D_f t\right]^{1/D_f}. \tag{11}$$

Однако, вследствие того, что переменные x и t имеют различные масштабы измерения, функция $x(t)$ является не самоподобной, а самоаффинной, для которой не все коэффициенты подобия являются одинаковыми. Этим и объясняется определение фрактала, приведенное в начале статьи. Для самоаффиной кривой существуют три значения фрактальной размерности: глобальная, локальная и внутренняя [7]. Внутренняя и определяет длину кривой.

Если мы говорим о контуре излома динамически разрушенного образца (например, контуре откольной щели), то можно достоверно определить фрактальную размерность контура только в пределах диаметра лазерного луча дифференциального интерферометра (75–350 мкм), в пределах которого определена дисперсия скоростей частиц среды. Смещая лазерный луч относительно диаметра образца, мы получаем другое значение дисперсии и, как следствие, другое значение фрактальной размерности. Именно в этом же диапазоне размеров фрактальная размерность достоверна статистически, поскольку рельеф излома, как и любой фотокадр, измерим в диапазоне не более двух порядков [10, 11]. Поэтому можно говорить о фрактальной размерности контура излома, как о некотором среднем значении фрактальных размерностей зон освещения луча (зон контура рельефа на которых производилось геометрическое определение D_f). Определение фрактальной размерности поверхности разрушения испытанных образцов позволяет более точно определять истинные механические характеристики материалов, в частности, предел прочности и сужение [12].

Выводы. 1. Природа фрактальности контура излома динамически разрушенных образцов заключается в одинаковом распределении скоростей частиц на различных масштабно-структурных уровнях деформирования. При полном совпадении функции распределения скоростей можно ожидать регулярные геометрические фракталы, в других случаях – фрактальные структуры по осторожному определению Б. Мандельброта; **2.** Фрактальная размерность контура излома определяется выбранным масштабом измерения l и дисперсией частиц по скоростям D. **3.** Фрактальная размерность контура излома является средним значением фрактальных размерностей участков контура, в пределах которых происходит определение дисперсии скоростей частиц.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (договор № 02.а03.21.0005).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mandelbrot B.B., Passoja D.E., Paullay A.J.* Fractal character of fracture surfaces of metals // Nature. 1984. V. 308. N. 5961. P. 721.
2. *Брагов А.М., Константинов А.Ю., Кузнецов А.В., Ломунов А.К., Савенков Г.Г.* Взаимосвязь скорости трещины и фрактальной размерности с динамической трещиностойкостью материала // Прикладная механика и техническая физика. 2018. № 1. С. 153.
3. *Panin V.E., Egorushkin V.E., Surikova N.S., Pochivalov Yu.I.* Shear-bands as translation-rotation modes of plastic deformation in sods under alternate bending // Materials Science and Engineering: A. 2017. V. 703. P. 451.
4. *Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Кузнецов П.В., Гальченко Н.К., Шугуров А.Р., Власов И.В., Дерюгин Е.Е.* Структурная турбулентность пластического течения и вязкого разрушения низколегированной стали в условиях кривизны кристаллической решетки // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22. № 4. С. 16.
5. *Мещеряков Ю.И.* Многомасштабные ударно-волновые процессы в твердых телах. СПб.: Нестор-История, 2018. 480 с.
6. *Савенков Г.Г., Кузнецов А.В., Брагов А.М. и др.* Структурно-геометрические переходы при нагружении // Вестник ПНИПУ. Механика. 2016. № 3. С. 164.
7. *Федер Е.* Фракталы. М.: Ленанд, 2014. 256 с.
8. *Мещеряков Ю.И.* Кинетика высокоскоростного деформирования и формирование мезоуровня // Физическая механика. Вып. 9. Сильно неравновесные процессы в механике неоднородных сред. СПб.: Изд-во ВВМ. 2018. С. 133.
9. *Олемской А.И.* Теория стохастических систем с мультипликативным шумом // Успехи физических наук. 1998. Т. 168. № 3. С. 287.
10. *Кудря А.В., Соколовская Э.А., Арсенкин А.М.* Эффективность применения средств наблюдения различной размерности для анализа морфологии излома улучшаемых сталей // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 1. С. 38.
11. *Штремель М.А.* Разрушение. Книга 1. Разрушение материала. М.: Издательский Дом МИСиС, 2014. 670 с.
12. *Hilders O.A., Zambrano N., Caballero R.* Microstructure, Strength, and fracture Topography in AISI 316L Stainless Steel, as Seen through a Fractal Approach and the Hall-Petch Law // International Journal of Metals. 2015. V. 2015. P. 1.